

# 阿尔泰大东沟铅锌矿的碳质流体及其成因

褚海霞<sup>1</sup>, 徐九华<sup>1</sup>, 林龙华<sup>1</sup>, 卫晓锋<sup>1</sup>, 王琳琳<sup>1</sup>, 陈栋梁<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 资源工程系, 北京 100083; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049)

**摘要:** 大东沟铅锌矿是阿尔泰南缘泥盆纪克朗火山-沉积盆地的块状硫化物矿床之一, 在石炭—二叠纪同造山的区域变质过程中, 受到热液叠加改造作用, 层状铅锌矿体发育脉状石英和矿化。本文对阿勒泰大东沟铅锌矿区石英脉中的包裹体进行了详细的岩相学和显微测温研究, 估算出包裹体形成时的物理化学条件, 并采用激光拉曼、同步辐射 X 射线荧光(SRXRF)对流体包裹体进行了成分测试。结果显示, 石英脉中的包裹体主要为碳质流体包裹体, 多以面状、带状分布, 最低捕获温度在 209~459℃ 之间, 密度为 0.75~1.15 g/cm<sup>3</sup>, 最低捕获压力在 110~540 MPa 之间。初步研究表明碳质流体的来源与同造山的变质作用有关, 而与海底喷流沉积无关。激光拉曼测试结果表明包裹体气液主要成分为 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>。SRXRF 测试碳质包裹体中金属微量元素显示低 Cu、Zn、Pb, 而富集 Au。

**关键词:** 碳质流体包裹体; 大东沟铅锌矿; 阿尔泰; 变质

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)02-0175-14

## Carbonic fluid of the Dadonggou lead-zinc ore deposit in Altay and its genesis

CHU Hai-xia<sup>1</sup>, XU Jiu-hua<sup>1</sup>, LIN Long-hua<sup>1</sup>, WEI Xiao-feng<sup>1</sup>, WANG Lin-lin<sup>1</sup>  
and CHEN Dong-liang<sup>2</sup>

(1. Resource Engineering Department, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

2. Laboratory of SR-XRF, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Dadonggou lead-zinc ore deposit is one of the massive sulfide deposits in the Devonian Kelan volcanic-sedimentary basin on the southern margin of the Altay Mountains. Controlled by regional Abagong-Kurti fault, the ore bodies occur in layers in the second lithologic unit of Upper Kangbutiebao Formation which consists of calcareous sandstones, biotite schists and chlorite schists. The ore minerals are sphalerite, galena and pyrite assuming massive, disseminated, banded and veinlet forms. During the regional tectonic-hydrothermal metamorphism of Carboniferous-Permian orogeny, this ore deposit experienced hydrothermal transformation, resulting in the development of veinlike quartz and mineralization. Two metallogenic stages can be identified: the first was the marine volcanic sedimentary stage, and the second was the metamorphic hydrothermal stage. There are two periods of quartz veins formed at the metamorphic hydrothermal stage: the earlier white-gray pyrite quartz veins (Q<sub>1</sub>) occur in layers and the late polymetallic sulfide quartz veins (Q<sub>2</sub>) cut the strata. By means of lithofacies observation and microthermometry, the authors carried out a detailed study of the fluid inclusions hosted by the quartz veins of the metamorphic hydrothermal stage. Combined with the preliminary findings, the

收稿日期: 2009-10-09; 修订日期: 2009-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672060; 40972066); 国家科技支撑计划资助项目(新疆 305 项目 2007BAB25B01); 中国科学院高能物理研究所北京正负电子对撞机国家实验室课题(VT-08030)

作者简介: 褚海霞(1984-), 女, 汉族, 在读硕士研究生, 岩石学、矿物学、矿床学专业, E-mail: chuhaixia031188@163.com; 通讯作者: 徐九华(1951-), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, E-mail: jiuhuaxu@ces.ustb.edu.cn

authors estimated the physical and chemical conditions. Laser Raman and synchronic radiation X-ray fluorescence (SRXRF) were also used to analyze elements in the fluid inclusions. It is shown that the inclusions in the quartz veins are mainly carbonic fluid inclusions ( $\text{CO}_2\text{-N}_2 \pm \text{CH}_4$ ) 4~37  $\mu\text{m}$  in size, mostly assuming planar and ribbon distribution. There are also minor amounts of  $\text{H}_2\text{O-CO}_2$  fluid inclusions associated with carbonic fluid inclusions. The experiment results of carbonic fluid inclusions show that  $t_{\text{m,CO}_2}$  (solid  $\text{CO}_2$  melting temperatures) are  $-82.5 \sim -59.4^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{h,CO}_2}$  (homogenization temperatures) are  $-40.2 \sim 20.3^\circ\text{C}$ , and the lowest trapping temperatures are  $209 \sim 459^\circ\text{C}$ , that the densities range from 0.75 to 1.15  $\text{g/cm}^3$ , and that the estimated pressures are concentrated in the range of 110~540 MPa. The tests indicate that the gas and liquid ingredients in carbonic fluid inclusions mainly consist of  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2$ , and the minor elements are low in Cu, Zn, Pb but rich in Au. The environment for the formation of the carbonic fluid inclusions was basically consistent with the regional conditions of the orogenic belt, especially the biotite metamorphic belt. The tentative research suggests that the carbonic fluid inclusions were probably related to synorogenic metamorphism but had nothing to do with the submarine exhalation. The carbonates widely distributed in Lower Devonian Kangbutiebao Formation in the Kelan basin might have provided the main carbon sources for carbonic fluid inclusions.

**Key words:** carbonic fluid inclusions; Dadonggou lead-zinc ore deposit; Altay; metamorphism

大东沟铅锌矿位于克朗盆地北西段。该盆地为阿尔泰山南缘晚古生代大陆边缘中最大的火山-沉积盆地,在泥盆纪早期火山活动间歇期,形成了铁木尔特、恰夏、阿巴宫、大东沟等火山沉积型多金属矿床(焦学军等,2005);在晚泥盆世以后的造山、区域变质过程中,盆地内早期形成的金属矿床更趋富集,同时还形成了一些以萨热阔布金矿为典型代表的剪切带型金矿。从赋矿层位、断裂构造、岩浆活动以及已知的有代表性的矿产等方面来看,大东沟铅锌矿有很大的找矿潜力,但是该矿床的基础研究非常薄弱。焦学军等(2005)、李思强等(2006)对该矿床的地质特征进行了简单介绍,认为属于层控型铅锌矿床。刘敏等(2008,2009)认为大东沟铅锌矿床为喷流沉积成因,但在成矿阶段的划分上存在矛盾,并认为砂卡岩化与铅、锌矿化关系最密切,流体包裹体主要类型为  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  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,成矿流体主要为岩浆水与大气降水的混合物。但是笔者在研究中却发现,大东沟铅锌矿石英脉中发育大量碳质流体( $\text{CO}_2\text{-N}_2 \pm \text{CH}_4$ )包裹体(Vanden Kerkhof and Thiery, 2001)。近年来,碳质流体包裹体( $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ )不仅在该区造山型萨热阔布金矿的研究中被大量发现(Xu *et al.*, 2005),而且在区内铁木尔特 VMS 铅锌矿的晚期黄铜矿石英脉中同样存在(王琳琳等,2008;徐九华等,2008)。因此有必要对大东沟碳质流体包裹体进行详细研究,这不仅有助于研究大东沟铅锌矿的成因,也有益于对比区域内碳质流体与造山-变质、以及与成矿的关系。

## 1 地质概况

### 1.1 区域地质背景

阿尔泰山南缘分布一系列晚古生代火山-沉积盆地,由西向东主要有阿舍勒、冲乎尔、克朗、麦兹等,蕴藏着丰富的 Cu、Pb、Zn、Au、Ag、Fe 等矿产。克朗火山-沉积盆地是阿尔泰山南缘最大的火山-沉积盆地,早泥盆世火山活动强烈,以中酸性-酸性为主,为流纹质、英安质火山喷发沉积和溢流为主,形成火山碎屑岩及熔岩等(李思强等,2006)。

克朗火山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。康布铁堡组为一套海相酸性火山-沉积建造,可细分为上、下两个亚组(尹意求等,2005)。其中康布铁堡组上亚组( $D_{1k_2}$ )与上覆地层阿勒泰镇组( $D_{2a}$ )整合接触,厚度 1 850~3 000 m,从下至上依次可进一步划分为 3 个岩性段。第 2 岩性段与大东沟-铁木尔特铅锌矿密切相关,该岩性段中部为浅变质陆源碎屑泥质-碳酸盐沉积,形成于火山间隙期,主要岩性为黑云片岩、绿泥片岩、变钙质砂岩、变晶屑凝灰岩和大理岩等(申茂德等,2003;刘忠孝,2007)。康布铁堡组和阿勒泰镇组中的火山岩都遭受了强烈的区域变质作用,主要为区域动力热流变质作用(365~280 Ma),该期变质作用峰期温度 580~670 $^\circ\text{C}$ ,压力 0.4~0.5 GPa,形成了以中温、中-低压变质作用为主的递增变质带(徐学纯等,2005)。康布铁堡组火山-沉积岩是北疆

重要的块状硫化物含矿层位之一,铁木尔特、可可塔拉等大中型矿床均赋存其中(叶庆同等,1998)。柴凤梅等(2008)最近应用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法测得克朗盆地内阿巴宫铁矿区康布铁堡组地层中变质流纹岩的形成年龄为  $412 \pm 3.5$  Ma,属早泥盆世。

阿尔泰地区的区域性断裂构造以 NW 向为特征

(图 1),决定着阿尔泰地区构造格局的基本特点(杨新岳,1990)。其中,克因宫大断裂和阿巴宫大断裂是克朗盆地重要的早泥盆世生长断层和火山活动通道,在海底酸性火山喷发活动之后,又控制了火山期后的热水沉积成矿作用与铅锌含矿岩系的空间展布(焦学军等,2005)。

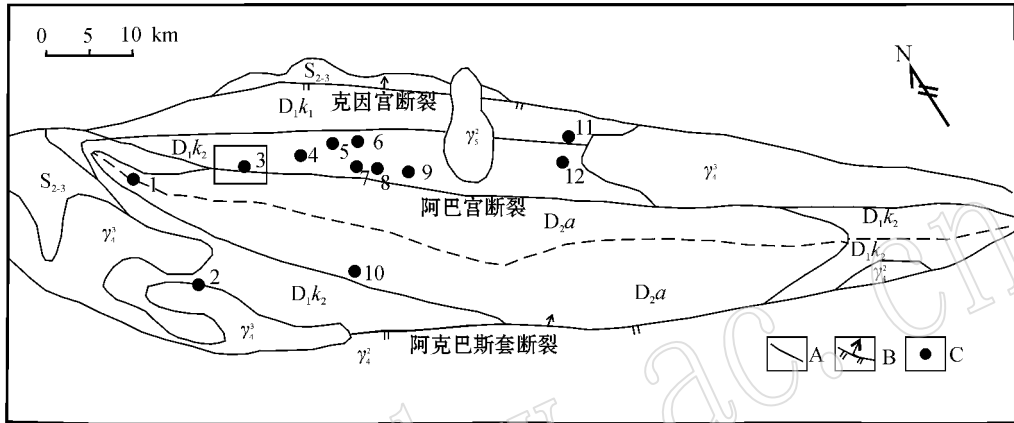


图 1 阿尔泰克朗盆地构造地质简图[据申茂德等(2003)、刘忠孝(2007)修绘]

Fig. 1 Sketch geological map of Kelang basin in Altay (after Shen Maode *et al.*, 2003; Liu Zhongxiao, 2007)

$D_{2a}$ —泥盆系中统阿勒泰镇组;  $D_{1k_2}$ —泥盆系下统康布铁堡组上亚组;  $D_{1k_1}$ —泥盆系下统康布铁堡组下亚组;  $S_{2,3}$ —志留系中上统库鲁姆提群;  $\gamma_1$ —海西中期花岗岩;  $\gamma_2$ —海西晚期斜长花岗岩、黑云母斜长花岗岩;  $\gamma_3$ —燕山期白云母斜长花岗岩; A—地层界线; B—断裂; C—矿床点: 1—莫尤勒铈铜矿点; 2—蒙块铜矿; 3—大东沟铅锌矿; 4—乌拉斯沟铅锌矿; 5—红岭金铜矿; 6—恰夏铜矿; 7—萨热阔布金矿; 8—铁木尔特 27 号铅锌矿; 9—铁木尔特 1 号铅锌矿; 10—红墩铅锌矿; 11—阿巴宫铅锌矿; 12—阿巴宫铁矿  
 $D_{2a}$ —Middle Devonian Altay Formation;  $D_{1k_2}$ —Lower Devonian Upper Kangbutiebao Formation;  $D_{1k_1}$ —Lower Devonian Lower Kangbutiebao Formation;  $S_{2,3}$ —Middle-Upper Silurian Kulumuti Group;  $\gamma_1$ —Middle Hercynian granite;  $\gamma_2$ —Late Hercynian plagioclase granite and biotite plagioclase granite;  $\gamma_3$ —Yanshanian muscovite plagiogranite; A—geological boundary; B—fault; C—ore deposits or spots: 1—Moyoule copper ore spot; 2—Mengkuai copper ore deposit; 3—Dadonggou lead-zinc ore deposit; 4—Wulasigou lead-zinc ore deposit; 5—Hongling gold-copper ore deposit; 6—Qiaxia copper ore deposit; 7—Sarekuobu gold ore deposit; 8—No. 27 lead-zinc ore body in Tiemuerte; 9—No. 1 lead-zinc ore body in Tiemuerte; 10—Hongdun lead-zinc ore deposit; 11—Abagong lead-zinc ore deposit; 12—Abagong iron ore deposit

## 1.2 矿床地质概况

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  $88^{\circ}06' \sim 88^{\circ}08'$ ,北纬  $47^{\circ}56' \sim 47^{\circ}58'$ 。矿区 SE-NW 长度为 1 250 m,宽度为 100~200 m。目前共见 5 个矿体,其铅和锌的平均品位在 1.3%~4.5% 之间,估算铅和锌储量为 15 万吨(李思强等,2006;刘敏等,2008)。

大东沟铅锌矿矿区的主要构造为大东沟背斜、大东沟向斜和阿巴宫断裂。含矿层位为分布于大东沟背斜两翼的康布铁堡组上亚组第 2 岩性段,矿体受其中变钙质砂岩层位的控制,呈层状、似层状、透镜状分布(图 2)。矿体走向  $280^{\circ} \sim 320^{\circ}$ ,倾向  $39^{\circ} \sim 48^{\circ}$ ,倾角  $75^{\circ} \sim 85^{\circ}$ ,矿体一般长 100~600 m,厚 2~

12 m,垂直深度 35~590 m(刘敏等,2008)。

矿石类型主要有块状、条带状、网脉状铅锌矿,浸染状黄铁矿等。根据野外矿化蚀变特征及石英脉体的穿插关系,结合室内显微镜下观察,可识别出 2 个成矿期:

(1) 海相火山热液成矿期(VMS 期),表现为浸染状、条带状和块状产出的闪锌矿-方铅矿等硫化物,常见变形的层状铅锌矿和绿泥片岩相间沿构造片理方向分布(图 3a, b),有时被揉皱状黄铁矿-石英脉穿切交代,镜下常见黑云母、白云母、绿泥石等变质矿物交代浸染状、条带状分布的闪锌矿-方铅矿,说明这些硫化物是变质作用前形成的[图 4, 本文所有矿物缩写符号参考沈其韩(2009)];

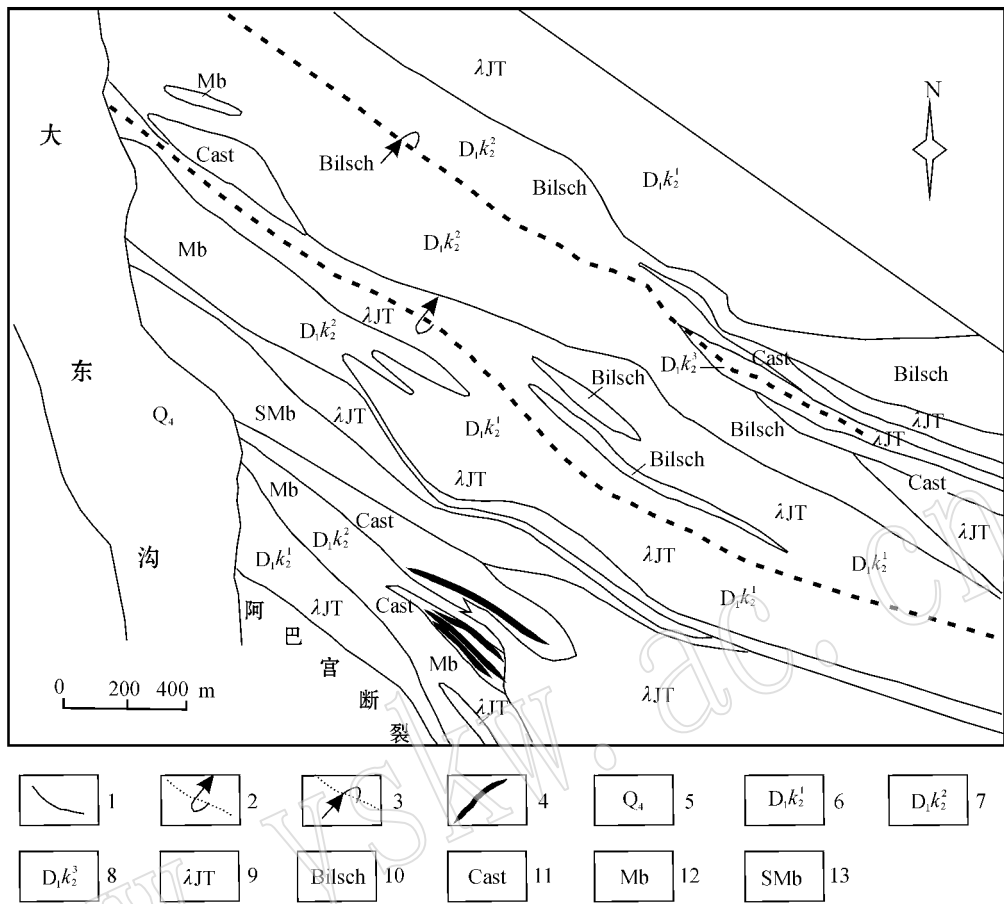


图 2 大东沟铅锌矿地质略图(据刘敏等, 2008 修绘)

Fig. 2 Geological map of the Dadonggou lead-zinc ore deposit (modified after Liu Min *et al.*, 2008)

- 1—地质界线; 2—倒转背斜; 3—倒转向斜; 4—铅锌矿体; 5—第四系; 6—康布铁堡组上亚组第 1 岩性段; 7—康布铁堡组上亚组第 2 岩性段; 8—康布铁堡组上亚组第 3 岩性段; 9—变晶屑凝灰岩; 10—黑云母绿泥片岩; 11—变钙质砂岩; 12—大理岩; 13—不纯大理岩
- 1—geological boundary; 2—overturned anticline; 3—overturned synclines; 4—lead-zinc ore body; 5—Quaternary; 6—1<sup>st</sup> Member of Upper Subformation of Kangbutiebao Formation; 7—2<sup>nd</sup> Member of Upper Subformation of Kangbutiebao Formation; 8—3<sup>rd</sup> Member of Upper Subformation of Kangbutiebao Formation; 9—meta-crystal tuff; 10—biotite-chlorite schist; 11—metacalcareous sandstone; 12—marble; 13—impure marble

(2) 变质热液成矿期, 又可分为 2 个阶段: 较早期的白色-灰白色黄铁石英脉 ( $Q_1$ ), 呈脉状沿片理方向顺层分布于绿泥片岩、黑云片岩中, 属于同构造变质产物; 较晚期的多金属硫化物石英脉 ( $Q_2$ ), 呈透镜状或以一定角度斜切钙质砂岩、绿泥片岩 (图 3c, d, e), 矿石多呈网脉状, 与更晚的区域动力热流变质作用有关。

## 2 碳质流体包裹体岩相学和显微测温

### 2.1 岩相学观察

大东沟铅锌矿变质热液成矿期石英中的碳质包

裹体 ( $L_{CO_2}$  或  $L_{CO_2-V_{N_2}}$  或  $L_{CO_2-V_{CH_4}}$ ) 大量发育, 包裹体多为椭圆形, 呈带状或线状分布, 少量孤立分布。选取顺层和切层石英脉中个体较大, 清晰度好的进行研究。

(1) 顺层石英脉  $Q_1$  中的包裹体。可能因为顺层石英脉内原生包裹体破坏严重, 仅见呈带状分布的次生包裹体 (图 5d)。类型以碳质包裹体为主, 大小  $6.6 \sim 25.3 \mu m$ , 可见少量与之共生的含  $CO_2$  两相包裹体  $L_{H_2O-L_{CO_2}}$  (以液相  $H_2O$  为主, 含少量液相  $CO_2$  的包裹体) 或  $L_{H_2O-V_{CO_2}}$  (以液相  $H_2O$  为主, 含少量气相  $CO_2$  的包裹体) 大小  $5.3 \sim 13.1 \mu m$ 。

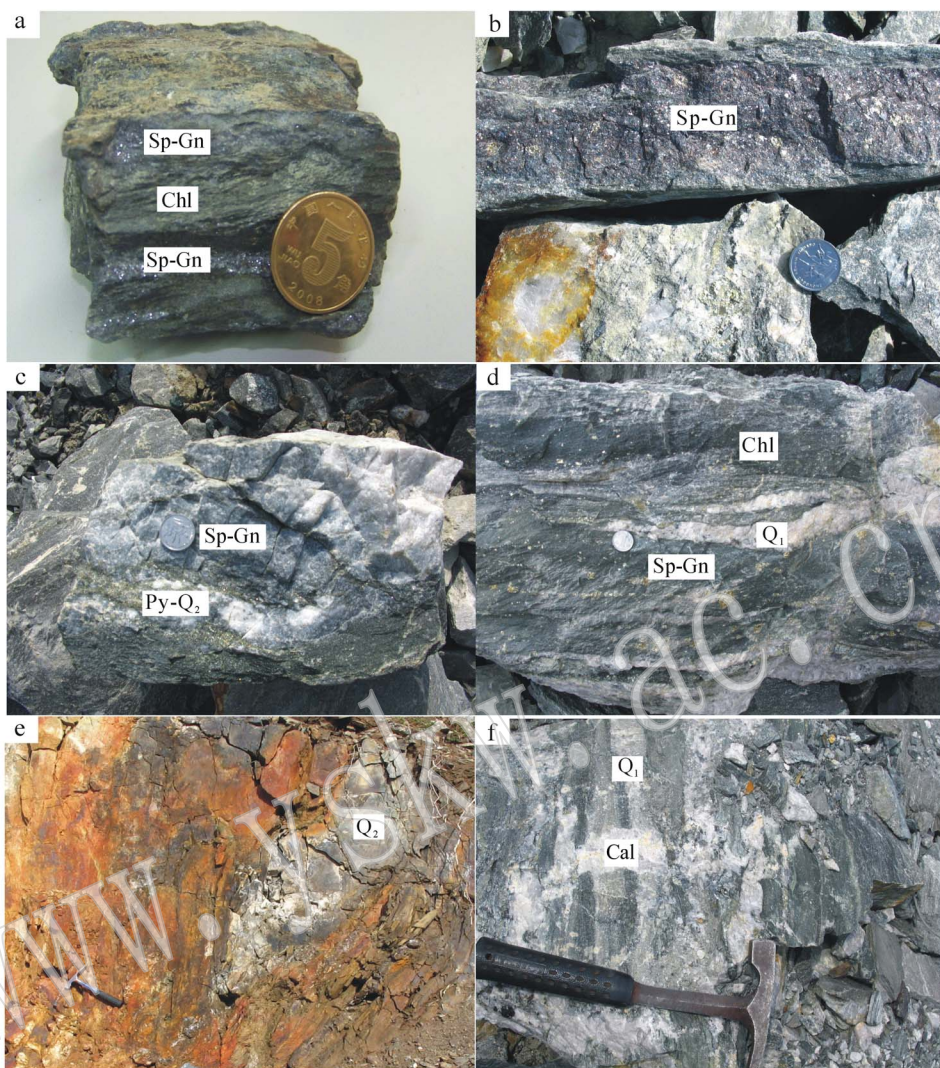


图3 大东沟铅锌矿野外露头及手标本特征

Fig. 3 Characteristics of outcrops and hand specimens of the Dadonggou ore deposit

a—与绿泥片岩(Chl)相间的条带状闪锌矿-方铅矿(Sp-Gn), 标本 DD-35; b—绿泥片岩中稠密浸染状闪锌矿-方铅矿脉(Sp-Gn), 大东沟 1 140 m; c—斜切层状闪锌矿-方铅矿(Sp-Gn)的黄铁矿石英脉(Py-Q<sub>2</sub>), 标本 DD-25, 大东沟 1 140 m; d—黑云角闪片岩中小角度产出的石英脉(Q<sub>1</sub>), 大东沟 1 140 m; e—钙质砂岩中透镜状的石英脉(Q<sub>2</sub>), 标本 DD-2、DD-3、DD-4、DD-5, 大东沟 1 180 m; f—切割顺层石英脉(Q<sub>1</sub>)的晚期方解石脉(Cal), 大东沟 1 140 m

a—sphalerite and galena, interlayered with chlorite schists, sample DD-35; b—densely disseminated sphalerite-galena vein in chlorite schists, at 1 140 m of Dadonggou; c—layered sphalerite cut by pyrite-quartz vein at 1 140 m of Dadonggou, DD-25 sampling location; d—quartz vein occurring at small angles in biotite-amphibolite schists, at 1 140 m of Dadonggou; e—quartz vein occurring as lentoids in calcareous sandstone, at 1 180 m of Dadonggou, DD-2, DD-3, DD-4, DD-5 sampling locations; f—layered quartz vein cut by late calcite vein, at 1 140 m of Dadonggou

(2) 切层石英脉 Q<sub>2</sub> 的包裹体。室温下以碳质包裹体为主, 还有少量与碳质包裹体共生的含 CO<sub>2</sub> 两相包裹体 L<sub>CO<sub>2</sub></sub>-L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>(以液相 CO<sub>2</sub> 为主, 含少量液相 H<sub>2</sub>O 的包裹体)、L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>-L<sub>CO<sub>2</sub></sub> 或 L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>-V<sub>CO<sub>2</sub></sub>。从产状上看: 孤立产出的原生包裹体数量不太多, 主要由碳质和少量 L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>-L<sub>CO<sub>2</sub></sub> 型组成, 包裹体杂乱分布, 为变质热液石英脉形成时捕获的原生包裹体(图 5a)。其中

碳质包裹体大小 5.4~14.3 μm, L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>-L<sub>CO<sub>2</sub></sub> 包裹体大小 6.1~27.8 μm; 愈合裂隙中线状(带状)排列的次生包裹体广泛发育, 主要为碳质包裹体, 大小 4~37 μm, 常呈群体分布。包裹体有的位于石英颗粒边界, 有的穿透石英颗粒边界(穿透性包裹体), 属于次生包裹体, 反映了更晚的区域动力热流变质作用。初步研究表明, 石英脉中与石英延长方向近于垂直

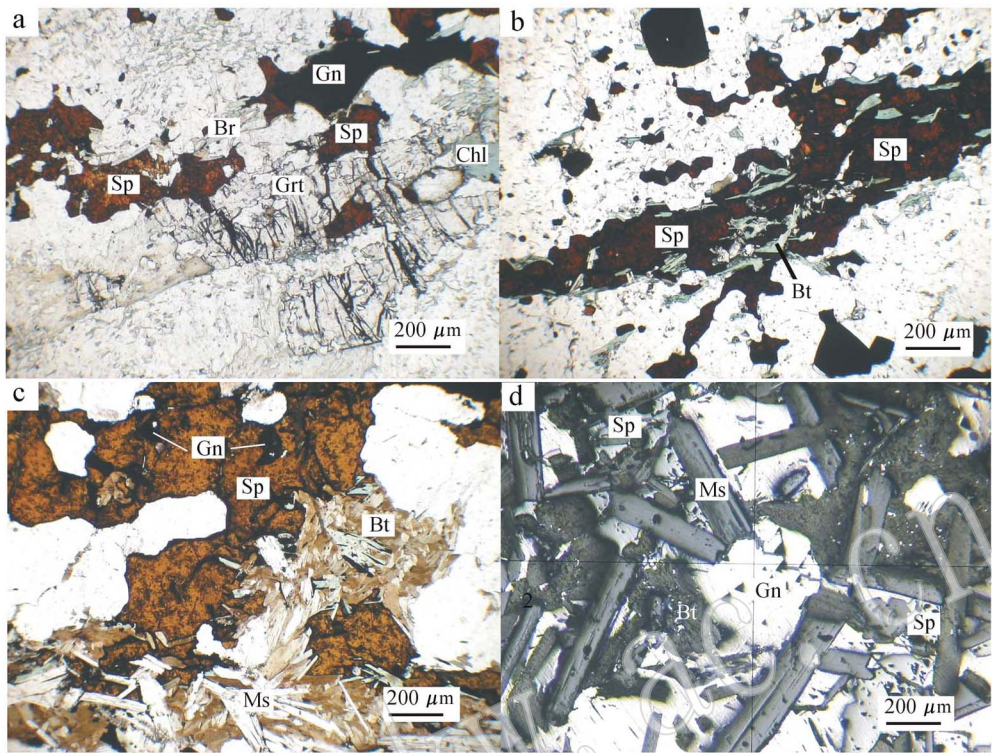


图4 大东沟铅锌矿的矿石显微特征

Fig. 4 Microstructure of ores in the Dadonggou ore deposit

a—沿片理分布的闪锌矿(深色, Sp)-方铅矿(黑色, Gn)被黑云母(Bt)、绿泥石(Chl)和石榴子石(Grt)交代, 标本 DD-24, 透射光(-); b—脉状闪锌矿(Sp)沿片理分布于变钙质粉砂岩, 被绿色黑云母(Bt)交代, 标本 DD-15, 透射光(-); c—沿片理分布的闪锌矿(浅色, Sp)-方铅矿(黑色, Gn)被白云母(条状, Ms)-黑云母(鳞片状, Bt)交代, 标本 DD-33, 透射光(-); d—沿片理方向分布的浅色闪锌矿(灰白色, Sp)-方铅矿(亮白色, Gn)被白云母(粗晶, Ms)-黑云母(鳞片状, Bt)交代, 标本 DD-33, 反射光

a—layered sphalerite (dark)-galena (black) cut by biotite, chlorite and garnet, sample DD-24, transmitted light (-); b—sphalerite (dark) vein distributed along the schistosity of metacareous siltstone and cut by green biotite, sample DD-15, transmitted light (-); c—sphalerite (light)-galena (black) cut by muscovite (stripe-shaped)-biotite (flake-shaped), sample DD-33, transmitted light (-); d—sphalerite (gray white)-galena (bright white) parallel to the schistosity, replaced by muscovite (coarse grains)-biotite (flake-shaped), sample DD-33, reflected light

的碳质包裹体的展布方向与晚石炭—二叠纪区域主压应力的NW-SW方向一致(图4b, c, e)。镜下还可见少量 $L_{H_2O}-L_{CO_2}$ 型和 $L_{CO_2}-L_{H_2O}$ 型包裹体与碳质包裹体伴生(图5f)。

## 2.2 显微测温

显微测温实验在北京科技大学包裹体实验室进行, 实验所用的冷热台型号为 Linkam 公司的 THMSG600, 采用液氮冷却, 电炉丝加热, 测试过程用 Linksys 软件控制, 测温范围为 $-196 \sim +600^\circ\text{C}$ , 冷冻和加热数据的测温精度分别为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 和 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 。结果见图6和表1。

(1) 顺层石英脉。对次生包裹体中29个碳质包裹体进行冷冻实验,  $t_{m, CO_2}$  ( $CO_2$ 三相点温度) =  $-82.5 \sim -62.9^\circ\text{C}$ ,  $t_{h, CO_2}$  ( $CO_2$ 部分均一温度) =  $-$

$29.2 \sim 12.0^\circ\text{C}$ ; 6个共生的 $L_{H_2O}-L_{CO_2}$ 型包裹体均一温度范围  $t_{h, total}$  ( $CO_2$ 与 $H_2O$ 最终均一温度) =  $309 \sim 408^\circ\text{C}$ ;

(2) 切层石英脉。原生包裹体: $L_{H_2O}-L_{CO_2}$ 型(27个),  $t_{h, total} = 209 \sim 450^\circ\text{C}$ ; 碳质包裹体(18个),  $t_{m, CO_2} = -64.5 \sim -59.4^\circ\text{C}$ ,  $t_{h, CO_2} = -13.4 \sim +18.6^\circ\text{C}$ 。次生包裹体: 碳质包裹体(118个),  $t_{m, CO_2} = -70.6 \sim -59.5^\circ\text{C}$ ,  $t_{h, CO_2} = -40.2 \sim +20.3^\circ\text{C}$ ;  $L_{H_2O}-L_{CO_2}$ 型(11个),  $t_{h, total} = 290 \sim 430^\circ\text{C}$ ;  $L_{CO_2}-L_{H_2O}$ 型(6个),  $t_{m, CO_2} = -67.7 \sim -61.9^\circ\text{C}$ ,  $t_{h, CO_2} = -6.2 \sim +18.2^\circ\text{C}$ 。

## 2.3 流体密度和压力估算

显微测温结果显示, 大东沟铅锌矿中顺层石英

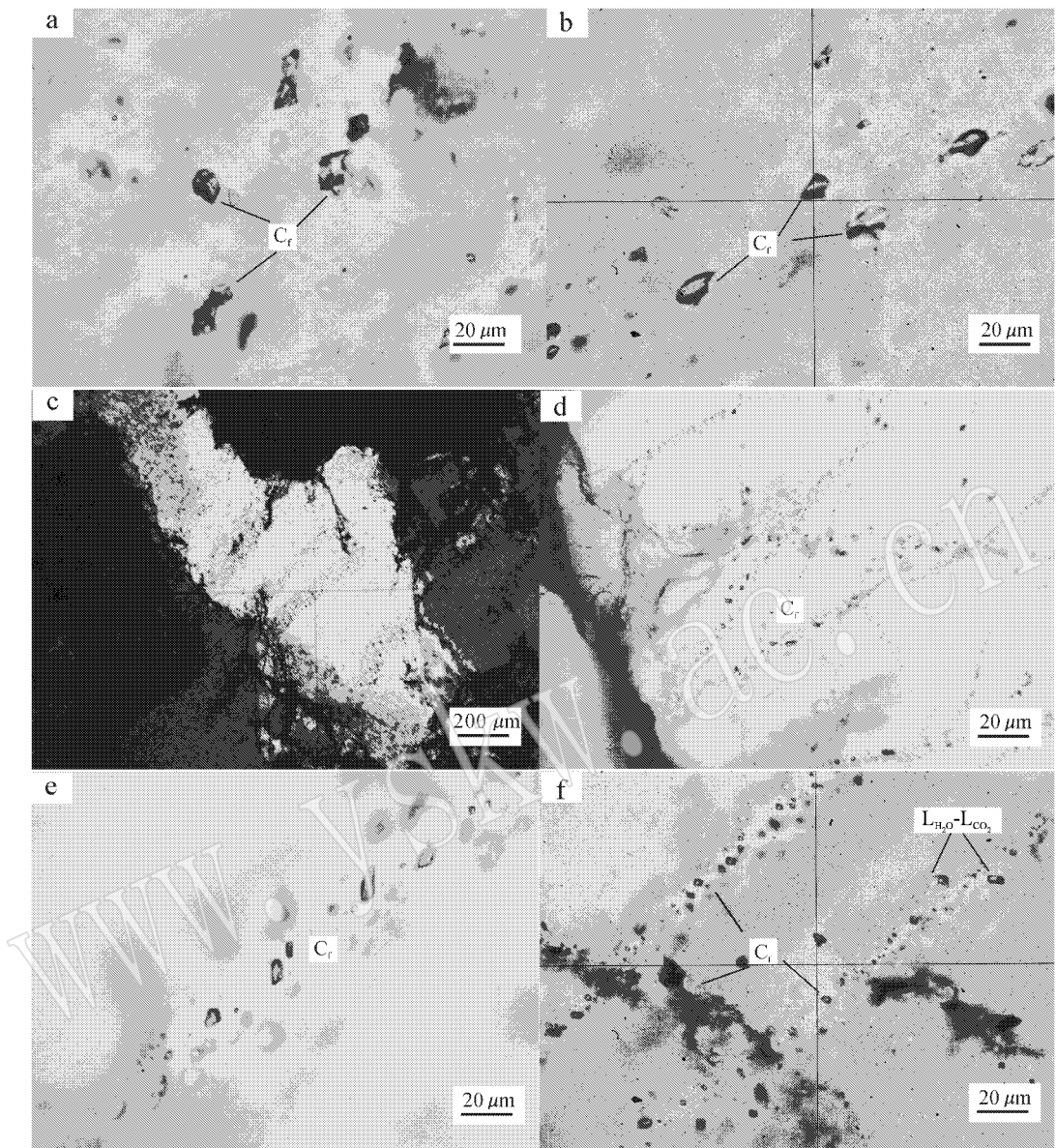


图 5 大东沟铅锌矿碳质流体包裹体岩相特征

Fig. 5 Characteristics of carbonic fluid inclusions in the Dadonggou ore deposit

a—石英脉中孤立分布的原生碳质包裹体( $C_f$ ), 标本 DD-28; b—石英颗粒内的带状碳质包裹体( $C_f$ ), 标本 DD-4; c—石英中穿透性碳质包裹体( $C_f$ ), 与石英延长方向近于垂直, 标本 DD-2; d—在石英颗粒边界树枝状分布的碳质包裹体( $C_f$ ), 标本 DD-34; e—照片 c 中心放大, 标本 DD-2; f—石英大颗粒中的 2 组碳质包裹体( $C_f$ ), 可见与之共生的  $L_{H_2O}-L_{CO_2}$  包裹体, 标本 DD-4

a—single carbonic fluid inclusions in quartz vein, sample DD-29; b—carbonic fluid inclusions in quartz grain, distributed as ribbons, sample DD-4; c—penetrating carbonic fluid inclusions in quartz, with the distribution direction of the fluid inclusions nearly vertical to the extending direction of quartz grain, sample DD-2; d—carbonic fluid inclusions in quartz grain, distributed as branches, sample DD-34; e—magnification of the center of Photo c, sample DD-2; f—two groups of carbonic fluid inclusions in association with some  $L_{H_2O}-L_{CO_2}$  fluid inclusions in a big quartz grain, sample DD-4

DD-4

脉中与线状碳质包裹体共生的两相包裹体  $t_{h, total}$  集中在  $309 \sim 408^\circ\text{C}$  之间。切层石英脉中孤立产出的原生两相  $H_2O-CO_2$  包裹体  $t_{h, total}$  集中在  $209 \sim 459^\circ\text{C}$  之间, 与线状碳质包裹体共生的  $H_2O-CO_2$  包裹体  $t_{h, total}$  范围集中在  $267 \sim 430^\circ\text{C}$  之间。这些均一温度

代表了碳质包裹体的最低捕获温度。

确定了碳质包裹体中  $CO_2$  的部分均一方式和均一温度后, 可根据部分均一温度和相密度关系图解 (据 Shepherd *et al.*, 1985) 计算出  $CO_2$  相密度。其中顺层石英脉中带状产出的次生包裹体  $CO_2$  相密度

表1 大东沟石英脉流体包裹体显微测温结果记录

Table 1 Microthermometric analyses of fluid inclusions in quartz vein from the Dadonggou deposit

标本号	采样位置	标本出特征	类型	孤立分布的原生包裹体				带状分布的次生包裹体			
				大小/ $\mu\text{m}$	$t_{\text{m},\text{CO}_2}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{h},\text{CO}_2}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{v}}/^\circ\text{C}$	大小/ $\mu\text{m}$	$t_{\text{m},\text{CO}_2}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{h},\text{CO}_2}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{v}}/^\circ\text{C}$
DD-2	大东沟 1180 m	与变质钙质粉砂岩小角度相切的透镜状灰色石英脉,局部见黄铁矿、方铅矿、 $\text{Q}_2$ 。	碳质	6.1~28.2(6)	-61.4~-63.9	2.5~18.3	$t_{\text{v}}/^\circ\text{C}$	5.8~20.3(14)	-61.7~-64.8	-6.2~20.3	$t_{\text{v}}/^\circ\text{C}$
			$\text{CO}_2\text{-L}_{\text{H}_2\text{O}}$	8.6(1)	-61.9	17.8		5.8~23.3(5)	-61.9~-67.7	-6.2~18.2	
			$\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}\text{-L}_{\text{CO}_2}$	9.3~10.9(2)			301~309	5.2~8.2(2)			290~342
DD-3	大东沟 1180 m	变质钙质粉砂岩中透镜状灰色石英脉,局部见晶洞(内含黄铁矿), $\text{Q}_2$ 。	碳质					6.0~50.0(22)	-64.1~-67.7	-20.0~-2.5	
			$\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}\text{-L}_{\text{CO}_2}$					5.7~8.5(3)			267~342
DD-4	大东沟 1180 m	与变质钙质粉砂岩小角度相切的透镜状灰色石英脉,局部见方铅矿, $\text{Q}_2$ 。	碳质					6.1~25.0(19)	-64.5~-64.9	5.6~25.0	
			$\text{CO}_2\text{-L}_{\text{H}_2\text{O}}$					4.5~22.1(15)	-60.8~-63.9	-40.2~20.0	
DD-5	大东沟 1180 m	与变质钙质粉砂岩小角度相切的透镜状灰色石英脉,可见少量浸染状黄铁矿, $\text{Q}_2$ 。	碳质					14.8(1)	-63.7	13.1	
			$\text{CO}_2\text{-L}_{\text{H}_2\text{O}}$	5.4~7.9(3)			420~450	4.1~6.3(7)			313~430
DD-25	大东沟 1140 m	含浸染状方铅矿-闪锌矿的石英脉斜切粗晶黄铁矿化蚀变岩, $\text{Q}_2$ 。	碳质	7.3~8.6(2)	-60.4	-13.4~3.7		7.3~29.1(20)	-59.6~-60.2	-10.2~13.6	
			$\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}\text{-L}_{\text{CO}_2}$	5.8~10.1(5)			216~374				
DD-26	大东沟 1140 m	浸染状闪锌矿矿石,硅化强烈,石英脉呈小角度产于片岩中, $\text{Q}_2$ 。	碳质	12.5~27.8(3)	-61.9~-64.5	-8.4~18.6		4.4~36.9(14)	-60.3~-70.6	-22.2~16.9	
			$\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}\text{-L}_{\text{CO}_2}$					9.4~23.7(11)	-59.5~-59.7	5.8~14.7	
DD-28	大东沟 1140 m	条带状闪锌矿、方铅矿石英脉(含Pv细脉穿插),石英局部具有碎裂状、眼球状构造,被晚期方解石穿切, $\text{Q}_2$ 。	碳质	8.0~17.9(7)	-59.4~-59.6	4.9~14.7					345~377
			$\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}\text{-L}_{\text{CO}_2}$	4.8~14.3(17)			209~459	3.9~4.8(2)			
DD-29	大东沟 1140 m	含粗晶黄铁矿黑云角闪片岩中平行片理分布的石英脉, $\text{Q}_2$ 。	碳质					8.8~23.5(10)	-62.9~-65.3	-12.3~6.8	
			$\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}\text{-L}_{\text{CO}_2}$					5.3~13.1			309~408
DD-34	大东沟 1140 m	黄铁矿化石英脉,沿片理交代绿泥片岩和层状闪锌矿, $\text{Q}_1$ 。	碳质					6.3~15.0(19)	-64.2~-82.5	-31.5~12.0	

注:括号内数字为包裹体个数。



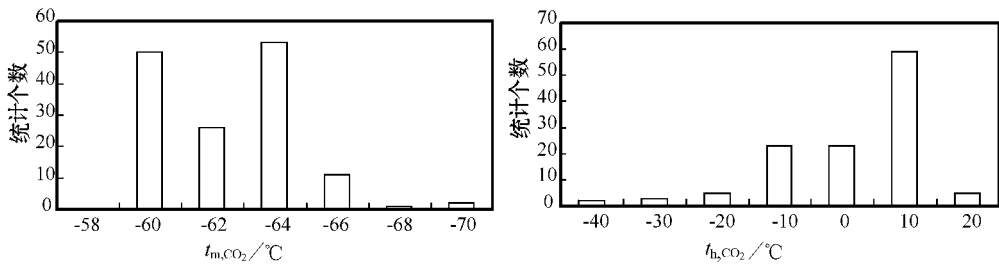


图 6 大东沟铅锌矿切层石英脉中次生碳质流体包裹体  $t_{m,CO_2}$  (a) 和  $t_{h,CO_2}$  分布图 (b)

Fig. 6 Solid  $CO_2$  melting temperatures (a) and  $CO_2$  homogenization temperatures (b) of secondary carbonic fluid inclusions in quartz vein from the Dadonggou deposit

为  $0.86 \sim 1.08 \text{ g/cm}^3$  (表 2), 切层石英脉中原生的包裹体  $CO_2$  相密度为  $0.79 \sim 1.02 \text{ g/cm}^3$ , 次生的包裹体  $CO_2$  相密度为  $0.75 \sim 1.15 \text{ g/cm}^3$  (表 2)。

在  $CO_2$  等容线 P-T 相图 (Juza *et al.*, 1965; Kennedy *et al.*, 1966) 上, 已知  $CO_2$  包裹体的密度和捕获温度, 可求出  $CO_2$  包裹体捕获压力。对于大东沟铅锌矿的包裹体, 因为碳质包裹体主要为  $CO_2$ , 所以可根据  $CO_2$  密度和最低捕获温度 (均一温度), 近似得出包裹体最低捕获压力范围: 其中顺层石英脉中次生碳质包裹体最低捕获压力  $180 \sim 340 \text{ MPa}$  (表 2); 切层石英脉中原生碳质包裹体最低捕获压力  $110 \sim 340 \text{ MPa}$ , 次生碳质包裹体最低捕获压力  $120 \sim 540 \text{ MPa}$  (表 2)。

表 2 大东沟碳质流体包裹体捕获温度、压力估算

Table 2 Estimated densities and pressures of carbonic fluid inclusions from the Dadonggou ore deposit

样号	期次	包裹体产状	$CO_2$ 相密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	最低捕获温度 / $^{\circ}\text{C}$	最低捕获压力 / $\text{MPa}$
DD-2	Q <sub>2</sub>	孤立	0.81~0.92	301~309	150~210
		带状	0.80~0.96	290~340	130~270
DD-3	Q <sub>2</sub>	带状	0.94~1.02	267~342	190~320
DD-4	Q <sub>2</sub>	带状	0.73~0.90	—	—
DD-5	Q <sub>2</sub>	带状	0.79~1.15	313~430	120~540
DD-25	Q <sub>2</sub>	孤立	0.91~1.02	216~374	130~340
DD-26	Q <sub>2</sub>	孤立	0.81~0.97	—	—
		带状	0.82~1.05	—	—
DD-28	Q <sub>2</sub>	孤立	0.83~0.90	209~459	110~280
		带状	0.83~0.90	345~377	165~240
DD-29	Q <sub>1</sub>	带状	0.89~0.99	309~408	180~340
DD-34	Q <sub>1</sub>	带状	0.86~1.08	—	—

注 碳质包裹体的捕获温度和压力借助于与其共生的含  $CO_2$  两相包裹体近似求得; “—”表示样品中没有与之共生的两相包裹体, 故而没有测出碳质包裹体的捕获温压条件。

### 3 碳质流体包裹体成分测试

#### 3.1 激光拉曼测试

激光拉曼测试在北京大学和中国地质与地球物理研究所拉曼实验室进行, 所用仪器均为英国雷绍尼公司生产的 RM-1000 型拉曼光谱仪。实验条件为  $514 \text{ nm Ar}^+$  激光器, 光谱计数时间  $10 \text{ s}$ , 每  $1 \text{ cm}$  全波段一次取峰。测试对象为变质热液期石英脉中的包裹体, 根据实验要求把样品按照包裹体常规制片方法, 制成两面抛光, 厚度约  $200 \mu\text{m}$  的薄片。其中大东沟测试样品共 8 件, 得到数据 55 组。

激光拉曼探针测试显示, 大东沟包裹体成分以  $CO_2$  为主。对于碳质包裹体, 在  $1386$  和  $1282 \text{ cm}^{-1}$  附近可见  $CO_2$  谱峰, 大部分样品还可见清晰的  $N_2$  峰 ( $2328 \sim 2329 \text{ cm}^{-1}$ , 图 7a、7b、7f), 对应  $L_{CO_2}-V_{N_2}$  型包裹体。某些样品仅出现  $CO_2$  峰 (图 7c、7d、7e), 结合包裹体显微测温结果, 认为包体内可能存在少量  $N_2$  或  $CH_4$ , 只是由于量少和仪器精度所限, 未检测到。对于含  $CO_2$  两相包裹体, 两相中分别可见清晰的  $CO_2$  峰和  $H_2O$  峰。

#### 3.2 SRXRF 测试

同步辐射 X 荧光 (SRXRF) 是一种非破坏性成分分析技术, 具有高强度、能谱连续且单色可调、准确性好、偏振度强等优点, 检测限可达到  $10^{-6}$  甚至  $10^{-9}$  量级, 是目前不多的流体包裹体组成原位无损分析方法之一, 特别适合无损分析单个流体包裹体内的重金属微量元素含量及分布 (李建康等, 2008; 连玉等, 2008)。

本次 SRXRF 测试在中国科学院高能物理研究所同步辐射 X 射线荧光分析实验室进行, 实验所用

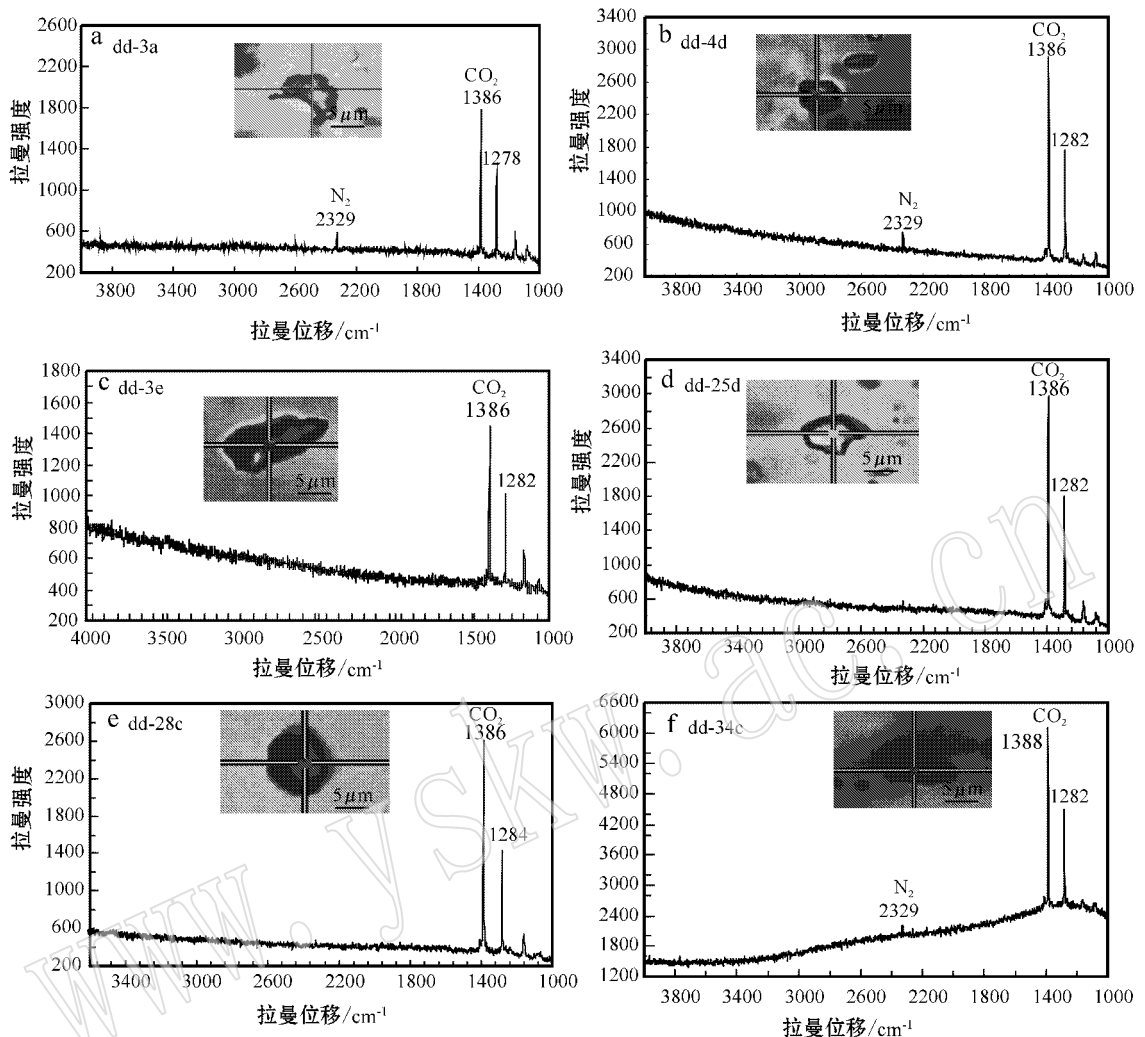


图 7 大东沟碳质包裹体激光拉曼探针谱峰图

Fig. 7 Laser Raman spectra of carbonic fluid inclusions from the Dadonggou deposit

的 X 射线光源来自北京同步辐射装置(BSRF)带有 K2B 镜聚焦的 4W1B 束线,北京正负电子对撞机(BEPC)储存环的电子能量为 2.5 GeV,束流强度为 50~170 mA,能量范围为 3.5~35 keV,光斑大小为  $20\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 。大东沟铅锌矿测试结果较理想的包裹体有 DD2D、DD5A、DD25C、DD26A(图 8)。为了便于比较,还选取了铁木尔特铅锌矿和萨热阔布金矿的部分碳质包裹体进行对比(图 8)。

将实验谱峰拟合得到所测包裹体的测试图谱和各元素的测试峰面积值,经归一化、扣除本底和吸收校正,参照 Frantz 等(1988)提供的方法等数据处理步骤,与标样比较,算出包裹体中微量元素 Cu、Zn、As、Au、Pb 的含量(表 3)。

测试结果显示 3 个矿床碳质包裹体中各元素含

量在数值上相近。与康布铁堡组地层相比,碳质流体中的 Cu、Zn、Pb 明显偏低;As 略低,而部分样品中的 Au 则大大高于地层中的值,尤其是萨热阔布,包裹体中的 Au 比地层富集近达 100 倍。这种现象可能表明,碳质流体主要与金的富集有很大关系。实际勘探资料表明,大东沟铅锌矿的伴生金品位  $0.09 \times 10^{-6} \sim 0.61 \times 10^{-6}$ ,铁木尔特 1 号铅锌矿伴生金品位  $0.10 \times 10^{-6} \sim 0.49 \times 10^{-6}$ ,铁木尔特 4 号铅锌矿伴生金品位  $0.17 \times 10^{-6} \sim 3.65 \times 10^{-6}$ 。可以推测,造山过程中碳质流体带来 Au 的叠加矿化,在大东沟铅锌矿和铁木尔特铅锌(铜)矿床的变质硫化物石英脉中伴生金矿化,而在萨热阔布则形成造山型独立金矿床。

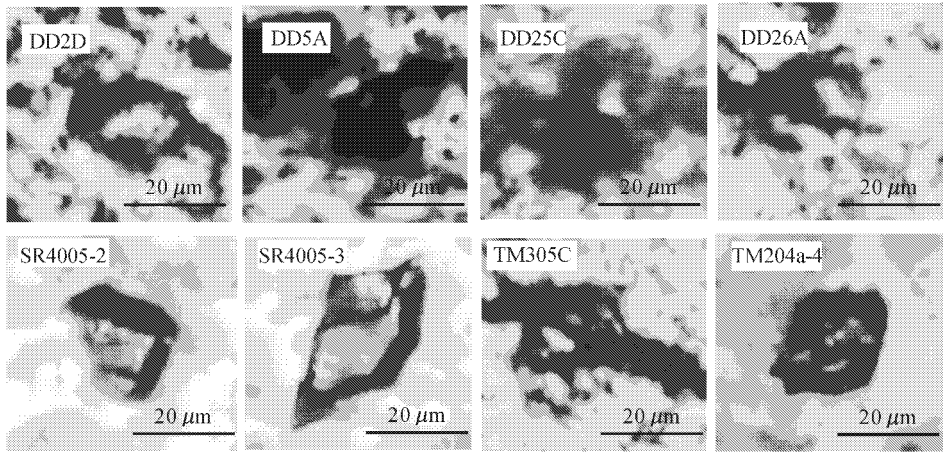


图 8 大东沟-铁木尔特-萨热阔布 SRXRF 测试碳质包裹体样品

Fig. 8 Carbonic fluid inclusions from Dadonggou-Tiemuer-Sarekuobu deposits for SRXRF analysis

表 3 大东沟包裹体 SRXRF 测试元素含量  $w_B/10^{-6}$ 

Table 3 SRXRF analyses of elements in carbonic fluid inclusions from the Dadonggou ore deposit

样品编号	Cu	Zn	Pb	As	Au	备注
$D_1k_2^3$ 地层	102.9	457.1	202.8	9.1	0.0154	大东沟
DD2D	1.49	14.21	7.20	0.96	—	大东沟
DD5A	1.04	2.90	1.73	—	0.87	大东沟
DD25C	3.33	3.50	0.70	3.30	0.65	大东沟
DD26A	0.26	4.87	1.90	—	0.29	大东沟
TM305C	0.37	0.37	0.95	0.49	1.76	铁木尔特
TM204a-4	0.16	3.85	2.17	—	—	铁木尔特
SR4005-2	—	1.58	0.20	—	1.49	萨热阔布
SR4005-3	0.17	1.78	—	2.17	4.38	萨热阔布

注： $D_1k_2^3$  地层值据刘忠孝(2007)；“—”表示未检测到该元素含量或其含量极低，计算公式为： $C_i/N_i = C_s/N_s$ （式中  $C_i, C_s$  分别为待测样品和标样中元素的含量； $N_i, N_s$  分别为待测样品和标样中元素的  $K\alpha$  或  $L\alpha$  线的净峰面积计数的平均值；净峰面积值 = 测试峰面积值  $\times$  电离室计数（归一化） $\times$  活时间（归一化）；电离室计数（归一化）= 测试样品的电离室计数/标样的电离室计数；活时间（归一化）= 测试样品的活时间/样品的活时间。

## 4 讨论与结论

显微测温结果和激光拉曼测试均证实了阿尔泰山南缘克朗盆地大东沟铅锌矿变质热液石英脉中存在大量碳质包裹体，其特征与同位于该盆地的铁木尔特铅锌矿床相似。

(1) 从碳质包裹体的产状来看：变质热液石英脉中的碳质包裹体室温下主要为单相液态  $CO_2$

( $L_{CO_2}$ ) 包裹体或  $CO_2-N_2$  包裹体 ( $L_{CO_2-V_{N_2}}$ )，多以线状、带状分布，且可见穿切石英颗粒的包裹体，显示后期构造-流体的改造特征。与铁木尔特铅锌矿床略微不同，所测样品的拉曼探针分析还没有检出  $CH_4$ 。初步研究表明，与石英延长方向近于垂直的碳质包裹体与区域构造应力有密切的联系。

(2) 从碳质包裹体的捕获温压条件来看：与其共生的两相包裹体最低捕获温度范围为  $209 \sim 459^\circ C$  内，最低形成压力集中在  $110 \sim 540$  MPa 之间，与铁木尔特铅锌矿床也相似。根据变质相带的研究(徐学纯等, 2005; 郑常青等, 2005)，克朗盆地周边地区属红柱石-矽线石型递增变质带，大东沟-铁木尔特位于变质带中间的绿泥石-黑云母带和黑云母-石榴石带。张翠光等(2007)通过对阿尔泰造山带低压型变质序列的岩相学及相平衡研究，测定阿尔泰造山带黑云母带变质作用的温度为  $445 \sim 550^\circ C$  和压力为  $200 \sim 600$  MPa。大东沟与碳质流体共生的含  $CO_2$  两相包裹体的完全均一温度  $t_{h, total}$  为  $209 \sim 459^\circ C$ ，铁木尔特与碳质流体共生的含  $CO_2$  两相包裹体的  $t_{h, total}$  为  $243.1 \sim 361.1^\circ C$ 。因均一温度是捕获温度的下限，所以应低于由相平衡计算的温度。由此可见，碳质包裹体形成的环境与造山带尤其是黑云母变质带的当时的区域条件基本吻合。

(3) 从碳质包裹体的深度条件来看：包裹体捕获时的压力在大多数自然条件下介乎于静水压力和静岩压力之间 (Roedder, 1984)。由大东沟碳质包裹体形成时的压力，按静岩压力值  $3.7$  m/10<sup>5</sup> Pa 推测

最低捕获深度,估算石英脉中碳质包裹体最低形成深度集中在 4.07~19.98 km 之间。考虑造山作用过程中水平挤压应力的影响,实际深度可能要稍小一些。而 VMS 型矿床的流体系统垂向纵深一般在海底之下 1~1.5 km(侯增谦等,2003;Urabe *et al.*, 1983,1995)。臧文栓等(2007)根据 X 射线岩石结构的石英光轴点极密与宏观构造面理的关系,认为阿尔泰造山带在韧性构造变形过程中,石英的变形深度约为 10~15 km,变形围压为 250~400 MPa,与包裹体研究的结果比较接近。阿尔泰南缘阿舍勒盆地的阿舍勒 VMS 铜锌矿,其晚期黄铁矿-石英脉也存在大量次生的纯液态 CO<sub>2</sub> 流体包裹体(常海亮,1997),流体的 Rb-Sr 同位素年龄为 304 Ma(晚于 VMS 矿床形成 80 Ma 左右),由包裹体估算的形成压力为 170 MPa,与阿舍勒盆地古沉积深度不符。因此,作者认为阿舍勒铜锌矿的次生 L<sub>CO<sub>2</sub></sub> 包裹体形成于区域变质热液期。显然,大东沟大量分布的碳质包裹体也不是 VMS 型矿床的原生特征。

(4) 关于碳质包裹体的成因:笔者曾对大东沟铅锌矿和铁木尔特铅锌矿中的部分块状、浸染状闪锌矿(代表 VMS 成矿期)中的包裹体进行了研究,发现包裹体大都已经泄露、破坏,仅留下了空洞,加热至 500℃ 无变化,拉曼探针测试也未能显示出明显的谱峰。国外不少学者认为,变质作用使得 VMS 矿床中的原生包裹体大都遭到破坏,不能代表矿化流体的特征。Marshall 等(2000)在考察多个矿床实例后,也得出在变质达到绿片岩相的多数 VMS 矿床中原生包裹体已不再保存的结论。许多研究也证实区域变质作用的峰期变质阶段流体成分以富 CO<sub>2</sub> 为特征,如葡萄牙 Feitais VMS 矿床中的富 CO<sub>2</sub> 包裹体(Inverno and Solomon, 2008);加拿大 Finlason 湖区 Wolverine 块状硫化物矿床的富 CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 包裹体(Bradshaw *et al.*, 2008)。卢良兆等(2002)研究表明,内蒙古集宁群变质峰期的部分富碳质流体可能来源于碳酸盐原岩的脱碳反应。陶士振等(2001)认为超高压变质带中发育有浅层碳酸盐岩及其它含碳岩石经动力变质作用可形成大量的 CO<sub>2</sub>。因此,大东沟和铁木尔特同造山石英脉中的碳质包裹体极有可能是在区域变质过程中捕获的,康布铁堡组中广泛分布的大理岩可能提供了主要的碳质来源,而阿尔泰造山带的区域动力热流变质作用对 CO<sub>2</sub> 的形成起了重要作用。前人研究发现 N<sub>2</sub> 包裹体的形成主要与高级变质岩中长石或云母的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的分解有关

(Anderson *et al.*, 1990,1993;傅斌等,2000),大东沟铅锌矿石英脉碳质包裹体中的 N<sub>2</sub> 可能来源于递进变质带中大量黑云母中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的分解。

综上,初步认为大东沟铅锌矿中的碳质包裹体来源于阿尔泰造山带的区域动力热流变质作用,与海相喷流沉积无关。该时期强烈的热流活动、岩浆活动和构造变形为流体捕获提供了良好的条件,克朗盆地下泥盆统康布铁堡组广泛分布的大理岩在区域变质中可能提供了主要的碳质来源。

致谢 野外工作得到北京矿产地质研究院丁汝福教授级高工、新疆阿尔泰有色地质 706 队郭正林总工等有关单位的大力帮助,SRXRF 数据处理得到中国科学院高能物理研究所徐伟博士的帮助,在此一并致谢。

## References

- Andersen T, Austrheim H, Burke E A L, *et al.* 1993. N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in deep crustal fluids: Evidence from the Caledonides of Norway[J]. *Chemical Geology*, 108: 113~132.
- Andersen T, Austrheim H and Burke E A L. 1990. Fluid inclusions in granulites and eclogites from the Bergen Arcs, Caledonian of Norway[J]. *Mineral. Mag.*, 54: 145~158.
- Bradshaw G D, Rowins S M, Peter J M, *et al.* 2008. Genesis of the Wolverine volcanic sediment-hosted massive sulfide deposit, Finlayson Lake District, Yukon, Canada: mineral chemical, fluid inclusion, and sulphur isotope evidence[J]. *Economic Geology*, 103: 35~60.
- Chai Fengmei, Mao Jingwen, Dong Lianhui, *et al.* 2008. SHRIMP zircon U-Pb dating for metarhyolites of the Kangbutiebao Formation at the Abagong iron deposit in the southern margin of the Altay, Xinjiang and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1592~1601(in Chinese with English abstract).
- Chang Hailiang. 1997. Characteristics of fluid inclusions in the Ashele No. 1 copper-zinc deposit, Xinjiang[J]. *Geology and Mineral Resource of South China*, (3): 23~32(in Chinese with English abstract).
- Frantz J D, Mao H K, Zhang Y G, *et al.* 1988. Analysis of fluid inclusions by X-ray fluorescence using synchrotron radiation[J]. *Chemical Geology*, 69(3~4): 235~244.
- Fu Bin, Xiao Yilin, Zheng Yongfei, *et al.* 2000. Fluid inclusions in ultrahigh pressure metamorphic rocks from Shuanghe and Bixiling in Dabieshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 119~126(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Li Yinqing, Zhang Qiling, *et al.* 2003. End-members and mixing of fluid in submarine hydrothermal system: evidence

- from fluid inclusions in Baiyinchang and Gacun VMS deposit[ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 19( 2 ): 221~234( in Chinese with English abstract ).
- Inverno C M C , Solomon M , Barton , *et al.* 2008. The Cu stockwork and massive sulfide ore of the Feitais volcanic-hosted massive sulfide deposit , Aljustrel , Iberian pyrite belt , Portugal : A mineralogical , fluid inclusion , and isotopic investigation[ J ]. *Economic Geology* , 103 : 269~292.
- Jiao Xuejun , Ma Zhongmei , Guo Xuji , *et al.* 2005. Devonian volcano-sediments and mineralization of Kelang basin in southern Altay mountains[ J ]. *Northwestern Geology* , 38( 3 ): 21~27( in Chinese with English abstract ).
- Juza J , Kmonicek V and Sifner O. 1965. Measurements of the specific volume of carbon dioxide in the range of 700 to 4000 bars and 50 to 475°C[ J ]. *Physica* , 31 : 1734~1744.
- Kennedy G C and Holser W T. 1966. Pressure-volume-temperature and phase relations of water and carbon dioxide. *Handbook of Physical Constants*[ J ]. *Geol. Soc. Amer. Mem.* , 97 : 371~384.
- Li Jiankang , Wang Denghong , Liu Shanbao , *et al.* 2008. SR-XRF I-croprobe study of fluid inclusions for pegmatite deposits in Western Sichuan Province[ J ]. *Geotectonica et Metallogenia* , 32( 3 ): 332~337( in Chinese with English abstract ).
- Li Siqiang , Ma Zhongmei and Guo Xuji. 2006. Metallogenic environment and mineral resources in Altai synclinorium[ J ]. *Mineral Resources and Geology* , 20( 2 ): 116~121( in Chinese with English abstract ).
- Lian Yu , Xu Wenyi , Yang Dan , *et al.* 2008. SR-XRF studies of fluid inclusions from the Jiama and Nanmu deposits in the Gangdise copper-polymetallic metallogenic belt of Tibet[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 27( 3 ): 185~198( in Chinese with English abstract ).
- Liu Min , Zhang Zuoheng , Wang Yongqiang , *et al.* 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 Min , Zhang Zuoheng , Wang Yongqiang , *et al.* 2009. Fluid inclusion characteristics and mineralization of Dadonggou Pb-Zn ore deposit , Altay , Xinjiang[ J ]. *Mineral Deposit* , 28( 3 ): 282~296( in Chinese with English abstract ).
- Liu Zhongxiao. 2007. Tectonic evolution and metallogeny of Kelan Devonian volcanic basin in the southern margin of Altay Mountains [ J ]. *Xinjiang Nonferrous Metal* , 4 : 9~17( in Chinese ).
- Lu Liangzhao , Dong Yongsheng and Zhou Xiwen. 2002. A comparative study on characteristics and origin of fluids during granulite-facies metamorphism of Jining Group and Qianxi Group[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 21( 4 ): 387~396( in Chinese with English abstract ).
- Marshall B , Vokes F and Larouque A. 2000. Regional metamorphic remobilization : Upgrading and formation of ore deposits[ A ]. Spy P , Marshall B and Voke F. *Metamorphosed and Metamorphic Ore Deposits*[ C ]. *Reviews in Economic Geology* , 11 : 19~38.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusion[ A ]. *Reviews of Mineralogy*. *Mineralogical Society of America*[ C ]. 12 : 266~271.
- Shen Maode , An Yinchang and Ma Zhongmei. 2003. Tectonic evolution and metallogeny of Kelan Devonian volcanic basin in the southern margin of Altay Mountains , Xinjiang[ J ]. *Xinjiang Nonferrous Metal* , 26( 4 ): 2~6( in Chinese ).
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviation[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 28( 5 ): 495~500( in Chinese with English abstract ).
- Shepherd T J , Rankin A H and Alderton D H M. 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*[ M ]. Blackie : Chapman & Hall , 1~239.
- Tao Shizhen , Wei Yanzhao , Liu Deliang , *et al.* 2001. Gascomposition in ultrahigh pressure metamorphic fluid and gas pool forming condition in orogenic belt[ J ]. *Chinese Journal of Geology* , 36( 1 ): 91~100( in Chinese with English abstract ).
- Urabe T , Baker E T , Ishibashi J , *et al.* 1995. The effect of magmatic activity on hydrothermal venting along the super-spreading East Pacific Rise[ J ]. *Science* , 269 : 1092~1095.
- Urabe T , Scott S D and Hattori K. 1983. A comparison of footwall - rock alteration and geothermal systems beneath some Japanese and Canadian volcanogenic massive sulfide deposits[ J ]. *Economic Geology* , 5 : 345~364.
- Urabe T and Sato T. 1978. Kuroko deposits of the Kosaka mine , Northeast Honshu , Japan : Products of submarine hot springs on Miocene sea floor[ J ]. *Economic Geology* , 73 : 161~173.
- Van den Kerkhof A and Thiery R. 2001. Carbonic inclusions[ J ]. *Lithos* , ( 55 ): 49~68.
- Wang Linlin , Xu Jiuhua , Wei Xiaofeng , *et al.* 2008. SR-XRF studies of carbonic fluid inclusions from the Tiemurt and Sarekuobu Deposits , southern Altay , Xinjiang , China[ A ]. *Proceedings of the Ninth National Conference on deposits*[ C ]. Beijing : Geology Publishing House , 553~555( in Chinese ).
- Xu Jiuhua , Ding Rufu , Xie Yuling , *et al.* 2005. Pure CO<sub>2</sub> fluid in Sarekuobu gold deposit at the southern margin of Altai Mountains , Xinjiang , China[ J ]. *Chinese Science Bulletin* , 50( 4 ): 380~386.
- Xu Jiuhua , Shan Lihua , Ding Rufu , *et al.* 2008. Carbonic fluid inclusion assemblages and their geological significance at the Tiemuerte lead-zinc deposit , Altay[ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 24( 9 ): 2091~2104( in Chinese with English abstract ).
- Xu Xuechun , Zheng Changqing and Zhao Qingying. 2005. Metamorphic types and crustal evolution of Hercynian orogenic belt in Altay region , Xinjiang[ J ]. *Journal of Jilin University( Earth Science Edition)* , 35( 1 ): 7~11( in Chinese with English abstract ).
- Yang Xinyue. 1990. Kinematic and dynamic analyses of microstructures and fabrics of the Abagong-Kuerti fault zone in northern Xinjiang [ J ]. *Geotectonica et Metallogenia* , 4( 1 ): 29~41( in Chinese with English abstract ).
- Ye Qingtong , Fu Xuji and Wang Baoliang. 1998. Metallogeny of Polymetallic Metallogenic Belts on the Southern Margin of the Altay Mountains , Xinjiang , China[ J ]. *Acta Geologica Sinica* , 72( 6 ):

- 349~357 (in Chinese with English abstract).
- Yin Yiqiu, Yang Youming, Li Jiaying, *et al.* 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).
- Zang Wenshan, Chen Bolin, Wu Ganguo, *et al.* 2007. X-ray fabric analysis of deformed rocks in the eastern part of the Fuyun-Qinghe area, Altay, Xinjiang, China [J]. *Geol. Bull. China*, 26(9): 1189~1197 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Cuiguang, Wei Chunjing, Hou Rongjiu, *et al.* 2007. Phase equilibrium of low-pressure metamorphism in the Altaides, Xinjiang [J]. *Chinese Geology*, 34(1): 34~41 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinhong, Wang Jingbin and Ding Rufu. 2000. Characteristics and U-Pb ages of zircon in metavolcanics from the Kangbutiebao Formation in the Altay orogen, Xinjiang [J]. *Chinese Regional Geology*, 19(3): 281~286 (in Chinese).
- Zheng Changqing, Xu Xuechun, Enami M, *et al.* 2007. Features and PT condition study of the adanulsite-sillimanite type progressive metamorphic belt in Altay, Xinjiang [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(4): 45~50 (in Chinese with English abstract).
- [J]. *矿产与地质*, 20(2): 116~121.
- 连玉, 徐文艺, 杨丹, 等. 2008. 西藏冈底斯甲马和南木矿床流体包裹体 SRXRF 研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 27(3): 185~198.
- 刘敏, 张作衡, 王永强, 等. 2008. 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 [J]. *地质学报*, 82(11): 1504~1513.
- 刘敏, 张作衡, 王永强, 等. 2009. 新疆阿尔泰大东沟铅锌矿床流体包裹体特征及成矿作用 [J]. *矿床地质*, 28(3): 282~296.
- 刘忠孝. 2007. 阿尔泰南缘克兰泥盆纪火山盆地构造演化与成矿 [J]. *新疆有色金属*, 4: 9~17.
- 卢良兆, 董永胜, 周喜文. 2002. 集宁群和迁西群麻粒岩相变质流体的特征和成因 [J]. *岩石矿物学杂志*, 21(4): 387~396.
- 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 [J]. *新疆有色金属*, (4): 2~6.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表 [J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495~500.
- 陶士振, 卫延召, 刘德良, 等. 2001. 造山带超高压变质流体中气体组成及成藏条件初探 [J]. *地质科学*, 36(1): 91~100.
- 王琳琳, 徐九华, 卫晓锋, 等. 2008. 铁木尔特-萨热阔布矿床碳质流体包裹体 SRXRF 研究 [A]. 第九届全国矿床会议论文集 [C]. 北京: 地质出版社, 553~555.
- 徐九华, 单立华, 丁汝福, 等. 2008. 阿尔泰铁木尔特铅锌矿床的碳质流体组合及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 24(9): 2091~2104.
- 徐学纯, 郑常青, 赵庆英. 2005. 阿尔泰海西造山带区域变质作用类型与地壳演化 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 35(1): 7~11.
- 杨新岳. 1990. 北疆阿巴宫-库尔提断裂带显微组结构的运动学和动力学分析 [J]. *大地构造与成矿学*, 4(1): 29~41.
- 叶庆同, 傅旭杰, 王保良. 1998. 新疆阿尔泰山南缘多金属成矿带的成矿规律 [J]. *地质学报*, 72(6): 349~357.
- 尹意求, 杨有明, 李嘉兴. 2005. 新疆阿尔泰山南缘克兰盆地沉积构造演化与铅锌成矿 [J]. *大地构造与成矿学*, 29(4): 476~481.
- 臧文栓, 陈柏林, 吴淦国, 等. 2007. 阿尔泰富蕴-青河一带东段变形岩石 X 光组构分析 [J]. *地质通报*, 26(9): 1189~1197.
- 张翠光, 魏春景, 侯荣玖, 等. 2007. 新疆阿尔泰造山带低压变质作用相平衡研究 [J]. *中国地质*, 34(1): 34~41.
- 张进红, 王京彬, 丁汝福. 2000. 阿尔泰造山带康布铁堡组变质火山岩锆石特征和铀-铅年龄 [J]. *中国区域地质*, 19(3): 281~286.
- 郑常青, 徐学纯, Enami M, 等. 2005. 新疆阿勒泰红柱石-矽线石型递增变质带特征及其 PT 条件研究 [J]. *矿物岩石*, 24(4): 45~50.

## 附中文参考文献

- 柴风梅, 毛景文, 董连慧, 等. 2008. 新疆阿尔泰南缘阿巴宫铁矿区康布铁堡组变质火山岩年龄及地质意义 [J]. *地质学报*, 82(11): 1592~1601.
- 常海亮. 1997. 新疆阿舍勒 I 号铜锌矿床流体包裹体特征及其时序关系 [J]. *华南地质与矿产*, (3): 23~32.
- 傅斌, 肖益林, 郑永飞, 等. 2000. 大别山双和和碧溪岭超高压变质岩流体包裹体研究 [J]. *岩石学报*, 16(1): 119~126.
- 侯增谦, 李荫清, 张绮玲, 等. 2003. 海底热水成矿系统中的流体端员与混合过程: 来自白银厂和呷村矿床的流体包裹体证据 [J]. *岩石学报*, 19(2): 221~234.
- 焦学军, 马忠美, 郭旭吉, 等. 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.
- 李建康, 王登红, 刘善宝, 等. 2008. 川西伟晶岩型矿床中流体包裹体的 SRXRF 分析 [J]. *大地构造与成矿学*, 32(3): 332~337.
- 李思强, 马忠美, 郭旭吉. 2006. 阿勒泰复向斜的成矿环境及其矿产