

文章编号 10258-7106(2009)05-0585-14

阿尔泰克兰盆地 VMS 矿床的变形变质与 碳质流体特征*

徐九华¹, 林龙华¹, 王琳琳¹, 褚海霞¹, 卫晓峰¹, 陈栋梁²

(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 阿尔泰南缘克兰火山-沉积盆地的泥盆纪 VMS 型矿床经历了石炭纪—二叠纪同造山的区域变质和热液叠加改造作用, 同构造石英脉和穿切层状铅锌矿化的脉状铜矿化很发育。矿石中反映压力-重结晶作用的各种结构构造发育, 包括碎斑结构、交代结构、斑状变晶结构和碎裂结构, 以及塑性流动构造或皱纹构造、压力影等。对铁木尔特、大东沟铅(铜)矿床的包裹体研究表明, 在矿化构造岩和晚期硫化物石英脉中发育极丰富的碳质(CO_2 - CH_4 - N_2)流体。与碳质流体共生的 L_{CO_2} - $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ 型包裹体均一温度为 $243.1 \sim 412.1^\circ\text{C}$ (铁木尔特)和 $209 \sim 430^\circ\text{C}$ (大东沟), 碳质流体的捕获压力估计为 $180 \sim 300 \text{ MPa}$ 。这些特征与区域变质的温压条件相当, 与 VMS 无关。同步辐射 X 射线荧光(SRXRF)单个包裹体的重金属微量元素初步对比分析表明, 造山型萨热阔布金矿的碳质流体中检出有 Au、As, 而在 VMS 矿床中没有检出, 说明碳质流体在区域变质过程中对 Au 成矿有贡献。

关键词 地球化学, 铅(铜)矿床, 变形变质, 碳质流体, SRXRF 分析, 阿尔泰

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Deformation, metamorphism and carbonic fluids in VMS deposits of Kelan Basin, Altay

XU JiuHua¹, LIN LongHua¹, WANG LinLin¹, CHU HaiXia¹, WEI XiaoFeng¹ and CHEN DongLiang²

(1 Department of Resource Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract

The Devonian Kelan volcanic-sedimentary basin, extending along the south margin of the Altay Mountains, hosts many Pb-Zn-Cu and Au deposits in the Kangbutiebao Formation (D₁k) that consists of acid volcanic rocks and volcanoclastic and carbonic sedimentary rocks. During Carboniferous and Permian, the Devonian VMS deposits experienced deformation and metamorphism so that sulfide quartz veins paralleling with or cutting schist occur widely. Of these deposits, the Tienmurte Pb-Zn-(Cu) deposit is the largest one. Carbonic(CO_2 - CH_4 - N_2) fluid inclusions in late sulfide-quartz veins represent a very different younger event not related to VMS ores. Some L_{CO_2} - $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ inclusions associated with carbonic inclusions have $t_{\text{h}(\text{total})}$ $243.1 \sim 412.1^\circ\text{C}$. The Dadonggou deposit, another typical VMS deposit in the Kelan basin, also occurs in the Kangbutiebao Formation and has the same mineral assemblages as the Tienmurte deposit. Fluid inclusions in the vein quartz of stage II are also dominated by secondary carbonic inclusions and CO_2 -rich inclusions. CO_2 -rich inclusions (L_{CO_2} - $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$) occasionally associated with carbonic inclusions have $216 \sim 430^\circ\text{C}$ of $t_{\text{h}(\text{total})}$. The estimated trapping pressures of carbonic inclusions are in the range of $180 \sim 300 \text{ MPa}$, which correspond to a depth of $6.7 \sim 11.1 \text{ km}$ according to lithostatic pressures. This depth was impossible for VMS deposits. SRXRF analysis shows that Au is not detected in carbonic fluid inclusions of the Tienmurte VMS deposit but is high in the orogenic Sarekoubu deposit. It is considered that the Sarekoubu deposit had

* 本文得到国家自然科学基金(40672060)和北京正负电子对撞机国家实验室课题(VR-08030)的联合资助

第一作者简介 徐九华, 男, 1951 年生, 博士, 教授, 矿床学专业。Email: jiuhuaxu@ces.ustb.edu.cn

收稿日期 2009-03-06; 改回日期 2009-05-20。李岩编辑。

higher Au content than the Tiemurte deposit in volcanic sedimentation in Early Devonian so that the Sarekoubu deposit had original gold enrichment. In Carboniferous gold deposits related to carbonic fluids were formed during orogeny, whereas no economic gold mineralization was superimposed at the Tiemurte deposit except for carbonic fluid overprints.

Key words: geochemistry, lead-zinc (copper) deposit, deformation and metamorphism, carbonic fluids, SRXRF, Altay

由于构造变形和动力变质作用形成矿石和矿化岩石,甚至因强烈的构造变形形成矿石糜棱岩,在国内外常有报道,如瑞典的 Renstrom VMS 矿床(Duckworth et al., 1993) 辽宁红透山铜矿(顾连兴等, 2004a)等。变形变质作用导致成矿物质的再活化和富集(Marshall et al., 1987),其变质程度一般为绿片岩相(Ulrich et al., 2002),有些达到角闪岩相,如西格林兰的 Isua 绿岩带块状硫化物矿床(Appel et al., 2001),有的甚至达到了麻粒岩相,其 $t-p$ 条件为 $750\sim 800^{\circ}\text{C}$ 、 $(5\sim 6)\times 10^8$ Pa,并经历了至少 5 期变形作用,如澳大利亚 Broken Hill 矿床(Spray et al., 2008)。VMS 型矿床在变质变形过程中部分矿石还遭受了韧性剪切作用(McClay, 1983),形成了硫化物糜棱岩(Duckworth et al., 1993)或矿石糜棱岩(Gu et al., 2007; 顾连兴等, 2004a)。野外露头 and 室内岩、矿相的细致观察表明,阿尔泰山地区克兰盆地 VMS 矿床中矿石的变形变质现象非常普遍,而且与变质有关的碳质($\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$)流体很发育。本文初步研究了该区 VMS 矿石的变形变质特点和造山有关的碳质流体包裹体以及它们的微量重金属元素特征。

1 地质背景

阿尔泰山南缘在早中泥盆世处于陆缘拉张环境,形成了一系列 NW 向裂谷带以及火山-沉积盆地(董永观等, 2002; Wang et al., 2000)。近年来的研究表明,它们是活动陆缘的断陷盆地,形成于古亚洲洋板块俯冲作用过程(牛贺才等, 2006)。由西向东依次有阿舍勒、冲乎尔、克朗和麦兹 4 大盆地,火山活动强烈,形成了一系列重要的 VMS 型矿床,如阿舍勒盆地的阿舍勒大型铜锌矿床,麦兹盆地的可可塔勒大型铅锌矿床(王京彬等, 1998)。克兰(克朗)盆地是阿尔泰山南缘最大的晚古生代火山-沉积盆地,产出 VMS 型铁、铜、铅锌等重要矿床(尹意求等, 2005)。铁木尔特铅锌矿和大东沟铅锌矿都是克兰盆地内主要的 VMS 型矿床,矿床受控于阿巴宫-库尔提断裂(图 1),铅锌矿体分布于该断裂 NE 逆冲盘的下泥盆统康布铁堡组大理岩、绿泥石英片岩、石榴黑云石英片岩或变钙质粉砂岩中。关于康布铁堡组的时代,近年来有作者认为早于早泥盆世(杨富全等, 2008),不晚于 412 Ma(柴凤梅等, 2008)。

自晚泥盆世至早二叠世末,阿尔泰山南缘表现为 NE-SW 向强烈挤压的造山构造环境,同造山期的构造-变质-成岩-流体-成矿作用发育,也是阿尔泰山造山带重要的成矿时期(肖文交等, 2006; 朱永峰等, 2007; Mao et al., 2008; Xiao et al., 2008)。在此期间主要发育 2 期区域变质作用,第一期属区域

低温动力变质作用,热液活动较弱、构造变形强烈,第二期属区域动力热流变质作用,形成典型的递增变质作用,热液活动强烈。这种构造变形、流体活动和演化对阿尔泰山南缘成矿作用起了重要的控制作用(陈衍景等, 2001; 陈华勇等, 2000)。

2 VMS 矿床的变形变质

阿尔泰山地区早中泥盆世形成的 VMS 矿床在晚泥盆世以来的造山环境里经受了强烈的变形变质作用,原生矿石在不同程度上被改造成为矿化构造岩,甚至成为矿石糜棱岩。

克兰火山-沉积盆地的 VMS 型矿床(如铁木尔特和大东沟)铅锌矿体都分布于下泥盆统康布铁堡组变质岩系中,矿体多呈透镜状、似层状整合产出,发育多个矿化层。根据野外产状特点,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-方铅矿等硫化物成矿作用,在铁木尔特常见变形的层状铅锌矿和石榴子石绿泥片岩相间沿构造片理方向分布,有时被揉皱状黄铜矿脉交代(图 2A、2B),或被晚期的黄铜矿石英细脉穿插(图 2C);②变质热液成矿期,又可分为 2 个阶段,较早的含铜白色-灰白色石英脉,呈脉状或透镜状沿片理方向产于石榴子石绿泥片岩、黑云片岩中,可能为同造山期的构造-变质产物(图 2D、2F),较晚的含黄铜矿石英脉斜切浸染状黄铁矿化蚀变岩和层状闪锌矿(图 2C、2D、2E),与更晚的构造-流体作用有关。

矿石结构构造分析是研究变质变形改造的最佳窗口(Craig et al., 1993; 顾连兴等, 2004b),阐明这些结构构造的形成机理有助于对成矿作用和矿床成因的分析。研究表明,脉石矿物的压溶(Pressure solution)可使原矿石变富,硫化物的增生(Overgrowth)不仅可使原有矿层叠加变富,而且可将矿胚层改造成为工业矿体。矿石糜棱岩的存在是在块状硫化物矿床内寻找富矿体的标志。在铁木尔特和大东沟铅锌矿,反映压力-重结晶作用的各种矿石结构构造(邱柱国等, 1982)在显微镜下非常清楚,其特征具体表现为:碎斑结构和交代结构(图 3A、3E),塑性流动构造或皱纹状构造(图 3B),斑状变晶结构(图 3C、3D),压力影(图 3F、3H)和碎裂结构(图 3G)等。

从上述结构、构造可以看出,由于金属硫化物在定向压力作用下抗压特性不同,较塑性的黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿等常揉皱变形、拉长并被黑云母、绿泥石和石榴子石等交代,或发生再活化迁移到眼球状石英、石榴子石变斑晶等的裂隙中;较脆性的黄铁矿常以碎裂变形为主,又由于其相对硬度大,在黄铁矿颗粒两侧垂直压应力方向(如图 3F、3H 的 NW-SE 方向)增生方铅矿、闪锌矿等,形成了压力影结构。这些特点均反映了与动力变质有关的压力-重结晶作用形成的矿石结构,

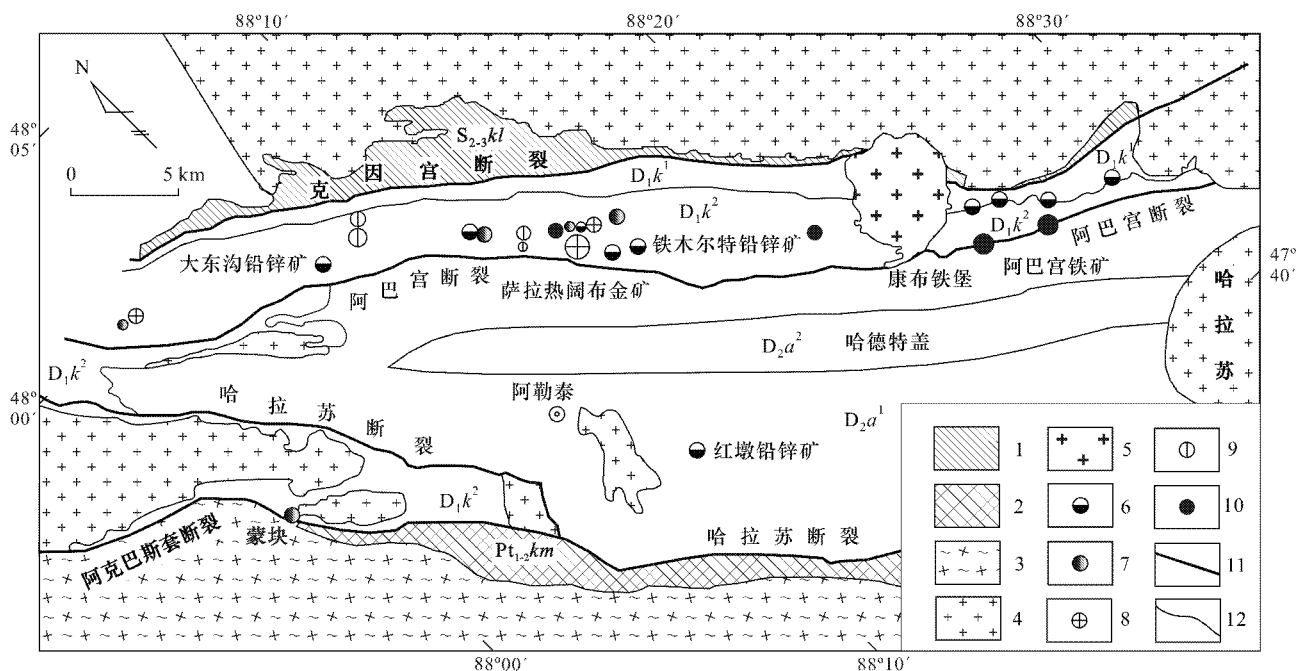


图 1 阿尔泰南缘克兰泥盆纪火山盆地及矿床分布地质略图

(据新疆第四地质队 1:5 万区域地质矿产图及尹意求等 2005 资料修绘)

D₂a²—中泥盆统阿勒泰镇组上亚组; D₂a¹—中泥盆统阿勒泰镇组下亚组; D₁k²—下泥盆统康布铁堡上亚组; D₁k¹—下泥盆统康布铁堡下亚组; S_{2,3}kl—中上志留统库鲁姆提群; P_{t1,2}km—元古代克木齐群; 1—早古生代片岩类; 2—混合岩类; 3—混合岩化花岗岩; 4—海西期花岗岩类; 5—燕山期花岗岩; 6—铅锌矿床(点); 7—铜矿床(点); 8—金矿床(点); 9—金铜矿床(点); 10—铁矿床(点); 11—区域性大断裂; 12—地质界线

Fig. 1 Geological sketch map of ore deposits in the Kelan Devonian volcanic basin , southern margin of Altay

(modified from No. 4 Geological Party of Xinjiang and Yin et al. ,2005)

D_2a^2 —Middle Devonian Upper Altay Formation ; D_2a^1 —Middle Devonian Lower Altay Formation ; D_1k_2 —Lower Devonian Upper Kangbutiebao Formation ; D_1k_1 —Lower Devonian Lower Kangbutiebao Formation ; $S_{2,3kl}$ —Middle-Upper Silurian Kulumuti Group ; $Pt_{1,2km}$ —Proterozoic Kemuqi Group ; 1—Early Paleozoic schist ; 2—Migmatite ; 3—Migmatitic granite ; 4—Hercynian gneissoids ; 5—Yanshanian granite ; 6—Lead-zinc deposit (ore spot) ; 7—Copper deposit (ore spot) ; 8—Gold deposit (ore spot) ; 9—Gold-copper deposit (ore spot) ; 10—Iron deposit (ore spot) ; 11—Regional fault ; 12—Geological boundary

显然不是 VMS 的特征。也就是说,本区成矿作用不是仅经过单一的 VMS 过程,其后期的变质变形过程对成矿亦起重要作用。

3 碳质流体

海底火山块状硫化物矿床(VMS型)的成矿流体一般为简单的盐-水体系。包裹体均一温度常在 $160\sim 350^{\circ}\text{C}$ 之间,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 接近或略高于正常的海水盐度($\sim 3.2\%$) (Bischoff et al, 1985; Ulrich et al., 2002; Zaw et al., 2003)。富 CO_2 包裹体几乎不存在(Grupner et al., 2001),但可以低浓度($200\times 10^{-6}\sim 6\,000\times 10^{-6}$)与 N_2 和 CH_4 伴随。

近来对克三火山盆地铅锌(铜)矿床的研究表明,在矿化构造岩中存在极丰富的碳质($\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$)流体。例如,铁木尔特与变质片理平行的同构造硫化物-石英脉中不同类型的包裹体组合,具有明显的先后穿切关系,至少可识别出3类包

裹体(徐九华等 2008):①盐水溶液和高盐度流体包裹体,出现几率小,为原生成因,包裹体的完全均一温度 $t_{K(\text{total})}$ 为 322~422.5℃;② $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 流体包裹体,主要由富 CO_2 包裹体组成,大小一般为 1~5 μm ,属次生包裹体范畴,反映了后期构造-流体活动的改造特征;③碳质($\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$)流体包裹体(图 4),广泛发育,主要由单相(L_{CO_2} 或 $\text{L}_{\text{CO}_2\text{-CH}_4}$)少量两相($\text{L}_{\text{CO}_2}\text{-L}_{\text{H}_2\text{O}}$)富 CO_2 包裹体组成,5~20 μm ,带状成群分布,也是次生包裹体组合,反映了更晚期的构造-流体活动。 L_{CO_2} 型包裹体(纯 CO_2 包裹体或含少量 $\text{CH}_4\text{-N}_2$ 的 CO_2 包裹体)的 $t_{\text{m}(\text{CO}_2)}$ (固态 CO_2 的熔化温度)为 $-63.3\sim-57.7^\circ\text{C}$, $t_{\text{K}(\text{CO}_2)}$ (液气两相 CO_2 的均一温度)为 $-27.5\sim+29.7^\circ\text{C}$; $\text{L}_{\text{CO}_2\text{-CH}_4}$ 型包裹体的 $t_{\text{m}(\text{CO}_2)}$ 为 $-80.5\sim-65.5^\circ\text{C}$, $t_{\text{K}(\text{CO}_2)}$ 为 $-56.0\sim-25.0^\circ\text{C}$ 。拉曼探针证实,具有很高的 CH_4 和/或 N_2 。与碳质流体共生的 $\text{L}_{\text{CO}_2}\text{-L}_{\text{H}_2\text{O}}$ 型包裹体的 CO_2 相的 $t_{\text{m}(\text{CO}_2)}$ 为 $-66.9\sim-60.9^\circ\text{C}$, $t_{\text{K}(\text{CO}_2)}$ 为 $13.3\sim 2.3^\circ\text{C}$,包裹体的完全均

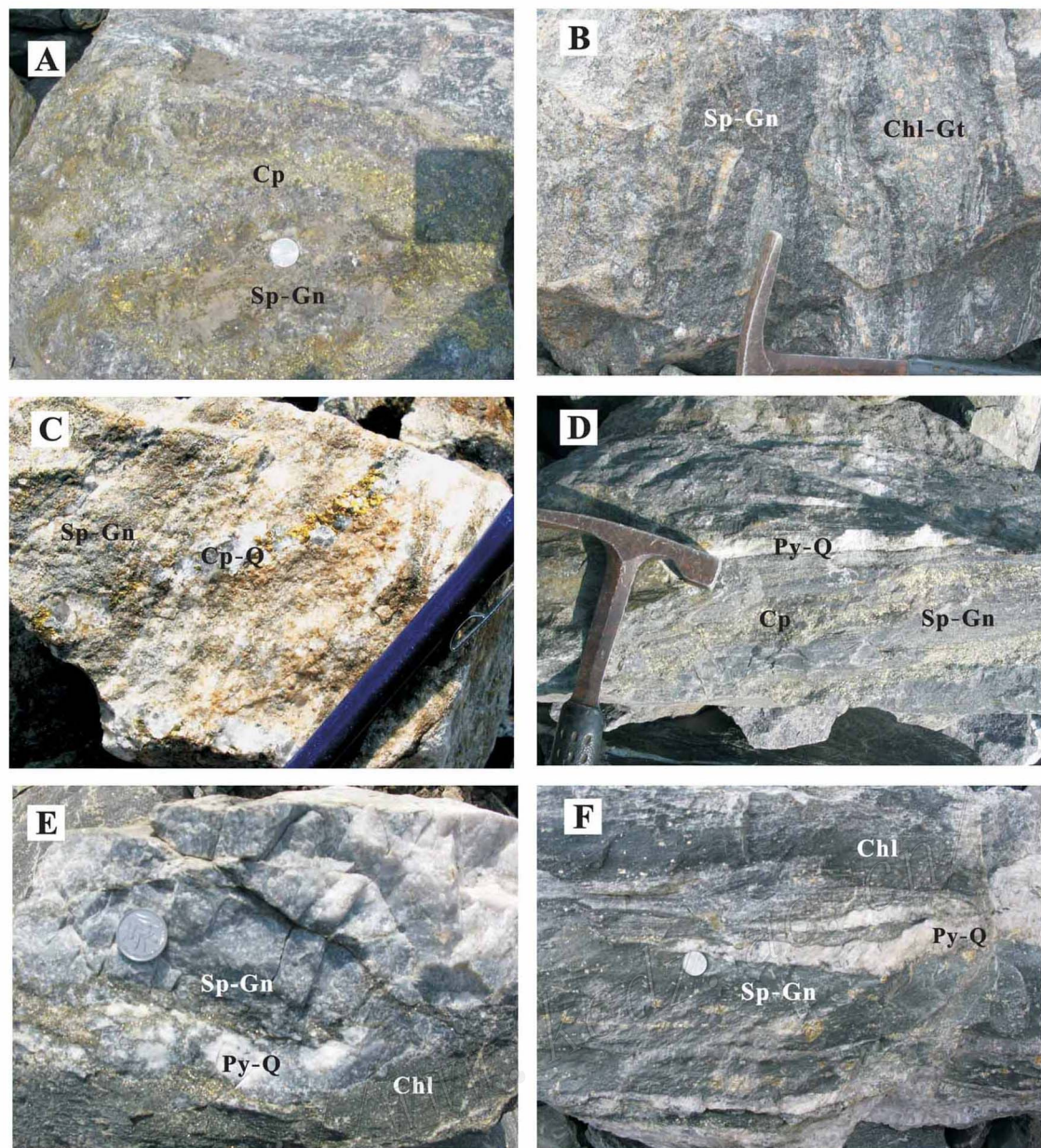


图2 克兰盆地铅锌(铜)矿床的矿化构造岩露头特征

A. 揉皱状黄铜矿脉(Cp)交代变形的层状铅锌矿(Sp-Gn), 铁木尔特; B. 变形的层状铅锌矿(Sp-Gn)和石榴子石绿泥片岩(Chl-Gt)相间沿构造片理方向分布, 铁木尔特; C. 晚期黄铜矿石英细脉(Cp-Q)穿插含层纹状铅锌矿(Sp-Gn)的大理岩, 铁木尔特 1 号矿体; D. 与变质片理平行的同构造黄铁矿-石英脉(Py-Q)和斜切绿泥片岩和层状铅锌矿层(Sp-Gn)的黄铜矿脉(Cp), 铁木尔特; E. 含网脉状黄铁矿石英脉(Py-Q)透镜体分布于层状铅锌矿(Sp-Gn)和绿泥片岩中, 大东沟 1 180 m 水平; F. 同构造条带状黄铁矿石英脉(Py-Q)分布于绿泥片岩(Chl)中和层状铅锌矿(Sp-Gn)间, 大东沟 1 140 m 水平

Fig. 2 Outcrops of deformed ores in Pb-Zn (Cu) deposits of the Kelan volcanic basin

A. Sphalerite-galena layer (Sp-Gn) cut and replaced by chalcopyrite (Cp), No.1 ore body; B. Sphalerite layer (Sp-Gn) and marble replaced in chlorite and garnet (Chl-Gt) metamorphic phase; C. Chalcopyrite-quartz vein (Cp-Q) cutting sphalerite layers (Sp-Gn), No.1 ore body; D. Sphalerite layer (Sp-Gn) parallel to chlorite schist cut by chalcopyrite veins (Cp), pyrite-quartz vein (Py-Q) occurring along chlorite schist; E. Pyrite veinlets-quartz (Py-Q) occurring as lenses in sphalerite-bearing layer (Sp-Gn), 1 180 m level of Dadonggou; F. Banded pyrite-quartz veins (Py-Q) occurring in chlorite schist (Chl) and sphalerite-galena layer (Sp-Gn), 1 140 m level of Dadonggou

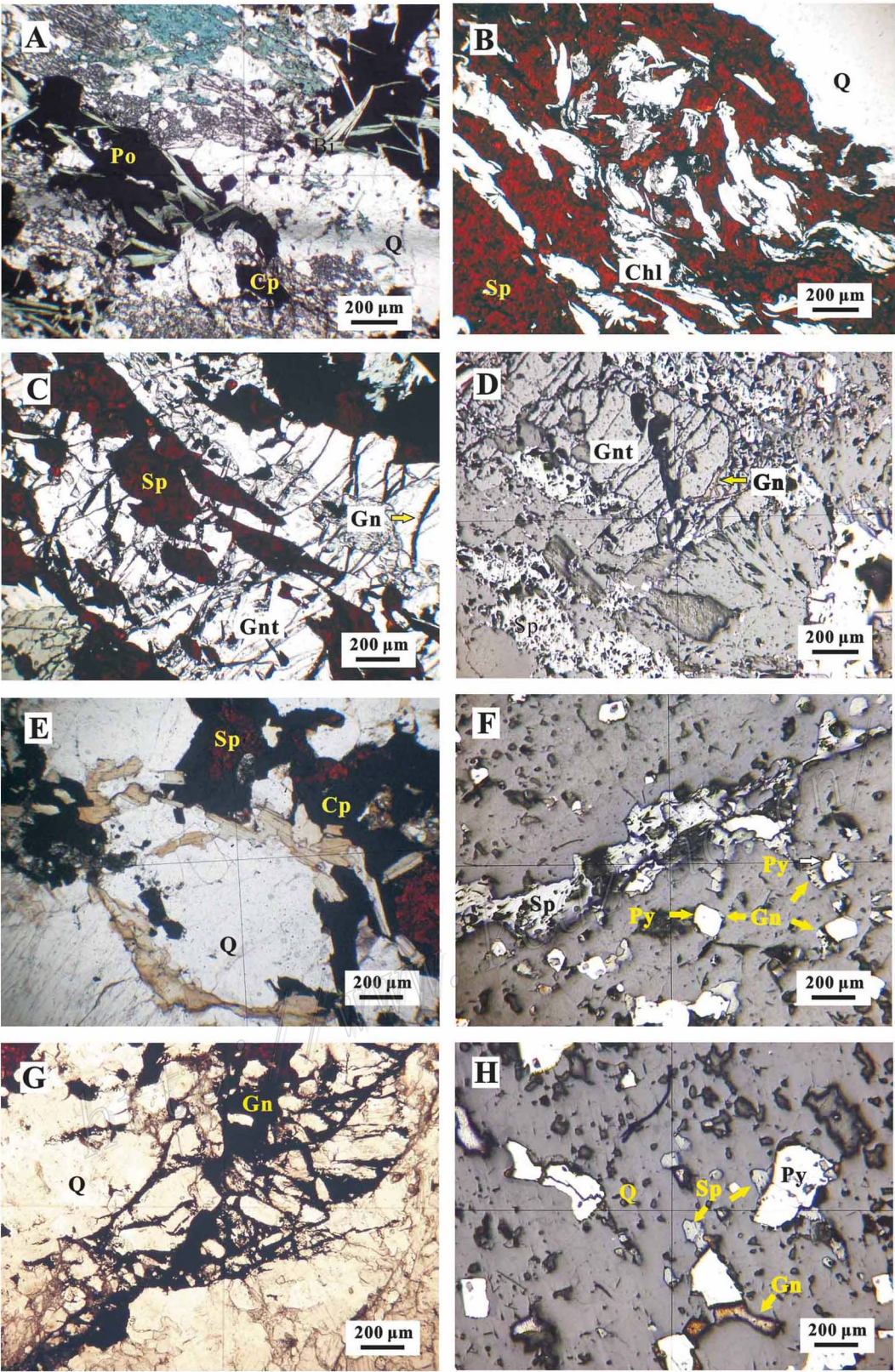


图 3 克 兰盆地矿化构造岩的显微特征(图例说明见下页)

Fig. 3 Microphotographs of deformed ores in Pb-Zn (Cu) deposits of the Kelan volcanic basin

A. 稠密浸染状黄铜矿化石榴云母片岩中绿色黑云母、斜黝帘石等穿切交代黄铜矿(Cp)磁黄铁矿(Po)等,石英(Q)呈透镜状沿片理分布,铁木尔特 27 号矿体,样品号 TM202; B. 条带状铅锌矿石绿泥石(Chl)交代闪锌矿(Sp),两者均表现为塑性变形,铁木尔特 27 号矿体, TM-1; C. 条带状铅锌矿石中石榴子石(Gnt)变斑晶沿 NW-SE 片理方向生长,并包含闪锌矿(Sp)在石榴子石垂直延长方向(NE-SW)的张性微裂隙有方铅矿(Gn)细脉增生, TM-1; D. 照片 C 附近,石榴子石-闪锌矿沿 NW-SE 方向分布,在石榴子石垂直延长方向(NE-SW)的张性微裂隙有方铅矿细脉增生,反光; E. 硫化物石英脉中,透镜状石英(Q)被黑云母(浅褐色)环绕,并交代黄铜矿(Cp)闪锌矿(Sp),铁木尔特 1 号矿体, TM206; F. 浸染状黄铁矿化石榴片理化变钙质粉砂岩中沿片理方向(照片中为 NEE-SWW)细脉状方铅矿-闪锌矿交代黄铁矿,且在黄铁矿颗粒的 NEE-SWW 方向有增生的方铅矿,大东沟 1 180 m, DD-16, 反光; G. 石英裂隙中网脉状方铅矿,大东沟 1 180 m, DD-16; H. 片理化变钙质粉砂岩中,黄铁矿颗粒(Py)两侧沿最小主应力 NW-SE 向增生方铅矿(Gn)闪锌矿(Sp),大东沟 1 180 m, DD-15, 反光

A. Chalcopyrite and pyrrhotite (Cp, Po) replaced and cut by green biotite and clinoepidote, TM202, No. 27 ore body, Tiemurte; B. Banded and deformed sphalerite replaced by chlorite, both showing plastic deformation, No. 27 ore body, Tiemurte; C. Garnet porphyroblast (Gnt) in banded Pb-Zn ore, occurring along NW-SE and containing sphalerite (Sp), overgrowth of galena (Gn) filling the cross fissures in garnet, TM-1; D. Same as photo C, reflect light; E. Sphalerite (Sp) and chalcopyrite (Cp) replaced by biotite (Bio) filling in fissures of vein quartz (Q), TM206; F. In meta-calcic siltstone containing galena and sphalerite veinlets, overgrowth of galena (Gn) near disseminated pyrite grains (Py), DD-16, 1 180 m level of the Dadonggou, reflected light; G. Galena veinlets in fissures of quartz, DD-16, 1 180 m level of the Dadonggou; H. Overgrowth of galena (Gn) sphalerite (Sp) along minimum stress in the NW-SE direction of disseminated pyrite within meta-calcic siltstone, 1 180 m level of the Dadonggou, DD-15, reflected light

一温度 $t_{K(\text{total})}$ 为 $243.1 \sim 412.1^\circ\text{C}$ 。

克兰火山盆地 NW 段,距铁木尔特 NW15 km 左右的大东沟铅锌矿床,同构造的含铜白色-灰白色石英脉也很发育,包括顺层分布的黄铁矿化石英脉和斜切围岩(绿泥石化钙质砂岩等)的石英脉。这些石英脉中也产出大量的碳质流体包裹体(图 4),其产出特征与铁木尔特相似。7 件石英样品 130 个碳质流体包裹体的显微测温结果表明,其均一情况也有 2 种 L_{CO_2} 型包裹体的 $t_{n(\text{CO}_2)}$ 为 $-59.4 \sim -60.4^\circ\text{C}$, $t_{K(\text{CO}_2)}$ 为 $-10.5 \sim +15.2^\circ\text{C}$; $\text{L}_{\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2}$ 型包裹体的 $t_{n(\text{CO}_2)}$ 为 $-83.4 \sim -60.0^\circ\text{C}$, $t_{K(\text{CO}_2)}$ 为 $-33.3 \sim +16.9^\circ\text{C}$ 。拉曼探针也证实具有很高的 N_2 , 有时有 CH_4 。与碳质流体包裹体共生的 $\text{L}_{\text{CO}_2\text{-L}_{\text{H}_2\text{O}}}$ 型包裹体完全均一温度变化较大, $t_{K(\text{total})}$ 为 $209 \sim 430^\circ\text{C}$ (33 个测数)。

4 讨论

4.1 碳质流体是 VMS 的吗?

碳质流体包裹体是指无水的 $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ 体系 (Van den Kerkhof et al., 2001)。纯 CO_2 流体包裹体常见于地幔橄榄岩和高级变质岩(如麻粒岩)中 (Roedder, 1984; Vanden Kerkhof et al., 2001; Deiens, 2002), CH_4 是低级变质岩中重要的挥发分,而富 N_2 包裹体则发现于榴辉岩中 (Anderson et al., 1990)。造山型金矿的成矿流体以低盐度、富 CO_2 的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 流体为特征已成共识 (Groves et al., 1998; Goldfarb et al., 2001; 范宏瑞等, 2003; Fan et al., 2003; Phillips et al., 2004), 但近年来在某些造山型金矿床中也发现大量无水的纯 CO_2 流体或 $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 流体 (Schmidt et al., 1997; Graupner et al., 2001; Wilde et al., 2001; Xu et al., 2005; 徐九华等, 2007; Chi et al., 2006)。

正如前述, VMS 型矿床的成矿流体一般为简单的盐-水

体系, CO_2 流体包裹体为次要的类型 (Ulrich et al., 2002; Zaw et al., 2003)。在多数 VMS 矿床中, CO_2 很少对成矿有贡献, 如 Iberian 黄铁矿带 (Inverno et al., 2008) 和 Eskay Creek 矿床 (Sherlock et al., 1999)。也有学者认为 CO_2 可存在于 VMS 的原生包裹体中, 但其含量很低 (Zaw et al., 2003)。对南非 Barbarton 绿岩带豆荚状铁矿体的 CO_2 流体, de Ronde 等 (1997) 认为是岩浆成因, 并没有考虑绿片岩相的变质作用。Hou 等 (2008) 认为甘肃白银厂 VMS 矿床存在的单相 CO_2 包裹体、两相 CO_2 包裹体、 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体代表了岩浆流体的贡献。对川西呷村 VMS 矿床的流体研究也有类似的结果 (Hou et al., 2001)。Appel 等 (2001) 在西格林兰 Isua 绿岩带早太古代海底热液体系中发现纯 CH_4 包裹体, 认为是独立于盐水体系的流体。Inverno 等 (2008) 对 Iberian 黄铁矿带的研究认为, CO_2 对原始成矿流体并没有贡献。但川西呷村矿床和甘肃白银厂矿床被认为有岩浆热液的贡献或是流体端员的混合 (Hou et al., 2008; 侯增谦等, 2003; 刘斌, 1982)。少量的高盐度包裹体也被认为与海底热卤水有关 (Moura, 2005)。

就铁木尔特矿床而言, 笔者对 VMS 期的层状闪锌矿和重晶石进行了包裹体研究。由于闪锌矿解理发育, 在后期改造中大部分包裹体已遭破坏。对闪锌矿样品 TM-303A、TM-303B 中残留的少量 L-V 型包裹体显微测温表明, 一些包裹体 410°C 以上破裂, 另有少量包裹体 550°C 仍未均一。可以推测, 在阿尔泰地区晚泥盆世—早石炭世的区域变质作用中, 大部分包裹体已受高温破坏。激光拉曼探针分析表明, 闪锌矿中“包裹体”几乎没有谱峰, 因此推断它们只是一些空洞。重晶石样品 TM-7 显微测温表明, L-V 型包裹体最终均一温度 $t_{K(\text{total})}$ 为 $170 \sim 327^\circ\text{C}$ 。激光拉曼探针分析其成分主要为 H_2O , 考虑到重晶石是一种易于溶解和再沉淀的矿物, 经多次构造-热液叠加改造后, 其流体包裹体易发生泄漏和颈缩, 致使包裹体失去测温意义。

含铜石英脉中的原生高盐度流体包裹体组合的最终均一温度 $t_{K(\text{total})}$ 为 $354 \sim 512.1^\circ\text{C}$, 均一过程中部分包裹体气泡

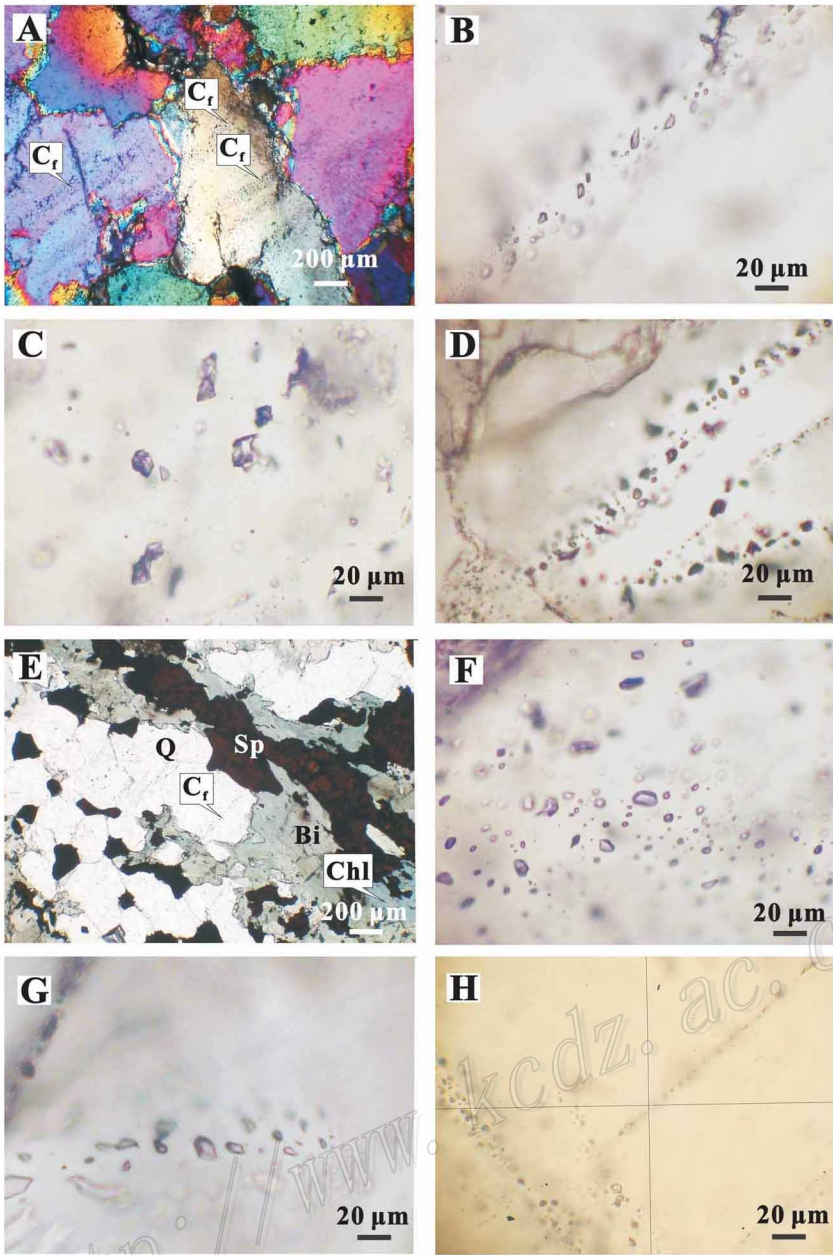


图 4 阿尔泰铁木尔特-大东沟铅-锌矿床的碳质流体包裹体

A. 穿切石英颗粒边界的碳质流体包裹体(C_f),大东沟 DD-2; B. 照片 A 中心部位的碳质流体包裹体; C. 分布于单个石英颗粒内的碳质流体包裹体,大东沟 DD29; D. 绿泥片岩中同构造变质石英脉中的碳质流体包裹体,大东沟 DD34; E. 闪锌矿(Sp)-绿泥石(Chl)-黑云母(Bi)和透镜状石英(Q)沿 NW-SE 向片理分布,垂直方向(NE-SW)分布面状碳质流体包裹体群(C_f),铁木尔特 TM-1,单偏光; F. 闪锌矿-黑云母中透镜状石英内的碳质流体包裹体,铁木尔特 TM-1; G. 层状闪锌矿-方铅矿间石英颗粒边缘的碳质流体包裹体,铁木尔特 TM303B; H. NE-SW 分布的碳质流体被 NW-SE 向的碳质流体截断,铁木尔特 TM205

Fig. 4 Carbonic fluid inclusions in vein quartz of the Tiemurte and the Dadonggou lead-zinc deposits, Altay

A. Carbonic fluid inclusions (C_f) cutting across boundaries of the quartz grains, Dadonggou DD-2; B. Carbonic fluid inclusions at the center of photo 1; C. Carbonic fluid inclusions restricted within single quartz grains, Dadonggou DD29; D. Carbonic fluid inclusions occurring in metamorphic quartz vein within chlorite schist, Dadonggou DD34; E. Carbonic fluid inclusions (C_f) distributed vertical to foliation structure (NW-SE) of sphalerite (Sp)-chlorite (Chl)-biotite (Bi), Tiemurte TM-1; F. Carbonic fluid inclusions in quartz lens within sphalerite-biotite, Tiemurte TM-1; G. Carbonic fluid inclusions occurring on the margin of quartz, Tiemurte TM303B; H. Two groups of carbonic fluid inclusions in quartz,

Tiemurte TM205

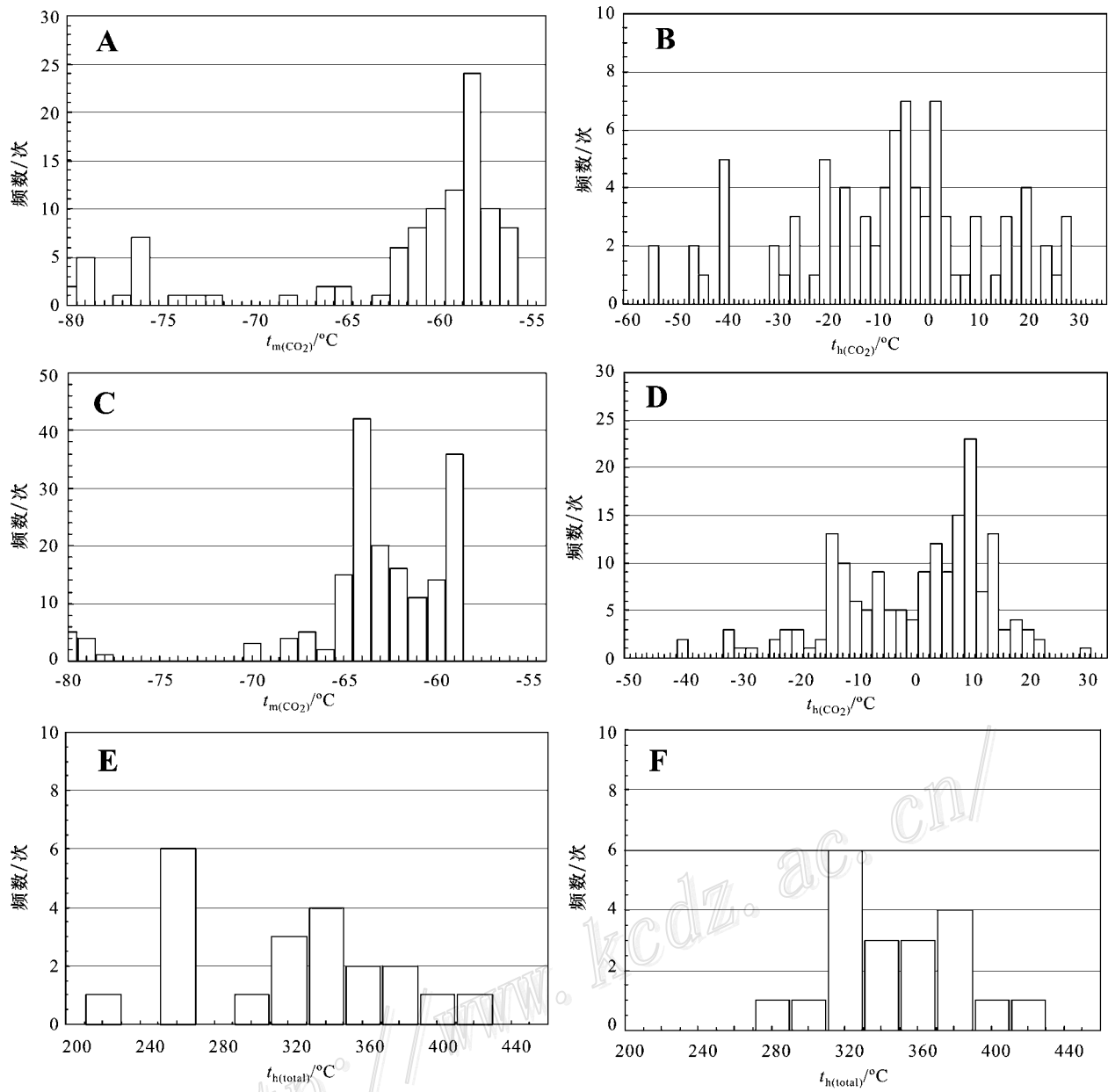


图5 阿尔泰铁木尔特-大东沟铅(铜)矿床的碳质流体包裹体显微测温结果

A. 铁木尔特碳质流体包裹体固相熔化温度 $t_{m(\text{CO}_2)}$; B. 铁木尔特碳质流体包裹体均一温度 $t_{h(\text{CO}_2)}$; C. 大东沟碳质流体包裹体固相熔化温度 $t_{m(\text{CO}_2)}$; D. 大东沟碳质流体包裹体均一温度 $t_{h(\text{CO}_2)}$; E. 铁木尔特与碳质流体包裹体共生的 $\text{L}_{\text{CO}_2}\text{-L}_{\text{H}_2\text{O}}$ 型包裹体均一温度 $t_{h(\text{total})}$; F. 大东沟与碳质流体包裹体共生的 $\text{L}_{\text{CO}_2}\text{-L}_{\text{H}_2\text{O}}$ 型包裹体均一温度 $t_{h(\text{total})}$

Fig. 5 Microthermometry of carbonic fluid inclusions from the Tiemurte and the Dadonggou Pb-Zn(Cu) deposits, Altay
A. Solid melting temperatures $t_{m(\text{CO}_2)}$ of carbonic fluid inclusions in the Tiemurte deposit; B. Homogenization temperatures $t_{h(\text{CO}_2)}$ of carbonic fluid inclusions in the Tiemurte deposit; C. Solid melting temperatures $t_{m(\text{CO}_2)}$ of carbonic fluid inclusions in the Dadonggou deposit; D. Homogenization temperatures $t_{h(\text{CO}_2)}$ of carbonic fluid inclusions in the Dadonggou deposit; E. Homogenization temperatures of $\text{L}_{\text{CO}_2}\text{-L}_{\text{H}_2\text{O}}$ inclusions associated with carbonic inclusions in the Tiemurte deposit; F. Homogenization temperatures of $\text{L}_{\text{CO}_2}\text{-L}_{\text{H}_2\text{O}}$ inclusions associated with carbonic inclusions in the Dadonggou deposit

和部分 NaCl 子晶分别在 203~209℃ 和 210~330℃ 先消失, 流体盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 32.39%~42.68%, 反映了变质早期的流体特征。

很多研究者认为 VMS 矿床中富 CO_2 流体反映了后来的热事件。Bradshaw 等(2008)对加拿大 Wolverine 矿床的研究表明该矿床丰富的 CO_2 - CH_4 流体包裹体具有次生特征, 并认为是变质成因的。Inverno 等(2008)也认为葡萄牙 Feitais VMS 矿床的富 CO_2 次生包裹体与区域变质有关。Moura (2005)认为 CO_2 - CH_4 流体来自富有机质沉积岩的变质过程, 如 Neves Corvo Cu-Sn-(Zn) 矿床。常海亮(1997)发现阿尔泰阿舍勒 VMS 铜锌矿的晚期黄铁矿-石英脉存在大量次生的纯液态 CO_2 流体包裹体, 流体的 Rb-Sr 同位素年龄为 304 Ma (晚于 VMS 矿床形成 80 Ma 左右), 形成压力估算为 170 MPa, 与阿舍勒盆地古沉积深度不符。因此, 笔者认为阿舍勒铜锌矿的次生 L_{CO_2} 包裹体形成于区域变质热液期。一些作者还认为, 变质作用使得 VMS 矿床中的原生包裹体都已遭到破坏, 已不能代表矿化流体的特征, 所形成的变质成因

包裹体, 既有愈合裂隙中的次生包裹体, 又有淋失和破裂的包裹体(Gilles et al., 1994; Marshall et al., 2000)。Marignac 等(2003)报道了 Tharsis VMS 矿床及区域上富 CO_2 - CH_4 - N_2 的包裹体, 但大多是愈合裂隙中的变质成因流体。在考察多个矿床的实例后, Marshall 等(2000)得出结论, 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。

根据变质相带的研究(徐学纯等, 2005; 郑常青等, 2005), 阿勒泰及克拉斯盆地周边地区属红柱石-矽线石型递进变质带, 铁木尔特-大东沟位于变质带中间变质程度相对较低的绿泥石-黑云母带和黑云母-石榴子石带。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, 获得黑云母带变质作用的温度为 445~550℃、压力 0.2~0.6 GPa; 石榴子石带为 480~566℃、(0.54±0.22) GPa。这些温度、压力范围可视为与变质流体被捕获的温压条件相当。铁木尔特与碳质流体共生的 L_{CO_2} - $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ 型包裹体 CO_2 相的 $t_{\text{m}(\text{CO}_2)}$ 为 -66.9~-60.9℃, $t_{\text{h}(\text{CO}_2)}$ 为 -13.3~-2.3℃, 包裹体的完全均一温度 $t_{\text{h}(\text{total})}$ 为 243.1~412.1℃, 大东沟 L_{CO_2} -

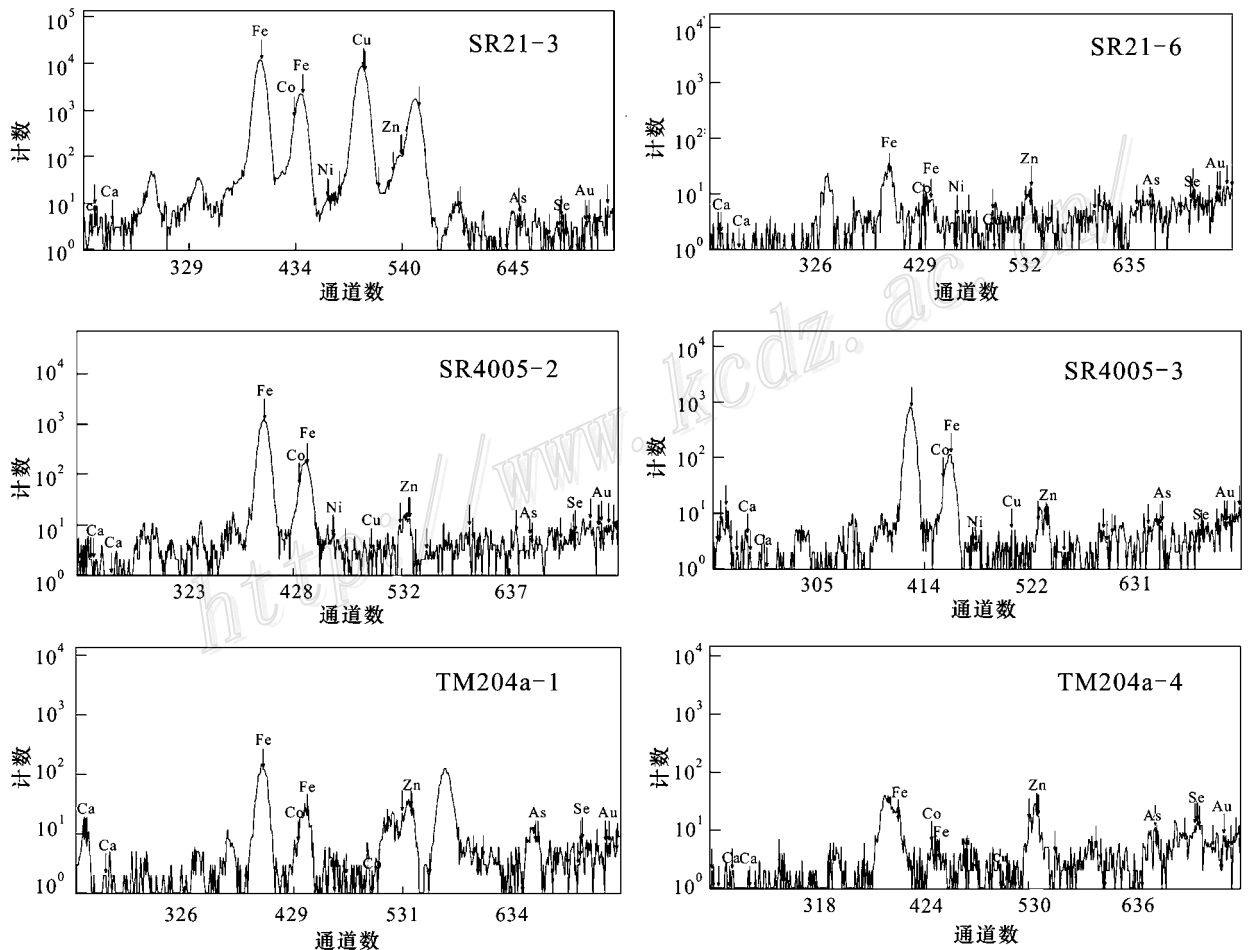


图 6 萨热阔布、铁木尔特碳质流体包裹体 SRXRF 测量谱图

Fig. 6 SRXRF spectrum of carbonic fluid inclusions from the Sareoubu and the Tiemurte deposits

L_{H_2O} 型包裹体的 $t_{K(total)}$ 为 209~430℃。因均一温度是捕获温度的下限,所以低于由相平衡计算的温度。根据铁木尔特 VMS 矿床的碳质流体包裹体的 $t_{K(CO_2)}$ 可获得 CO_2 密度,结合共生的 L_{CO_2} - L_{H_2O} 包裹体的 $t_{K(total)}$ 和 Van den Kerkhof(2001) 的 CO_2 流体高温-高压相图,可估算包裹体的捕获压力约为 180~300 MPa,这相当于在 6.7~11.1 km 深的静岩围压条件(Roedder,1984)下捕获,可以解释为与造山和变质环境符合,与 VMS 无关。若按静水压力估算,则其深度将达 18~30 km,更不可能解释为与 VMS 有关。臧文栓等(2007)从 X 射线获得的岩石组构中的石英光轴点极密与宏观构造面理的关系分析,在韧性构造变形过程中,按正常温压梯度推算,石英的变形深度约为 10~15 km,变形围压为 0.25~0.40 GPa,与包裹体研究的结果比较接近。

4.2 碳质流体与矿化

值得注意的是,同处于克兰盆地内位于阿巴宫-库尔提断裂附近的晚石炭纪造山型萨热阔布金矿,其主成矿阶段也发育有大量高密度纯 CO_2 (或 CO_2 - CH_4)流体包裹体(Xu et al., 2005; Xu et al., 2008)。该金矿的形成时期(Ar-Ar 年龄 320 Ma,丁汝福等,2001)相当于代表造山作用主期的第二期变质作用(365~280 Ma)(徐学纯等,2005),这正是热流活动伴随有强烈构造变形和岩浆活动的时期。铁木尔特和大东沟的次生碳质流体组合与萨热阔布金矿的 CO_2 流体有何区别?笔者

者进行了单个包裹体内重金属微量元素的比较研究。

同步辐射 X 射线荧光(SRXRF)是当今对单个流体包裹体中的重金属微量元素进行定量分析的几种重要方法之一。近年来,国际上用同步辐射 X 射线荧光(SRXRF)微探针对单个流体包裹体做无损分析研究取得了较快的进展。邬春学等(2002)将这一技术应用于分析石油地质中有机包裹体的成分,连玉等(2008)、李建康等(2008)则开展了金属矿床的气液包裹体研究。为了查明萨热阔布金矿床和铁木尔特碳质流体包裹体的重金属微量元素特征及其区别,笔者利用 SRXRF 技术对单个碳质流体包裹体进行了微量元素测定,实验条件和数据处理详见连玉等(2008)、李建康等(2008)及相关文献。此次研究共测试了 20 余个包裹体,经拟合、归一化、扣除本底和吸收校正等数据处理步骤,得出各元素的受激荧光计数图(图 6),然后用标样比较算出各微量元素的含量(表 1)。测试结果较理想的包裹体(直径均大于 20 μm)有 SR4005-2、SR4005-3 和 SR21-3(萨热阔布黄铁矿-黄铜矿石英脉),以及 TM204a-1 和 TM204a-4(铁木尔特铅锌矿中含黄铜矿石英脉)。包裹体岩相学观察表明,SR4005、SR21 样品中碳质流体包裹体多为原生,而 TM204 样品中的多为次生。结果显示,碳质流体包裹体中很多重金属微量元素含量相近,但 TM204 的碳质包裹体中没有检出 Au、As 等与金矿化密切相关的元素,而 SR4005、SR21 的碳质包裹体检出 Au 或 As 含量却很高(表 1),说明萨热阔布的碳质流体对金矿化有贡献。

表 1 萨热阔布-铁木尔特碳质流体包裹体重金属微量元素 SRXRF 分析结果($w_B/10^{-6}$)

元素	萨热阔布金矿含金多金属硫化物石英脉				铁木尔特黄铜矿石英脉	
	R21-3	SR21-6	SR4005-2	SR4005-3	TM204a-1	TM204a-4
Ti	60.13	5.86	197.56	134.91	44.49	24.76
V	3.75	2.58	9.21	—	—	—
Cr	7.22	4.92	10.06	14.00	6.23	4.95
Mn	0.96	2.38	9.60	8.28	6.23	—
Fe	95.64	3.30	392.91	240.36	36.59	11.36
Co	3.18	1.28	7.28	4.92	0.80	0.57
Ni	0.12	—	0.34	0.21	—	4.43
Cu	0.52	0.31	—	0.17	0.12	0.16
Zn	0.45	0.36	1.58	1.78	4.66	3.85
Ga	0.20	—	0.17	0.09	16.31	—
Ge	0.03	0.10	—	0.39	—	0.54
As	0.29	—	—	2.17	—	—
Se	0.15	—	0.02	0.05	—	1.45
Rb	0.12	—	0.08	0.47	—	0.20
Ag	23.87	—	22.37	68.37	22.25	43.34
Yb	2.65	10.21	3.45	2.57	—	—
W	—	—	—	0.25	1.01	1.84
Au	—	17.33	1.49	4.38	—	—
Tl	—	0.92	—	1.14	—	—
Pb	—	0.02	0.20	—	1.75	2.17
Bi	0.12	1.44	0.26	—	0.15	—

测试单位:中国科学院高能物理研究所 XRF 站。“—”表示未检出。

然而,铁木尔特的碳质流体为什么没有形成有意义的金矿化,这可能与地质背景有关,在泥盆纪断陷火山-沉积盆地阶段,盆地西北边缘的萨热阔布已形成了金的初步富集,为后来造山型金矿的形成创造了条件,而处于深水洼地的铁木尔特没有金的预富集,造山过程的碳质流体没有带来 Au 的叠加矿化。另外,铁木尔特碳质流体 Pb 、 Zn 含量略高于萨热阔布的,但 Cu 的含量都较低。本次 SRXRF 的研究是初步的,有待于进一步工作进行探讨。

5 结 论

(1) 阿尔泰克拉斯火山-沉积盆地的 VMS 型矿床经历了强烈的区域变质和后期热液成矿作用,同构造石英脉和穿切层状铅锌矿化的脉状铜矿化很发育。矿石中反映压力-重结晶作用的各种结构非常清楚,具体表现有碎斑结构、交代结构、塑性流动结构或揉皱变晶结构、斑状变晶结构、压力影结构和碎裂结构等。

(2) 克拉斯盆地铅(铜)矿床的包裹体研究表明,在矿化构造岩和硫化物石英脉中存在极丰富的碳质(CO_2 - CH_4 - N_2)流体。与碳质流体共生的 L_{CO_2} - L_{H_2O} 型包裹体均一温度为 $243.1 \sim 412.1^\circ C$ (铁木尔特)和 $209 \sim 430^\circ C$ (大东沟),碳质流体的捕获压力估算为 $180 \sim 300$ MPa。这些特征与区域变质的温压条件相当,与 VMS 无关。

(3) 同步辐射 X 射线荧光 (SRXRF) 单个包裹体重金属微量元素的初步分析表明,造山型萨热阔布金矿的碳质流体中检出有 Au 、 As ,而在铁木尔特没有检出,说明碳质流体对 Au 成矿有贡献,并且与地质背景有关。

志 谢 本论文涉及的野外工作得到北京矿产地质研究院丁汝福教授、新疆阿尔泰有色地质 706 队郭正林总工程师、新疆第四地质大队周刚总工程师等同仁和有关部门的帮助,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,在此一并志谢。

References

- Anderson T, Austrheim H and Burke E A J. 1990. Fluid inclusions in granulites and eclogites from the Bergen Arcs, Caledonian of Norway[J]. *Minerl. Mag.*, 54 : 145-158.
- Appel P W U, Rollinson H R and Touret J L R. 2001. Remnants of an Early Archaean (>3.75 Ga) sea-floor, hydrothermal system in the Isua Greenstone Belt[J]. *Precambrian Research*, 112 : 27-49.
- Bischoff J L and Rosenbauer R J. 1985. An empirical equation of state for hydrothermal seawater (3.2 percent NaCl)[J]. *American Journal of Science*, 285 : 725-763.
- Bradshaw G D, Rowins S M, Peter J M and Taylor B E. 2008. Genesis of the Wolverine volcanic sediment-hosted massive sulphide deposit, Finlayson Lake District, Yukon, Canada: Mineral chemical, fluid inclusion, and sulphur isotope evidence[J]. *Econ. Geol.*, 103 : 35-60.
- Chai F M, Mao J W, Dong L H, Yang F Q, Liu F, Geng X X, Yang Z X and Huang C K. 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 H L. 1997. Characteristics of fluid inclusions in the Ashele No. 1 copper-zinc deposit, Xinjiang[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 23-32 (in Chinese with English abstract).
- Chen H Y, Chen Y J and Liu Y L. 2000. Metallogenesis of the Ertix gold belt, Xinjiang and its relationship to Central Asia-type orogenesis[J]. *Sci. in China (Series D)*, 30(Supp.): 38-44 (in Chinese).
- Chen Y J, Zhang J and Lai Y. 2001. Continental geodynamics and metallogenesis[M]. Beijing: Seismological Press. 12-24, 216-230 (in Chinese with English abstract).
- Chi G X, Dube' B, Williamson K and Williams-Jones A E. 2006. Formation of the Campbell-Red Lake gold deposit by H_2O -poor, CO_2 -dominated fluids[J]. *Mineralium Deposita*, 40 : 726-741.
- Craig J R and Vokes F M. 1993. The metamorphism of pyrite and pyritic ores: An overview[J]. *Mineral. Mag.*, 57(1): 3-18.
- Deines P. 2002. The carbon isotope geochemistry of mantle xenoliths[J]. *Earth-Science Reviews*, 58(3-4): 247-278.
- Ding R F, Wang J B, Ma Z M, Zhang J H and Fang T H. 2001. Geochemical characteristics of the Sarekoubo volcanic exhalation-sedimentary-superimposition gold deposit in Xinjiang[J]. *Geol. & Prospec.*, 37(3): 11-15 (in Chinese with English abstract).
- Dong Y G, Zhang C L, Rui H J, Zhao Y, Guo K Y, Zhang S L, Yuan X Y and Hu X F. 2002. Gold and copper mineralization in the Habahe-Burjin Drainage Area[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-19 (in Chinese with English abstract).
- Duckworth R C and Rickard D. 1993. Sulphide mylonites from the Renstrom VMS deposit, northern Sweden[J]. *Mineral. Mag.*, 57 : 83-92.
- Fan H R, Xie Y H, Zhai M G and Jin C W. 2003. A three stage fluid model for Xiaolinling lode gold metallogenesis in the Henan and Shaanxi Provinces, central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 260-266 (in Chinese with English abstract).
- Fan H R, Zhai M G and Xie Y H. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 38 : 739-750.
- Gilles A D and Marshall B. 1994. Fluid inclusions studies on a multiply deformed, metamorphosed volcanic-associated massive sulfide deposit, Joma Mine, Norway[J]. *Econ. Geol.*, 9 : 803-819.
- Goldfarb R J, Groves D I and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis[J]. *Ore Geol. Rev.*, 18 : 1-75.
- Graupner T, Kempe U, Spooner E T C, Bray C J, Kremenetsky A A and Irmer G. 2001. Microthermometric, Laser Raman Spectroscopic, and Volatile-ion Chromatographic Analysis of hydrothermal

- fluids in the Paleozoic Muruntau Au-bearing quartz vein ore field , Uzbekistan[J]. *Econ. Geol.* , 96 : 1-23.
- Groves D I , Goldfarb R J , Gebre-Mariam M , Hagemann S G and Robert F. 1998. Orogenic gold deposits : A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geol. Rev.* , 13 : 7-27.
- Gu L X , Tang X Q , Wu C Z , Lu J J , Xiao X J , Zhen Y C , Ni P and Tian Z M. 2004a. Mechanisms of Cu-Au enrichment in ore mylonites of the Hongtoushan massive sulphide deposit , Liaoning , NE China[J]. *Earth Science Frontiers* , 11(2) : 339-351(in Chinese with English abstract).
- Gu L X , Tang X Q , Zheng Y C , Wu C Z , Tian Z M , Lu J J , Xiao X J and Ni P. 2004b. Deformation , metamorphism and ore-component remobilization of the Archean massive sulphide deposit at Hongtoushan , Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 20 (4) : 923-934(in Chinese with English abstract).
- Gu L X , Zheng Y C and Tang X Q. 2007. Copper , gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit , N. E. China[J]. *Ore Geol. Rev.* , 30 : 1-29.
- Hou Z Q , Zaw K , Qu X M , Ye Q T , Yu J J , Xu M J , Fu D M and Yin X K. 2001. Origin of the Gacun volcanic-hosted massive sulfide deposit in Sichuan , China : Fluid inclusion and oxygen isotope evidence[J]. *Econ. Geol.* , 96 : 1491-1512.
- Hou Z Q , Han F , Xia L Q , Han F , Xia L Q , Zhang Q L , Qu X M , Li Z Q , Bie F L , Wang L Q , Yu J J and Tang S H. 2003. Hydrothermal systems and metallogeny on the modern and ancient seafloor : Case study on some VMS deposits[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 301-315(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q , Zaw K , Rona P , Li Y Q , Qu X M , Song S H , Peng L G and Huang J J. 2008. Geology , fluid inclusions , and oxygen isotope geochemistry of the Baiyinchang pipe-style volcanic-hosted massive sulphide Cu deposit in Gansu Province , northwestern China[J]. *Econ. Geol.* , 103 : 269-292.
- Inverno C M C , Solomon M , Barton and Foden J. 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]. *Econ. Geol.* , 103 : 241-267.
- Li J K , Wang D H , Liu S B , Ying L J , Wang C H and Chen D L. 2008. SRXRF microprobe study of fluid inclusions for pegmatite deposits in western Sichuan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia* , 32(3) : 332-337(in Chinese with English abstract).
- Lian Y , Xu W Y , Yan G D , Chen W S , Qu X M and Chen D L. 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 B. 1982. Solid and fluid inclusions in quartz from Baiyinchang copper deposit[J]. *Acta Geologica Sinica* , 56 : 156-173(in Chinese with English abstract).
- Mao J W , Pirajno F , Zhang Z H , Chai F M , Wu H , Chen S P , Cheng L S , Yang J M and Zhang C Q. 2008. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens(Xinjiang Autonomous Region , NW China) : Principal characteristics and ore-forming processes[J]. *J. Asian Earth Sci.* , 32(2-4) : 184-203.
- Marignac C , Diagona B , Cathelineau M , Boiron M-C , Banks D , Fourcade S and Vallance J. 2003. Remobilization of base metals and gold by Variscan metamorphic fluids in the south Iberian pyrite belt : Evidence from the Tharsis VMS deposit[J]. *Chem. Geol.* , 194 : 143-165.
- Marshall B and Gilligan L B. 1987. An introduction to remobilization : Information from ore-body geometry and experimental considerations[J]. *Ore Geol. Rev.* , 2 : 87-131.
- Marshall B , Vokes F and Larouque A. 2000. Regional metamorphic remobilization : Upgrading and formation of ore deposits[A]. In : Spy P , Marshall B and Vokes F , ed. *Metamorphosed and metamorphogenic ore deposits : Reviews in economic geology*[C]. 11 : 19-38.
- McClay K R. 1983. Structural evolution of the Sullivan Fe-Pb-Zn-Ag orebody , Kimberley , British Columbia , Canada[J]. *Econ. Geol.* , 78 : 1398-1424.
- Moura A. 2005. Fluids from the Neves Corvo massive sulphide ores , Iberian pyrite belt , Portugal[J]. *Chem. Geol.* , 223 : 153-169.
- Niu H C , Yu X Y , Xu J F , Shan Q , Chen F R , Zhang H X and Zheng Z P. 2006. Late Palaeozoic volcanism and associated metallogenesis in the Altay area , Xinjiang , China[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 1282p(in Chinese with English abstract).
- Phillips G N and Evans K A. 2004. Role of CO₂ in the formation of gold deposits[J]. *Nature* , 429 : 860-863.
- Qiu Z G (Chief editor). 1982. *Ore petrography*[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 153-182(in Chinese).
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions : Reviews in mineralogy V 12[M]. Reston : American Mineralogist. 644p
- Schmidt M A , Oberthür T , Vetter U and Blenkinsop T G. 1997. High CO₂ content of fluid inclusions in gold mineralisations in the Ashanti Belt , Ghana : A new category of ore forming fluids[J]. *Mineralium Deposita* , 32 : 107-118.
- Schmidt M A , Oberthür T , Vetter U and Blenkinsop T G. 1998. High CO₂ content of fluid inclusions in gold mineralisations in the Ashanti Belt , Ghana : A new category of ore forming fluids ? —A reply[J]. *Mineralium Deposita* , 33 : 320-322.
- Sherlock R I , Roch T , Spooner T C and Bray C J. 1999. Origin of the Eskay Creek precious metal-rich volcanogenic massive sulfide deposit : Fluid inclusion and stable isotope evidence[J]. *Econ. Geol.* , 94 : 803-824.
- Spray P G , Plimer I R and Teale G S. 2008. Did the giant Broken Hill (Australia) Zn-Pb-Ag deposit melt ?[J]. *Ore Geol. Rev.* , 34(3) : 223-241.
- Ulrich T , Golding S D , Kamber B S , Zaw K and Taube A. 2002. Different mineralization styles in a volcanic-hosted ore deposit : the fluid and isotopic signatures of the Mt. Morgan Au-Cu deposit , Australia

- [J]. *Ore Geol. Rev.*, 22: 61-90.
- Van den Kerkhof A and Thiéry R. 2001. Carbonic inclusions[J]. *Lithos*, 55: 49-68.
- Wang J B, Qin K Z, Wu Z L, Hu J H and Deng J N. 1998. Volcanic-exhalative-sedimentary lead-zinc deposits in the southern margin of the Altai, Xinjiang[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 18-95 (in Chinese with English abstract).
- Wang J B, Zhang J H, Ding R F and Fang T H. 2000. Tectonic-metallogenic system in the Altai orogenic belt, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(3): 485-491.
- Wilde A R, Layer P, Mernagh T and Foster J. 2001. The giant Muruntau gold deposit: Geologic, geochronologic, and fluid inclusion constraints on ore genesis[J]. *Econ. Geol.*, 96: 633-644.
- Wu C X, Huang Y Y, Yang C, Li J, He W, Yu Z W, Lin K X and Li K F. 2002. Nondestructive analysis of individual fluid inclusion based on SRXRF and its application in oil geology[J]. *Nuclear Techniques*, 25(10): 793-798 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Badarch G, Sun S, Li J, Qin K Z and Wang Z H. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the lateral growth of Central Asia[J]. *J. Geol. Society, London*, 161: 339-342.
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, Chen H L, Sun M, Lin S F, Li Z L, Mao Q G, Zhang J E, Sun S and Li J L. 2006. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of north Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleasian domain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1062-1076 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Pirajno F and Seltnann R. 2008. Geodynamics and metallogeny of the Altaid orogen[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 32(2-4): 77-81.
- Xu J H, Ding R F, Xie Y L, Zhong C H and Yuan X. 2005. Pure CO₂ fluids in the Sarekoubo gold deposit at southern margin of Altai Mountains in Xinjiang, west China[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 50(4): 333-340.
- Xu J H, Xie Y L, Ding R F, Yin Y J, Shan L H and Zhang G R. 2007. CO₂-CH₄ fluids and gold mineralization: Southern margin of Altai, China, and Muruntau of Uzbekistan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 2026-2032 (in Chinese with English abstract).
- Xu J H, Ding R F, Xie Y L, Zhong C H and Shan L H. 2008. The source of hydrothermal fluids for the Sarekoubo gold deposit in the southern Altai, Xinjiang, China: Evidence from fluid inclusions and geochemistry[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 32: 247-258.
- Xu J H, Shan L H, Ding R F, Craig J H, Wang L L and Wei X F. 2008. Carbonic fluid inclusion assemblages and their geological significance at the Tiemurt lead-zinc deposit, Altai[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2094-2104 (in Chinese with English abstract).
- Xu X C, Zheng C Q and Zhao Q Y. 2005. Metamorphic types and crustal evolution of Hercynian orogenic belt in Altai region, Xinjiang[J]. *J. Jilin Univ. (Earth Sci. Edition)*, 35(1): 7-11 (in Chinese with English abstract).
- Yang F Q, Mao J W, Yan S H, Liu F, Chai F M, Zhou G, Liu G L, He L X, Geng X X and Dai J Z. 2008. Geochronology, geochemistry and geological implications of the Mengku synorogenic plagiogranite pluton in Altai, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 485-499 (in Chinese with English abstract).
- Yin Y Q, Yang Y M, Li J X, Guo Z L and Guo Z X. 2005. Sediment-structural evolution and lead-zinc mineralization in the Devonian volcano-sedimentary Kelan basin in southern Altai, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(4): 475-481 (in Chinese with English abstract).
- Zang W S, Chen B L, Wu G G, Zhang Z C, Yan S H, He L X, Zhou G, Yang W P and Wang X. 2007. X-ray fabric analysis of deformed rocks in the eastern part of the Fuyun-Qinghe area, Altai, Xinjiang, China[J]. *Geol. Bull. China*, 26(9): 1189-1197 (in Chinese with English abstract).
- Zaw K, Hunns S R and Large R R. 2003. Microthermometry and chemical composition of fluid inclusions from the Mt. Chalmers volcanic-hosted massive sulfide deposits, central Queensland, Australia: Implications for ore genesis[J]. *Chem. Geol.*, 194: 225-244.
- Zhang C G, Wei C J, Hou R J, Hou L X and Pu X P. 2007. Phase equilibrium of low-pressure metamorphism in the Altaides, Xinjiang[J]. *Geol. in China*, 34(1): 34-41 (in Chinese with English abstract).
- Zheng C Q, Xu X C, Enami M and Kato T. 2005. Features and PT condition study of the adanulsite-sillimanite type progressive metamorphic belt in Aletai, Xinjiang[J]. *J. Mineral. & Petrol.*, 25(4): 45-51 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F, Wng T and Xu X. 2007. Progress of geology study in Xinjiang and its adjacent regions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1785-1794 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柴凤梅, 毛景文, 董连慧, 杨富全, 刘 锋, 耿新霞, 杨宗喜, 黄承科. 2008. 新疆阿尔泰南缘阿巴宫铁矿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研究[J]. *华南地质与矿产*, (3): 23-32.
- 陈衍景, 张 静, 赖 勇. 2001. 大陆动力学与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社. 12-24, 216-230.
- 陈华勇, 陈衍景, 刘玉琳. 2000. 新疆额尔齐斯金矿带的成矿作用及其与造山作用的关系[J]. *中国科学(D 辑)*, 30(增刊): 38-44.
- 丁汝福, 王京彬, 马忠美, 张进红, 方同辉. 2001. 新疆萨热阔布火山喷流沉积改造型金矿地球化学特征[J]. *地质与勘探*, 37(3): 11-15.
- 董永观, 张传林, 芮行健, 赵 宇, 郭坤一, 张松林, 袁旭音, 胡兴风. 2002. 哈巴河-布尔津河流域金、铜成矿作用研究[M]. 北京: 地质出版社. 1-19.
- 范宏瑞, 谢亦汉, 翟明国, 金成伟. 2003. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用[J]. *岩石学报*, 19(2): 260-266.
- 顾连兴, 汤晓茜, 吴昌志, 陆建军, 肖新建, 郑远川, 倪 培, 田泽满. 2004a. 辽宁红透山块状硫化物矿床矿石糜棱岩铜金富集机制[J]. *地学前缘*, 11(2): 339-351.
- 顾连兴, 汤晓茜, 郑远川, 吴昌志, 田泽满, 陆建军, 肖新建, 倪

- 培. 2004b. 辽宁红透山铜锌块状硫化物矿床的变质变形和成矿组分再活化[J]. 岩石学报, 20(4): 923-934.
- 侯增谦, 韩发, 夏林圻, 张绮玲, 曲晓明, 李振清, 别风雷, 王立全, 余金杰, 唐绍华. 2003. 现代与古代海底热水成矿作用[M]. 北京: 地质出版社.
- 李建康, 王登红, 刘善宝, 应立娟, 王成辉, 陈栋梁. 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.
- 连玉, 徐文艺, 杨丹, 陈伟十, 曲晓明, 陈栋梁. 2008. 西藏冈底斯马和南木矿床流体包裹体 SR-XRF 研究[J]. 岩石矿物学杂志, 27(3): 185-198.
- 刘斌. 1982. 白银厂铜矿床石英中固体和流体包裹体的研究[J]. 地质学报, 56: 156-173.
- 牛贺才, 于学元, 许继峰, 单强, 陈繁荣, 张海洋, 郑作平. 2006. 中国新疆阿尔泰晚古生代火山作用及成矿[M]. 北京: 地质出版社. 1282 页.
- 邱柱国(主编). 1982. 矿相学. 北京: 地质出版社. 161-185.
- 王京彬, 秦克章, 吴志亮, 胡建辉, 邓吉牛. 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. 18-95.
- 邬春学, 黄宇营, 杨春, 李劲, 何伟, 余镇危, 林克湘, 李葵发. 2002. 基于 SR-XRF 的单个流体包裹体无损分析及其在石油地质中的应用[J]. 核技术, 25(10): 793-798.
- 肖文交, 韩春明, 袁超, 陈汉林, 孙敏, 林寿发, 厉子龙, 毛启贵, 张继恩, 孙枢, 李继亮. 2006. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. 岩石学报, 22(5): 1062-1076.
- 徐九华, 谢玉玲, 丁汝福, 阴元军, 单立华, 张国瑞. 2007. CO₂-CH₄ 流体与金成矿作用: 以阿尔泰山南缘和穆龙套金矿为例[J]. 岩石学报, 23(8): 2026-2032.
- 徐九华, 单立华, 丁汝福, Craig J H, 王琳琳, 卫晓锋. 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): 2094-2104.
- 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.
- 杨富全, 毛景文, 闫升好, 刘锋, 柴凤梅, 周刚, 刘国仁, 何立新, 耿新霞, 代军治. 2008. 新疆阿尔泰蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. 地质学报, 82(4): 485-499.
- 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[J]. 大地构造与成矿学, 29(4): 475-481.
- 臧文栓, 陈柏林, 吴淦国, 张招崇, 闫升好, 何立新, 周刚, 杨文平, 王祥. 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, 后立胜, 卜小平. 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.
- 郑常青, 徐学纯, Enami M, Kato T. 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, 25(4): 45-51.
- 朱永峰, 王涛, 徐新. 2007. 新疆及邻区地质与矿产研究进展[J]. 岩石学报, 23(8): 1785-1794.