

新疆阿尔泰大东沟铅锌矿床地质特征及稳定同位素地球化学研究

刘敏¹⁾, 张作衡¹⁾, 王永强²⁾, 郭旭吉²⁾

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

内容提要:文章在对大东沟铅锌矿床地质特征进行详细描述的基础上,系统地研究了矿石的碳、氢、氧、硫同位素组成。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,其中锌的含量高于铅。围岩蚀变较发育,矽卡岩化与铅锌矿化关系密切。矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $-22.3\text{‰} \sim +11.7\text{‰}$,方解石中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值介于 $-4.2\text{‰} \sim +0.4\text{‰}$ 之间,计算所得的石英及方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值在 $-11.4\text{‰} \sim +7.6\text{‰}$ 之间,成矿流体主要为大气降水与岩浆水的混合物。结合区域资料,认为矿床形成于火山活动的间歇期,受北西向断裂、火山沉积盆地及热液流体活动的控制,应属于火山—沉积岩容矿的块状硫化物矿床,矿床形成后经历了区域变质作用及热液流体改造。

关键词: 大东沟铅锌矿; 地质特征; 稳定同位素; 成矿机制; 阿尔泰

阿尔泰多金属成矿带是中国重要的成矿带之一,该带位于哈萨克斯坦至中国新疆北部阿尔泰地区,呈 NW-SE 向线状延伸,全长 2500km,在我国境内延伸约 1900 km,除可可塔勒大型铅锌矿、阿舍勒大型铜矿、喀拉通克大型铜镍矿以外,还分布有大东沟铅锌矿,阿巴宫、铁米尔特、恰夏多金属矿等一批中小型矿床(李景朝等,2002;杨富全等,2006;王少怀,2006)。位于该带内的阿尔泰南缘活动带是一个重要的铅、锌、铁矿化集中区,阿尔泰山南缘等间距斜列着 3 个早泥盆世火山沉积盆地,从北西向南东依次为冲乎尔盆地、克兰盆地和麦兹盆地(秦克章等,1998;王京彬等,1998;郭正林等,2007)。其中冲乎尔盆地以铜、锌矿化为主;麦兹盆地以铅、锌、铁矿化为主;克兰盆地是 3 个盆地中矿化种类最多的一个盆地,分布有金、铜、铅、锌、铁矿等(焦学军等,2005;刘悟辉等,2006;郭正林等,2007)。大东沟铅锌矿为一新发现的中型矿床,位于阿尔泰山南缘的克兰多金属成矿亚带中部地段的铁米尔特—萨热阔布金、铁、铜、铅、锌多金属矿集区(王永强等,2007^①)。该矿床由新疆有色地质勘查局 706 队于 1999 年发现,目前正处于普查阶段,研究程度较低,

成矿物质来源及成矿时代尚不明确。在 2007 年的矿产普查工作中发现其矿体在地下深部有变厚、变富的趋势,资源潜力较大。本文对大东沟铅锌矿床已查明部分的地质特征进行了详细的描述,系统研究了矿石碳、氧、氢、硫同位素地球化学特征,初步探讨了大东沟铅锌矿的成矿物质来源及成矿机制,为今后的勘查及研究提供了基础性资料。

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,致使西伯利亚大陆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乎尔、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构造位置上,处于西伯利亚板块的晚古生代阿尔

注: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)资助的成果。

收稿日期:2008-07-12;改回日期:2008-09-03;责任编辑:郝梓国。

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。

泰大陆边缘。其基底地层为中上志留统库鲁姆提群($S_{2-3}kl$)和元古代克木齐群,前者属于陆源碎屑岩建造,后者为一套深变质岩系。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。康布铁堡组分布于阿勒泰复向斜两翼,北东翼出露较完整,南西翼被海西期花岗岩穿破,为一套含铁、铜、铅、锌及金的中等变质海相中酸性火山岩—火山碎屑岩—陆源碎屑沉积岩—碳酸盐岩建造,可划分为上、下两个亚组。下亚组(D_1k_1)主要岩性为黑云石英片岩、千枚岩、变流纹岩、流纹质晶屑凝灰岩等,与下伏地层呈整合接触;上亚组(D_1k_2)主要岩性为绿泥黑云片岩、变流纹岩、酸性凝灰岩、大理岩、变钙质砂岩等,与上覆地层中泥盆统阿勒泰镇组呈整合接触关系(申茂德等,2003;仇银江,2005;王书来等,2005)。中泥盆统阿勒泰镇组(D_2a)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,主要岩性为变质砂岩、粉砂岩、钙质粉砂岩、千枚岩、泥质板岩、硅质岩、大理岩、斜长角闪岩等(马忠美等,2001a,2001b;申茂德等,2003;郭旭吉,2004;尹意求等,2004,2005;刘忠孝,2007)。

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较发育,轴向 NW—SE,轴长大于 50km,轴面倾向 NE,倾角 $50^\circ\sim 70^\circ$,南西翼为正常翼,北东翼为倒转翼,在该向斜翼下泥盆统康布铁堡组非常发育。康布铁堡组在岩性岩相上明显受断裂构造控制,北东缘以克因宫大断裂为界,南西缘以阿巴宫大断裂为界(图 1),说明这些断裂是克兰火山沉积盆地重要的早泥盆世生长断层和火山活动通道(李思强等,2006a,2006b;郭正林等,2007;王永强等,2007^①)。核部为中泥盆统阿勒泰镇组第六岩性段地层(D_2a^6),从核部向外依次为 D_2a^6 、 D_1k 和 $S_{2-3}kl$,两翼次一级褶皱和断裂发育,北东翼以萨热阔布背斜、恰夏向斜规模较大,其轴迹沿走向延伸至大东沟,形成大东沟背斜和向斜(王永强等,2007^①);北西向断裂是区内最为发育且规模最大的一组断裂,与复向斜同期形成,在地貌上往往构成沟谷和断层崖,其中克因宫断裂和阿克巴斯套大断裂控制着克兰盆地的规模和形态。

该区域早泥盆世火山活动强烈,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。盆地内含矿层随着火山活动及喷流阶段而演化,随火山喷流沉积过程从气液交代—喷流—喷流沉积变化,矿床的成矿组分从铜铁(气液交

代)向铜铅锌(喷流“黑烟囱”)—金(喷流沉积)—铅锌(喷流热水沉积)的方向演化(申茂德等,2003)。铅锌含矿层主体为钙质砂岩、大理岩、硅质岩等,形成于火山洼地核心部位,显示出较明显的喷流和喷流沉积特征(申茂德等,2003;尹意求等,2005)。

2 矿区地质特征

矿区内出露地层主要为下泥盆统康布铁堡组上亚组(D_1k_2)和第四系全新统。康布铁堡组上亚组可划分为三个岩性段,第一岩性段为一套海相火山碎屑岩,主要岩性为变流纹质晶屑凝灰岩、流纹质凝灰岩等;第二岩性段为大东沟铅锌矿的含矿层位,分布于大东沟背斜两翼,由于沉积环境及褶皱构造的影响,两翼岩性差别较大。南西翼为一套碳酸盐沉积建造,夹少量火山碎屑沉积,主要岩性为钙质砂岩、大理岩、不纯大理岩及黑云母石英片岩等,层位内普遍发育块状硫化物、火山喷流沉积层和似层状矽卡岩等,铅锌矿体出现在该层位的最厚大部位;北东翼则为一套粘土质—碎屑岩沉积建造,主要岩性为黑云母绿泥石片岩、铁锰质大理岩、石英粉砂岩等。第三岩性段上部被阿巴宫大断裂错失,出露不全,为一套近火山口相的流纹质火山碎屑沉积建造,主要岩性为流纹质晶屑凝灰岩(王永强等,2007^①)。

矿区主要构造为大东沟背斜及大东沟向斜和北西向断裂。大东沟背斜沿走向延伸大于 10km,为倒转背斜,两翼产状基本一致,倾向北东,倾角约 80° ,轴部地层为下泥盆统康布铁堡组上亚组第一岩性段,两翼为第一、第二、第三岩性段;大东沟向斜沿走向延伸 10km,为一倒转向斜,两翼产状基本一致,倾向北东,倾角为 80° 左右,其轴部地层为下泥盆统康布铁堡组第三岩性段,两翼为第二岩性段;北西向断裂主要为阿巴宫断裂,为区域性大断裂,位于矿区南西侧,该侧可见断层崖及断层面,形成近 50~100m 宽的断裂带(大东沟)。

区内火山岩主要分布于下泥盆统康布铁堡组上亚组第一岩性段和第三岩性段,以流纹质火山岩、火山碎屑岩为主,属早泥盆世中-晚期火山活动旋回的产物,该旋回可以划分为两个亚旋回,即早泥盆世火山活动旋回中期亚旋回和早泥盆世火山活动旋回晚期亚旋回。其中,中期火山喷发期后阶段为区内铅锌成矿期。

矿区主要的变质作用有区域变质作用、动力变质作用和交代变质作用。工作区为绿片岩相,区内变质作用有西南弱、北东强的趋势,主要为低-中压

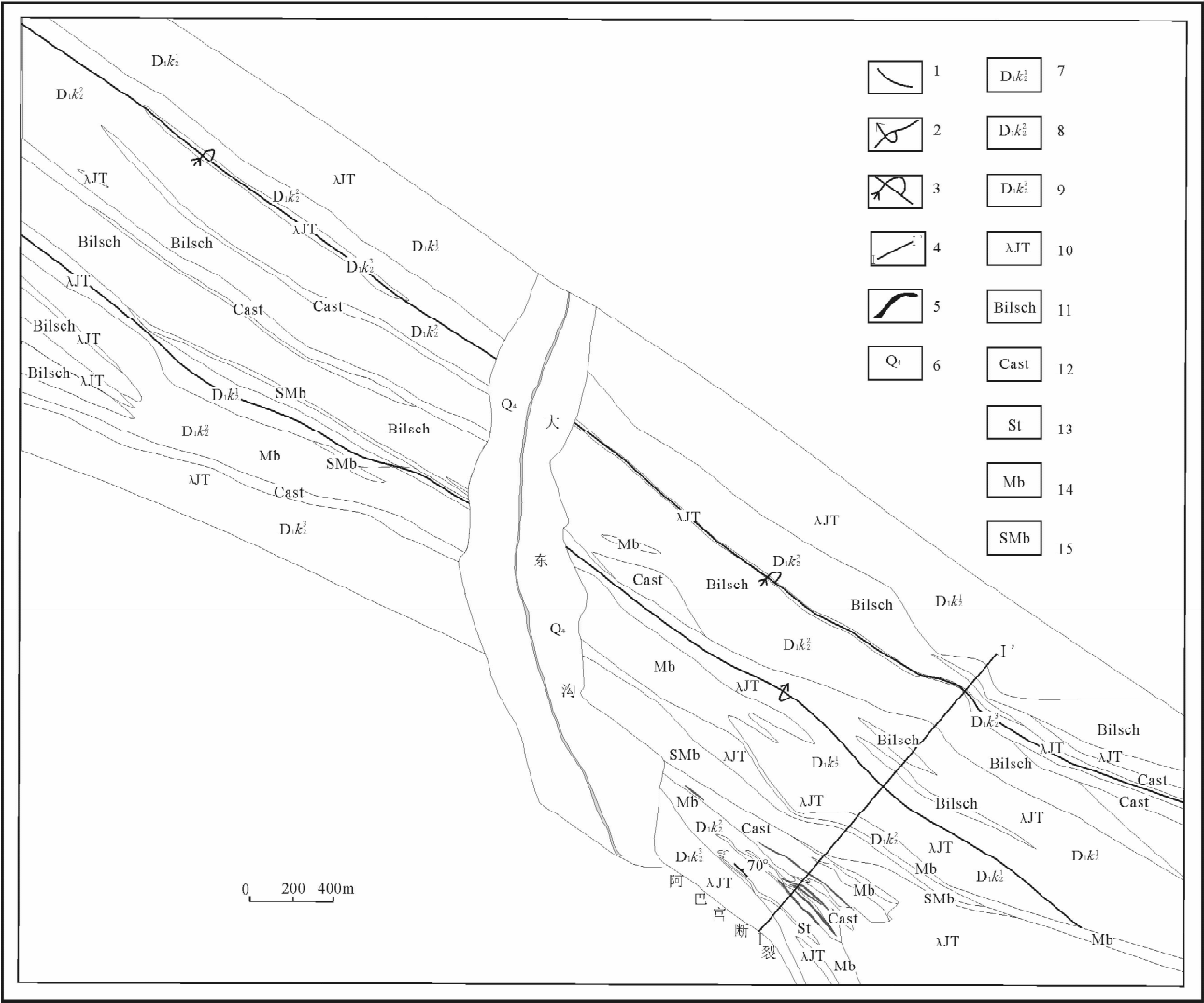


图 2 大东沟铅锌矿地质略图(根据新疆有色勘查局 706 队 1 : 10000 矿区地质图修改,2006)

Fig. 2 Geological map of Dadonggou Pb-Zn ore deposit (modified from the geological map of Pb-Zn ore deposit at 1 : 10000 by the No. 706 Geological Party of Xinjiang Geology and Exploration Bureau for Nonferrous Metals, 2006)

1—地质界线;2—倒转背斜;3—倒转向斜;4—图切割面及编号;5—铅锌矿体;6—第四系;7—康布铁堡组上亚组第一岩性段;8—康布铁堡组上亚组第二岩性段;9—康布铁堡组上亚组第三岩性段;10—变晶屑凝灰岩;11—黑云母绿泥片石岩;12—变钙质砂岩;13—变石英砂岩;14—大理岩;15—不纯大理岩

1—Geological boundary;2—overturned anticline;3—overturned synclines;4—cutting section and its number;5—Pb-Zn ore body;6—Quaternary;7—the first member of the Upper Subformation of the Kangbutiebao F. ;8—the second member of the Upper Subformation of the Kangbutiebao F. ;9—the third member of the Upper Subformation of the Kangbutiebao F. ;10—meta-crystal tuff;11—biotite-chlorite schist;12—metacalcareous sandstone;13—meta-quartz sandstone;14—marble;15—impure marble

~85°,局部产状较陡,偶见有反倾现象,矿体长一般100~600m,厚2~12m,垂直深度35~590m(王永强等,2007^①)。矿体形态多为似层状及透镜状。目前所发现的盲矿体多呈透镜状,少数为似层状。根据2007年钻探的结果显示矿体向深部有一定的延深,主矿体向深部具有明显变富变厚的趋势(王永强等,2007^①),但由于该矿床为一新发现的矿床,到目前为止,所投入的时间有限,工作量较少,矿体延伸、

规模、品位变化等特征均不明朗,需要进一步查明。

矿石矿物主要有闪锌矿、方铅矿、磁铁矿、黄铁矿及少量黄铜矿、磁黄铁矿和毒砂等;次生矿物有褐铁矿、黄钾铁矾和孔雀石等。其中方铅矿、闪锌矿呈条带状、浸染状、团块状及星点状分布,闪锌矿含量大于方铅矿,并在地表形成硫化物铁帽。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,深部似矽卡岩中还见有少量绿帘

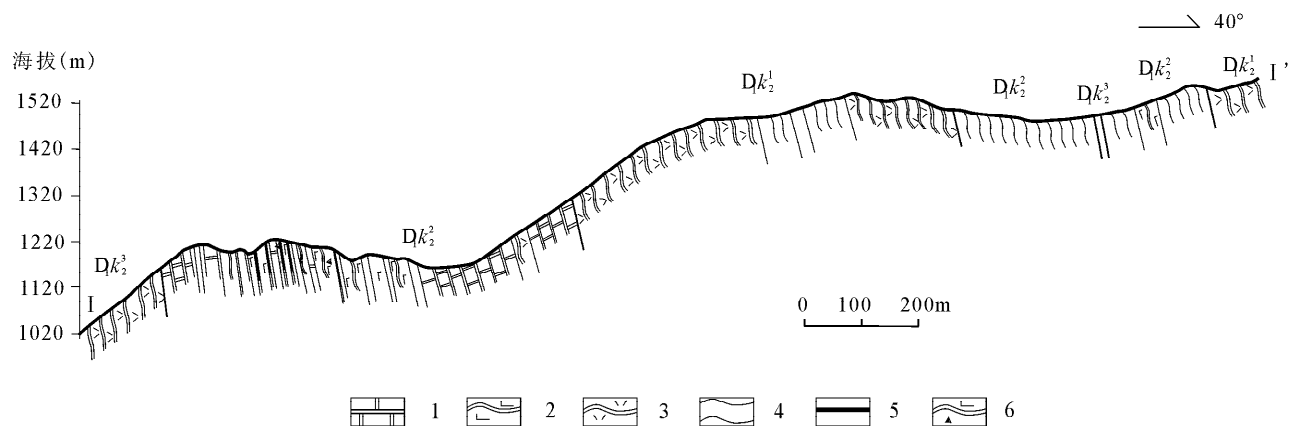


图 3 I-I'剖面图(根据新疆有色勘査局 706 队 1 : 10000 矿区地质图修改,2006)

Fig. 3 Section of No. I-I' (modified from the geological map of Pb-Zn ore deposit at 1 : 10000 by the No. 706 Geological Party of Xinjiang Geology and Exploration Bureau for Nonferrous Metals, 2006)

1—大理岩; 2—变钙质砂岩; 3—变晶屑凝灰岩; 4—黑云母绿泥石片岩; 5—铅锌矿体; 6—铅锌矿化变钙质砂岩
1—Marble; 2—metacalcareous sandstone; 3—crystalloblast tuff; 4—biotite-chlorite schist; 5—Pb-Zn ore body;
6—metacalc-sandstone with Pb-Zn mineralization

石和石榴子石等。矿石结构主要为变余砂状结构、变余粉砂结构、自形粒状结构、半自形粒状结构、它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。

3.1 矿化类型划分

此次工作笔者根据野外观察的矿物共生组合、赋矿围岩的特点和性质等,并结合新疆有色地质勘査局 706 队大东沟铅锌矿普查项目组的认识,将矿区的矿化类型分为四种。

(1)似矽卡岩中的条带状、浸染状及块状硫化物矿化:矿石矿物以闪锌矿为主,方铅矿含量相对较少,偶见团块状自形粒状黄铁矿,矿化主要与似矽卡岩化有关,矽卡岩矿物主要有石榴子石、绿泥石、绿帘石、阳起石等,石榴子石呈肉红色它形粒状,多具筛孔状构造。围岩多为变钙质砂岩,矿体上下盘常见纹层状变钙质砂岩,纹层构造较发育,并沿层理面充填有碳酸盐矿物。

(2)不纯大理岩中的条带状、浸染状硫化物矿化:矿石矿物以闪锌矿和方铅矿为主,方铅矿自形程度高于闪锌矿。在地表可形成褐色铁帽,常见后期形成的石英脉和方解石脉,围岩一般为不纯大理岩,并可逐渐过渡为矽卡岩化的变钙质砂岩。黄铁矿含量相对较高,多为它形细粒状,并常伴有金、铜矿化。

(3)石英脉中的方铅矿化:常与石英脉或石英方解石脉伴生,方铅矿多为自形一半自形粒状,除方铅矿外,常伴有少量毒砂及闪锌矿,均呈自形粒状出现,显微镜下观察显示该矿化类型中方铅矿边缘常

被闪锌矿交代。

(4)萤石石英岩中的方铅矿化:主要见于含萤石石英岩中,以铅矿化为主,含量 $Pb \gg Zn$,萤石多呈脉状分布,其间也可见少量呈脉状分布的碳酸盐矿物。

3.2 成矿阶段初步划分

依据上述不同矿化类型的野外穿插关系和分布,以及矿石结构构造特征、分布、产出状态及矿物组合关系,将成矿初步划分为以下几个阶段。

(1)似矽卡岩阶段(主成矿阶段或早成矿阶段)(如图 4a):以锌矿化为主,主要由石榴子石、阳起石、绿泥石、绿帘石、黑云母、辉石、石英、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿及少量方解石、磁黄铁矿等组成,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出现者。似矽卡岩化常呈层状出现。矿体多呈致密块状或稠密浸染状,构成重要的铅锌富矿石,矿体后期多经历了热液改造,常见后期形成的石英脉及方解石脉。

(2)多金属硫化物阶段(晚成矿阶段)(如图 4b):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。方铅矿含量高于第一阶段,黄铁矿多呈它形细粒状出现。

(3)石英脉型铅成矿阶段(如图 4c):常呈石英脉出现,除方铅矿外,常伴生有黄铁矿、毒砂及少量闪锌矿,该阶段形成最晚,野外可见其产物切穿其它阶段的产物,方铅矿多呈团块状、星点状自形一半自形粒状。

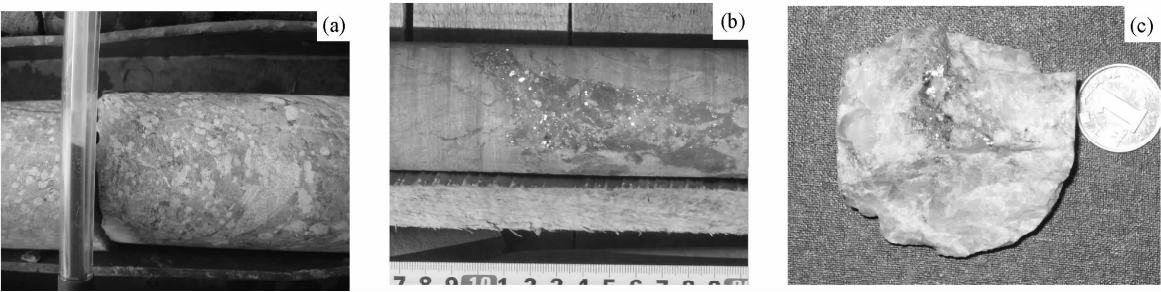


图 4 不同成矿阶段矿石标本及其矿物组成照片

Fig. 4 Pictures of ores from different mineralization stages, showing their mineral assemblage

该区围岩蚀变发育,与成矿关系十分复杂。与铁米尔特铅锌矿类似(闫新军等,2001;姜俊,2003;李嘉兴等,2006),大东沟铅锌矿底板广泛发育矽卡岩化,且与成矿关系密切。其围岩蚀变的主要类型有绢云母化、碳酸盐化、矽卡岩化、硅化、叶腊石化、高岭土化、黄铁矿化、褐铁矿化等。这种围岩蚀变的多期多样性被认为反映了成矿具有多期或多种成矿环境(王京彬等,1998)。

4 稳定同位素特征

本次研究共对大东沟铅锌矿主要成矿阶段的 11 件方解石和 18 件石英在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室分别进行了碳、氧和氢、氧同位素分析,结果分别列于表 1 和表 2。其中方解石的碳、氧同位素用 100%磷酸法测试,精度为±0.2‰;石英的氧同位素用 BrF₅法测试,精度为±0.2‰;石英的氢同位素用爆裂法取水,锌法制氢,测试精度为±2‰,所用的质谱仪均为 MAT 251EM 型。

由表 1 可知,大东沟铅锌矿方解石中的δ¹³C_{V-PDB}值的变化范围为-4.2‰~+0.4‰,但大多数介于

-3.6‰~-1.8‰;δ¹⁸O_{V-SMOW}值为-2.4‰~+14.6‰,大多数介于+12.8‰~+14.6‰,只有少数为负值;石英中δ¹⁸O_{V-SMOW}值为+11.7‰~+17.4‰;δD_{V-SMOW}为-89‰~-127‰,多数介于-101‰~-112‰(见表 2)。

利用实测的与同位素分析样品一致的方解石及石英包裹体的均一温度,采用同位素分馏方程 1000ln α_{方解石-水} = 2.78 × 10⁶ T⁻² - 2.89(O'Neil et al., 1969) 和 1000ln α_{石英-水} = 3.38 × 10⁶ T⁻² - 2.90(Clayton et al., 1972),分别计算出方解石的δ¹⁸O_水值为-11.4‰~+7.6‰,石英的δ¹⁸O_水值为-2.2‰~+7.3‰。

本次研究对不同成矿阶段的 8 件方铅矿、8 件闪锌矿、9 件黄铁矿、2 件磁黄铁矿和 2 件毒砂共 29 件硫化物进行了硫同位素分析,实验是在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成,测试方法以 Cu₂O 做氧化剂制备样品,用 MAT-251 型质谱仪测定,分析精度为±0.2‰,结果列于表 3。所测得的δ³⁴S_{V-CDT}值为-22.3‰~+11.7‰。

表 1 大东沟铅锌矿方解石中碳、氧同位素组成

Table 1 C and O isotopic composition of calcite from Dadonggou Pb-Zn ore deposit								
样号	矿物	产状	δ ¹³ C _{V-PDB} (‰)	δ ¹⁸ O _{V-PDB} (‰)	δ ¹⁸ O _{V-SMOW} (‰)	δ ¹⁸ O _水 (‰)	Th/℃	采用温度/℃
DDB-3	方解石	主成矿阶段	-2.9	-17.0	+13.3	+3.8	97~180(21)	200
DDB-2	方解石	主成矿阶段	+0.4	-16.0	+14.4	+7.5		260
ZK31-1-1	方解石	主成矿阶段	-1.8	-15.8	+14.6	+4.0		180
ZK31-2-1	方解石	主成矿阶段	-2.2	-15.9	+14.4	+3.2		170
PDB-10	方解石	硫化物石英脉	-4.2	-17.6	+12.8	+1.1		163
ZK7-3-1	方解石	硫化物石英脉	-2.6	-16.1	+14.2	+7.6	167~446(14)	267
ZK31-2-10(2)	方解石	后期方解石脉	-3.0	-28.9	+1.1	-8.4	141~330(27)	200
ZK27-1-1(2)	方解石	后期方解石脉	-3.4	-31.5	-1.7	-8.7		185
ZK31-2-5	方解石	后期方解石脉	-3.2	-28.0	+2.0	-8.2		185
ZK27-1-2(2)	方解石	后期方解石脉	-3.6	-31.6	-1.7	-10.7		210
ZK27-1-3(2)	方解石	围岩	-3.5	-32.3	-2.4	-11.4		210

注:表中均一温度一列中括号内数字为测试的包裹体个数。

表 2 大东沟铅锌矿石英中的 H,O 同位素组成

Table 2 H and O isotopic composition of quartz from Dadonggou Pb-Zn ore deposit

样号	矿物	产状	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}(\text{‰})$	Th(℃)	采用温度(℃)
ZK15-3-2	石英	主成矿期	-127	+15.1	+2.4	141~216(9)	190
ZK31-1-2	石英	主成矿期	-104	+12.8	-2.2	136~184(16)	159
DDB-5	石英	主成矿期	-103	+17.3	+4.5		190
PDB-3	石英	主成矿期	-109	+11.7	-1.1	78~367(22)	150
ZK31-2-14	石英	主成矿期	-101	+17.4	+6.5		260
DDB-6	石英	晚成矿期	-104	+15.3	+7.2		280
ZK31-1-3(1)	石英	晚成矿期	-112	+12.4	-2.2		170
ZK31-1-3(2)	石英	晚成矿期	-89	+13.4	-1.2		170
ZK7-3-4	石英	硫化物石英脉	-102	+15.2	+7.3	254~309(27)	287
DDB-8	石英	硫化物石英脉	-103	+15.0	+1.5	122~330(30)	183
PDB-11	石英	硫化物石英脉	-114	+13.2	+6.6	210~360(14)	311
PDB-6	石英	硫化物石英脉	-104	+16.1	+5.2	125~336(19)	209
PDB-10	石英	硫化物石英脉	-105	+14.6	-1.4	97~180(21)	163
PDB-9(1)	石英	硫化物石英脉	-111	+13.5	+3.6	223~241(9)	239
PDB-9(2)	石英	硫化物石英脉	-112	+14.2	+4.3		239
DDB-2	石英	石英方解石矿脉	-112	+15.1	+6.2		260
ZK31-2-11	石英	后期石英脉	-102	+12.7	+4.6		280
ZK31-1-1	石英	后期石英脉	-106	+13.6	+5.5		280

注:均一温度一列括号内的数字为测试的包裹体个数。

表 3 大东沟铅锌矿硫同位素组成

Table 3 S isotopic composition of Dadonggou Pb-Zn ore deposit

序号	样号	产状	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{‰})$
1	PDB-3	主成矿期	方铅矿	+3.8
2	PDB-4	主成矿期	方铅矿	+4.6
3	ZK31-1-2	主成矿期	方铅矿	-1.2
4	ZK15-3-1	主成矿期	方铅矿	+1.2
5	PDB-2	主成矿期	方铅矿	+5.0
6	ZK15-3-2	晚成矿期	方铅矿	+7.3
7	PDB-11	硫化物石英脉	方铅矿	+4.3
8	PDB-9	硫化物石英脉	方铅矿	+5.2
9	ZK31-1-2	主成矿期	闪锌矿	-1.2
10	PDB-4	主成矿期	闪锌矿	+4.8
11	PDB-7	主成矿期	闪锌矿	+1.2
12	PDB-3	主成矿期	闪锌矿	+2.0
13	ZK15-3-1	主成矿期	闪锌矿	+2.0
14	ZK31-2-7	晚成矿期	闪锌矿	-7.7
15	PDB-8	硫化物石英脉	闪锌矿	+7.5
16	ZK15-3-2	晚成矿期	闪锌矿	+6.2
17	ZK31-2-4	围岩	黄铁矿	-6.0
18	PDB-8	矿化围岩	黄铁矿	-12.1
19	ZK7-3-4	硫化物石英脉	黄铁矿	+9.5
20	DDB-10	围岩	黄铁矿	+5.1
21	DDB-11	围岩	黄铁矿	+1.1
22	DDB-4	围岩	黄铁矿	+7.9
23	DDB-3	围岩	黄铁矿	-7.8
24	ZK31-1-2	主成矿期	黄铁矿	+0.2
25	ZK15-3-2	晚成矿期	黄铁矿	+11.7
26	PDB-1	后期方解石脉	磁黄铁矿	-22.3
27	ZK31-2-6	围岩	磁黄铁矿	-10.7
28	ZK7-3-1	硫化物石英脉	毒砂	-17.2
29	DDB-7	地层	毒砂	-3.1

5 结论与讨论

5.1 成矿物质来源

由前面表 1 可知,大东沟铅锌矿床主要成矿阶段方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围为 $-2.9\text{‰} \sim +0.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 为 $+13.3\text{‰} \sim +14.6\text{‰}$,经计算所得的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 为 $+3.2\text{‰} \sim +7.5\text{‰}$,图 5 反应出其可能经历了低温蚀变;硫化物石英脉中少量方解石所测得的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-4.2\text{‰} \sim -2.6\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 为 $+12.8\text{‰} \sim +14.2\text{‰}$,计算所得的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 为 $+1.1\text{‰} \sim +7.6\text{‰}$;后期方解石脉及地层中方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围为 $-3.6\text{‰} \sim -3.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 为 $-2.4\text{‰} \sim +2.0\text{‰}$,计算所得的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 为 $-11.4\text{‰} \sim -8.2\text{‰}$,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值均落于海相成因碳酸盐的范围之内, $\delta^{18}\text{O}$ 偏低可能是受大气降水的影响。主成矿期方解石中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值及 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值相对于硫化物石英脉及后期方解石脉中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏高(见图 5),这 与 的 麦 兹 盆 地 的 情 况 有 所 不 同(图 5),据 王 书 来 等(2007)所测麦兹盆地铅锌矿化层中方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-6.7\text{‰} \sim -14.3\text{‰}$,不含矿方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $+0.6\text{‰} \sim -1.7\text{‰}$,块状矿石和厚大富矿体部位的方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 越高,而远离喷口的层状条带状矿石的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-8.9\text{‰} \sim -6.7\text{‰}$ 。王书来等(2007)认为其块状矿化方解石最大负值达 -14.3‰ ,说明可能混有有机碳。 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异说明大东沟铅锌矿和

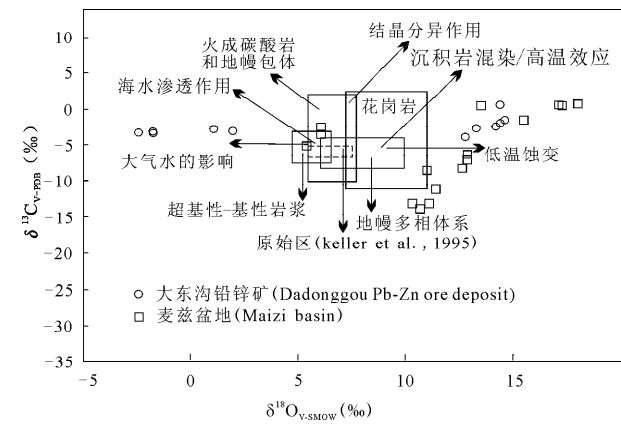


图 5 大东沟铅锌矿方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 图解
(底图据毛景文等, 2002)

Fig. 5 Diagram of $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ versus $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ of calcite in the Dadonggou Pb-Zn ore deposit (original figure after Mao et al., 2002)

麦兹盆地主要铅锌矿的成矿环境可能存在差异。从地质特征与矿化特征来看克兰盆地主要铅锌矿床与麦兹盆地相类似,但其成矿物质来源是否相同,则需要进一步做工作。

由表 2 可知,主成矿阶段石英的 δD 值为 $-101\text{‰} \sim -127\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $+11.7\text{‰} \sim +17.4\text{‰}$, 结合均一温度计算的相应 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-1.1\text{‰} \sim +6.5\text{‰}$, 说明在成矿过程中既有岩浆水又有大气降水的参与,总体向岩浆水方向飘移;晚成矿阶段石英的 δD 值为 $-89\text{‰} \sim -112\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $+12.4\text{‰} \sim +15.3\text{‰}$, 结合均一温度计算的相应的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-2.2\text{‰} \sim +7.2\text{‰}$;后期含矿石英脉及石英方解石脉 δD 值为 $-114\text{‰} \sim -102\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $+12.7\text{‰} \sim +16.1\text{‰}$, 相应的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-1.4\text{‰} \sim +7.3\text{‰}$ 。图 6 说明大气降水和岩浆水都有可能参与成矿。另外大东沟铅锌矿成矿的多阶段性说明其成矿流体可能具有多种来源。

由表 3 可知,大东沟矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值变化较大 ($+11.7\text{‰} \sim -22.3\text{‰}$), 与区域内其它同类型矿床——铁米尔特及阿巴宫铅锌矿 (王京彬等, 1998) 相比其 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值稍偏高 (见图 7); 与邻区麦兹盆地 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值 ($+5.1\text{‰} \sim -20.6\text{‰}$) 相近 (王书来等, 2007)。其中方铅矿及闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值分布范围相对集中,且基本为正值,主要分布于 $+4\text{‰} \sim +6\text{‰}$ (方铅矿与闪锌矿分别主要集中于 $+3.8\text{‰} \sim +5.0\text{‰}$, $+1.2\text{‰} \sim +6.2\text{‰}$), 说明其来源于上地幔或深部地壳。而黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 分布范围则较分散 ($-12.1\text{‰} \sim +11.7\text{‰}$), 这可能反映了黄铁矿形成

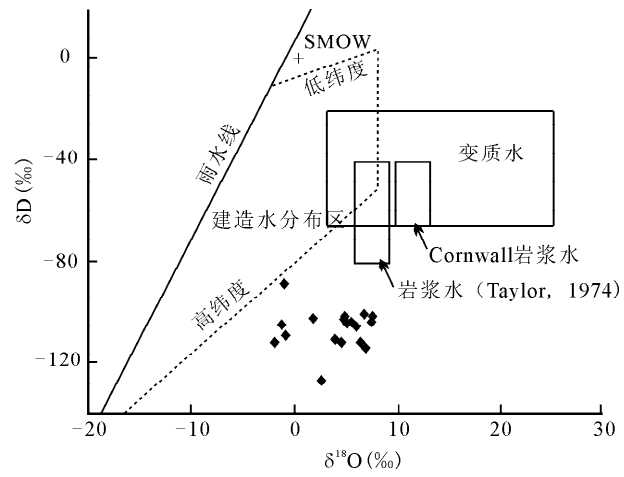


图 6 大东沟铅锌矿石英的 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解

Fig. 6 Diagram of δD versus $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ of quartz in the Dadonggou Pb-Zn ore deposit

的多阶段性。不同形态黄铁矿中以蠕虫状黄铁矿及呈条带状分布的立方体状黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值最大,主成矿阶段浸染状黄铁矿、团块状黄铁矿及石英方解石脉中的自形粒状黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值次之,晚成矿阶段呈条带状分布的浸染状黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值最大。这可能与硫的来源有关,同阶段形成的黄铁矿其 $\delta^{34}\text{S}$ 的高低则主要与形成温度有关,块状矿石形成于矿化热液喷口附近,温度较高;远离热液中心处的温度则相对较低;不含矿岩石中的黄铁矿的硫可能来源于温度更低的海水中的硫酸盐。磁黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值偏低,为 $-22.3\text{‰} \sim -10.7\text{‰}$, 可能为沉积成因来源。毒砂的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $-17.2\text{‰} \sim -3.1\text{‰}$ 。矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 分布范围广,变化大,与麦兹盆地 $\delta^{34}\text{S}$ 分布相类似,王书来等 (2007) 认为这种硫同位素分布特点反映了其热液流体的主要硫源可能为 H_2S , 表明铅锌矿在成矿过程中有大量细菌参与成矿。大东沟铅锌矿矿石中,尤其是块状富矿石,部分黄铁矿呈细条纹状、蠕虫状,其延长与层理一致可能也反映了这种沉积成因硫的存在,也有火山岩浆参与成矿,硫主要来源于火山岩浆及海水。

由以上硫和碳、氢、氧同位素组成特征,结合流体包裹体特点及相关参数,可以推断出大东沟铅锌矿硫和碳主要来源于火山岩浆及海水,成矿具有多期多阶段性,成矿流体以岩浆水和大气降水为主,海水也有一定程度的参与。

5.2 成矿机制初探

关于阿尔泰山南缘块状硫化物矿床的成因,廖启

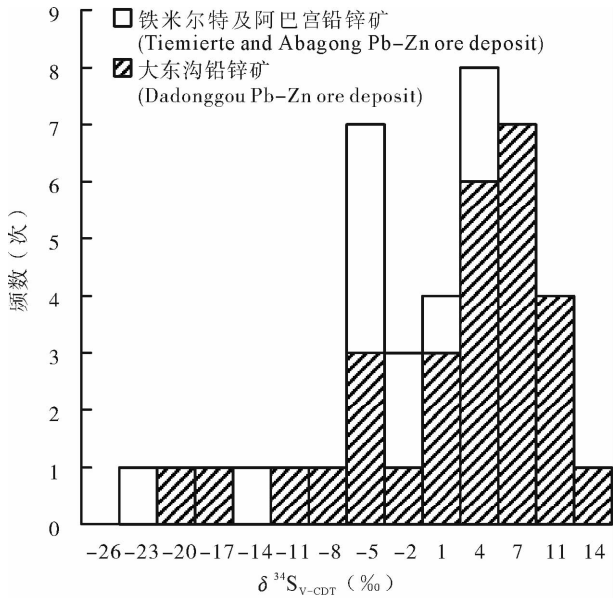


图 7 大东沟铅锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 图解

Fig. 7 Diagram of $\delta^{34}\text{S}$ distribution in Dadonggou Pb-Zn ore deposit

林等(2000)认为新疆阿尔泰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覆泥盆纪地层的水/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。于际民等(2000)认为伊比利亚型矿床的形成具有某种单一或均一的金属来源,热液主要由改造后的海水组成,细菌还原作用参与了矿体的形成并造成了矿体外带和内带的 $\delta^{34}\text{S}$ 值差异,矿体与沉积岩层有密切关系。

大东沟铅锌矿的形成与铁米尔特以及麦兹盆地主要铅锌矿可可塔勒等相似。泥盆纪岛弧环境下酸性火山喷发,并相间发生海相碳酸盐及泥砂质沉积,同时深部的含矿气液沿火山通道上升与火山物质同时沉积,金属阳离子与细菌还原海水硫酸盐,矿物质沉淀并初步富集,形成以沉积岩为容矿岩石的海底

喷气沉积铅锌矿床。火山活动晚期含矿热液沿断裂、裂隙上升,进入沉积洼地,铅锌等在高浓度高温卤水中以氯的金属络离子搬运,遇有地层中的硫化物时交代形成富矿石,或者遇到地层中富硫化氢的液体时形成富矿。泥盆纪末发生区域变质,地层形成褶皱,并产生一系列北西向断裂,主要分布于阿尔泰复式向斜两翼的断裂带,多次活动并伴有成矿作用。富含二氧化硅及少量铅、锌的高盐度卤水沿裂隙上升而沉淀成矿。在后期的变质中,矿体形态、矿石组构、矿石矿物成分等发生变化,从而最终形成喷流沉积叠加改造型铅锌矿体。

通过对大东沟铅锌矿地质特征及稳定同位素的研究,初步得出以下几点认识:

- (1) 大东沟铅锌矿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,矿体主要呈层状分布。围岩主要为变钙质砂岩与大理岩。
- (2) 矿体形成后经历了后期热液改造,矽卡岩化与矿化关系密切。
- (3) $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值分布范围广,变化大,反映了其热液流体的主要硫源可能为 H_2S ,在成矿过程中可能有大量细菌参与成矿。
- (4) 成矿流体可能主要为岩浆水与大气降水的混合物,成矿过程具有多阶段性。

致谢:新疆阿尔泰有色地质 706 队郭正林总工程师、童秀芝工程师、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万德芳研究员、罗续荣和陈伟十工程师等的悉心帮助和指导,一并致谢。

注 释

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

参 考 文 献

郭旭吉. 2004. 红墩铅锌矿床地质特征及成因. 新疆有色金属, 27(3): 12~17.

郭正林,郭旭吉,王书来,秦克章. 2007. 阿尔泰南缘麦兹泥盆纪火山-沉积盆地成矿特点及其铅、铁、金找矿潜力分析. 矿床地质, 26(1): 128~138.

姜俊. 2003. 铁米尔特多金属矿床地质特征及成因探讨. 新疆有色金属, 26(2): 2~5.

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. 西北地质, 38(3): 21~27.

廖启林,戴塔根,刘悟辉,邱冬生. 2000. 新疆阿尔泰南缘典型块状硫化物矿床成矿环境浅析. 地质与勘探, 36(6): 23~26.

李嘉兴,尹意求. 2006. 新疆克兰盆地红墩铅锌矿床与铁木尔特铅锌矿床的对比研究. 地质与勘探, 42(1): 7~11.

李景朝,王世称,杨毅恒. 2002. 阿尔泰成矿区大型、超大型矿床成矿规律综合信息研究. 吉林大学学报(地球科学版), 32(4):

353~357.

李思强. 2006a. 麦兹地区火山沉积岩型铅-锌矿床地质特征与找矿方向. 矿产与地质, 20(1): 27~31.

李思强, 马忠美, 郭旭吉. 2006b. 阿尔泰复向斜的成矿环境及其矿产. 矿产与地质, 20(2): 116~121.

李文渊. 2007. 块状硫化物矿床的类型、分布和形成环境. 地球科学与环境学报, 29(4): 331~343.

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. 地质找矿论丛, 21(3): 173~177.

刘忠孝. 2007. 阿尔泰山南缘克兰泥盆纪火山盆地构造演化与成矿. 新疆有色金属, 30(4): 9~17.

马忠美. 2001a. 麦兹矿田铅锌矿化演化特征与成矿. 矿产与地质, 81(15): 25~29.

马忠美, 仇银江, 郭旭吉. 2001b. 萨热阔布-铁米尔特矿区金铅锌成矿系列. 地质与勘探, 37(4): 23~26.

毛景文, 赫英, 丁悌平. 2002. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据. 矿床地质, 21(2): 121~127.

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. 有色金属矿产与勘查, 7(2): 65~74.

仇银江. 2005. 阿尔泰麦兹地区康布铁堡组含矿性及找矿方向. 新疆有色金属, (1): 7~10.

申茂德, 安银昌, 马忠美. 2003. 新疆阿尔泰山南缘克兰泥盆纪火山盆地构造演化与成矿. 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. 岩石学报, 22(1): 145~152.

王京彬, 秦克章, 吴志亮. 1998. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床. 北京: 地质出版社.

王少怀. 2006. 阿尔泰多金属成矿带矿床地质特征及其成矿历史演化. 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. 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. 地质与勘探, 43(6): 25~31.

杨富全, 毛景文, 郑建民, 徐林刚, 刘德权, 赵财胜, 叶会寿. 2006. 哈萨克斯坦阿尔泰巨型成矿带的地质特征和成矿模型. 地质学报, 80(7): 963~983.

闫新军, 陈维民. 2001. 铁米尔特-恰夏-萨热阔布多金属金矿床系列矿床地质地球化学研究. 矿产与地质, 15(5): 366~370.

尹意求, 李嘉兴, 郭旭吉. 2004. 新疆阿尔泰山南缘克兰盆地红墩 SEDEX 型铅锌矿. 矿产与地质, 18(5): 422~427.

尹意求, 李嘉兴, 郭旭吉. 2004. 新疆阿尔泰山南缘红墩 SEDEX 型铅锌矿的成矿模式. 南方国土资源, (11): 79~82.

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兰盆地沉积构造演化与铅锌成矿. 大地构造与成矿学, 29(4): 475~481.

于际民, 蒋少涌. 2000. 伊比利亚型——一种新类型块状硫化物矿床地质地球化学与成因. 地质找矿论丛, 15(3): 246~253.

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. 岩石学报, 22(5): 1387~1398.

Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. J. Geophys. Res., 77: 3057~3067.

O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T k. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. Chemical Physics, 51(12): 5547~5558.

Geology and Stable Isotope Geochemistry of the Dadonggou Pb-Zn Ore Deposit, Altay, Xinjiang, NW China

LIU Min¹⁾, ZHANG Zuoheng¹⁾, WANG Yongqiang²⁾, GUO Xuji²⁾
1) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037; 2) No. 706 Geological Party, Xinjiang Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals, Aletai, Xinjiang, 836500

Abstract

Based on detailed description of the geological features of the Dadonggou Pb-Zn ore deposit, this paper systematically studied C, H, O and S isotopic compositions of the deposit. The orebody occurs in layers with the same trending as the strata. Ore bearing country rock is mainly volcanic sedimentary rock of the lower Devonian Kangbutiebu Formation and ore occurs in banded, disseminated and veinlet. Ore minerals consist simply of galena, sphalerite and pyrite, with zinc content relatively higher than that of lead. Wall-rock alteration is well developed, and skarnization was closely related to Pb-Zn mineralization. According to the C, H, O and S isotopic composition of the ore, the $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values of sulfides range from -22.3‰ to $+11.7\text{‰}$, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ values of calcite range from -4.2‰ to $+0.4\text{‰}$, the $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values of quartz and calcite range from -11.4‰ to $+7.6\text{‰}$. It is suggested that the ore-forming fluid was mainly derived from mixture fluid of meteoric water with magma water. Combined with regional geological data, the ore deposit is considered to be formed in the intermittent period of volcanic-activities, and controlled by NW-trending faults, volcanic-sedimentary basins and hydrothermal fluid, and the deposit belong to a volcanic-sedimentary hosted massive sulfide deposit. The ore deposit was subject to regional metamorphism and hydrothermal fluid alteration.

Key words: Dadonggou Pb-Zn ore deposit; geology; stable isotopic; metallogenic mechanism; Altay

