

文章编号: 0258-7106(2012)05-1025-13

新疆阿尔泰托莫尔特铁(锰)矿床成矿流体研究*

张志欣^{1,2} 杨富全² 黄承科³ 刘 锋² 柴凤梅⁴ 耿新霞²

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所 新疆矿产资源研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2 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; 3 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 706 队, 新疆 阿勒泰 836500; 4 新疆大学 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘 要 托莫尔特铁(锰)矿床赋存于上志留统—下泥盆统康布铁堡组上亚组变质火山-沉积岩系中。矿床的形成经历了火山沉积期、岩浆热液叠加改造期和区域变质期,火山沉积期为铁和锰主要成矿期。火山沉积期石英中流体包裹体类型以气液两相包裹体为主,均一温度集中于 170~300℃,峰值为 190℃,流体的 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 3.23%~22.71%,密度为 0.62~1.09 g/cm³,气相和液相成分表明成矿流体富含 Na⁺、Cl⁻ 和 H₂O,为中-低温、中-低盐度、中-低密度的 H₂O-NaCl 体系。区域变质期石英中以发育含液体 CO₂ 包裹体为特征,完全均一温度介于 210~523℃, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 4.80%~11.33%,密度为 0.85~1.05 g/cm³,气相和液相成分表明流体富含 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₂、CH₄、C₂H₆ 和 N₂,显示成矿流体为中-高温、中-低盐度、中-低密度的 H₂O-CO₂-CH₄-N₂-NaCl 体系。氢和氧同位素特征表明,火山沉积期成矿流体为海水和岩浆水的混合,区域变质期成矿流体主要为变质水混合深循环的大气降水。

关键词 地球化学;成矿流体;氢氧同位素;铁(锰)矿;托莫尔特;阿尔泰

中图分类号: P618.31; P618.32

文献标志码: A

A study of ore-forming fluids of Tuomoerte Fe-(Mn) deposit in Altay, Xinjiang

ZHANG ZhiXin^{1,2}, YANG FuQuan², HUANG ChengKe³, LIU Feng², CHAI FengMei⁴ and
GENG XinXia²

(1 Xinjiang Research Center for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 No. 706 Geological Party, Xinjiang Nonferrous Geoexploration Bureau, Altay 836500, Xinjiang, China; 4 Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract

The Tuomoerte Fe-(Mn) deposit occurs in metavolcanic-sedimentary sequence within the upper subformation of Upper Silurian-Lower Devonian Kangbutiebao Formation. Field evidence and petrographic observation indicate three periods of metallogenesis, i. e., volcano-sedimentation, magmatic-hydrothermal activity and regional metamorphism. The majority of the Fe-Mn metallogenic activity occurred during the volcano-sedimentation period. The homogenization temperatures of the liquid inclusions in quartz of the volcano-sedimentation period are concentrated between 170℃ and 300℃, with a peak temperature of 190℃, the salinities range from 3.23% to 22.71%, and the densities range from 0.62 to 1.09 g/cm³. The vapor and liquid composition of fluid

* 本文为国家科技支撑计划项目(编号:2006BAB07B02-01、2011BAB06B03-02)和公益性行业科研专项经费项目(编号:201211073)联合资助的成果

第一作者简介 张志欣,男,1984年生,研究实习员,从事矿床地质、地球化学研究。Email: ddzhangzhixin@163.com

收稿日期 2012-06-01; 改回日期 2012-08-29。秦思婷编辑。

inclusions in this period show that the ore-forming fluid was rich in Na^+ , Cl^- and H_2O , indicating that the ore-forming fluid was of moderate-low temperature, moderate-low salinity and moderate-low density, belonging to the H_2O - NaCl system. In regional metamorphism period, it was characterized by CO_2 -bearing three-phase fluid inclusions in quartz. Homogenization temperatures of this type of fluid inclusions vary from 210°C to 523°C , salinities range from 4.80% to 11.33%, and densities range from 0.85 to 1.05 g/cm^3 . The vapor and liquid compositions of fluid inclusions in the regional metamorphism period show that the ore-forming fluid was rich in Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 and N_2 and characterized by moderate-high temperature, moderate-low salinity and moderate-low density, belonging to the H_2O - CO_2 - CH_4 - N_2 - NaCl system. The oxygen and hydrogen isotopic characteristics of quartz imply that the ore-forming fluid in the volcano-sedimentation period was derived from mixed magmatic water and seawater, whereas the ore-forming fluid in the regional metamorphism period was derived from mixed metamorphic water and meteoric water.

Key words: geochemistry, ore-forming fluid, hydrogen and oxygen isotope, Fe-Mn deposit, Tuomoerte, Altay

托莫尔特铁(锰)矿是新疆维吾尔自治区有色地质勘查局706队于2006年新发现的铁矿床,位于南阿尔泰晚古生代活动陆缘克兰火山-沉积盆地。目前探明(332+333)级铁资源量2327万吨^①,矿床规模为中型,是克兰盆地已发现的最大铁矿。托莫尔特铁(锰)矿床赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组变质火山-沉积岩系,杨富全等(2012)认为,该矿床的形成经历了火山沉积期、岩浆热液叠加改造期和区域变质期,属于火山-沉积型铁矿,形成时代为早泥盆世,研究程度相对较低。前人对赋矿地层同为康布铁堡组变质火山-沉积岩系,位于克兰盆地的阿巴宫铁矿床(小型)及麦兹盆地中的蒙库铁矿床(大型)、乌吐布拉克铁矿床(中型)的地质特征、成矿流体和成矿物质来源、成矿时代及成矿机制等方面进行了大量研究(王登红等,2002;Wang et al., 2003;杨富全等,2008a;2008b;刘锋等,2009a;2009b;Xu et al., 2010;张志欣等,2011;2012),尽管对矿床成因类型存在多种观点,但均认为矿床的形成与康布铁堡组变质火山-沉积岩系的时空分布有密切关系。本文在野外地质调查基础上,重点对火山沉积期和区域变质期石英中流体包裹体特征及氢、氧同位素组成进行系统研究,探讨了成矿流体性质、成分及来源,为深入研究阿尔泰南缘与康布铁堡组变质火山-沉积岩系有关的铁矿床成因及成矿过程提供了新的依据。

1 成矿地质背景

托莫尔特(又称铁米尔特)铁(锰)矿位于阿勒泰市东直线距离12 km处,大地构造上位于克兰断陷火山-沉积盆地,属西伯利亚板块的南阿尔泰晚古生代活动陆缘(何国琦等,2004)(图1A)。克兰火山-沉积盆地出露地层主要为中-上志留统库鲁木提群、上志留统一下泥盆统康布铁堡组和中-上泥盆统阿勒泰镇组(图1B)。库鲁木提群主要为条带状混合岩、砂线黑云斜长片麻岩、十字石红柱石绿泥石二云母片岩夹变质钙质砂岩、砂岩等。康布铁堡组下亚组主要岩性为(黑云、二云)石英片岩、千枚岩、变质流纹岩、变质英安斑岩、变质凝灰岩、变质(凝灰)火山角砾岩;上亚组为变质流纹岩、变质凝灰岩、变质熔结凝灰岩夹片麻岩、绿泥黑云片岩、大理岩薄层或透镜体。阿勒泰镇组为一套浅海相陆源碎屑岩,主要为变质砂岩、变质粉砂岩、变质钙质粉砂岩等,夹基性火山岩、火山碎屑岩、硅质岩和碳酸盐岩(杨富全等,2011)。

区域构造以阿勒泰复式向斜为主体,轴向NW-SE,轴长约50 km,轴面倾向NE,倾角 $50^\circ\sim 70^\circ$,NE翼倒转,SW翼正常。阿克巴斯套断裂、阿巴宫断裂和克因宫断裂为区域断裂,控制着泥盆系的分布。侵入岩以花岗岩为主,形成时代为中-晚奥陶世(458

① 黄承科,李长江,朱天伦,张忠利,王永,董满云,潘一. 2008. 新疆阿勒泰市托莫尔特铁矿详查报告. 内部资料.

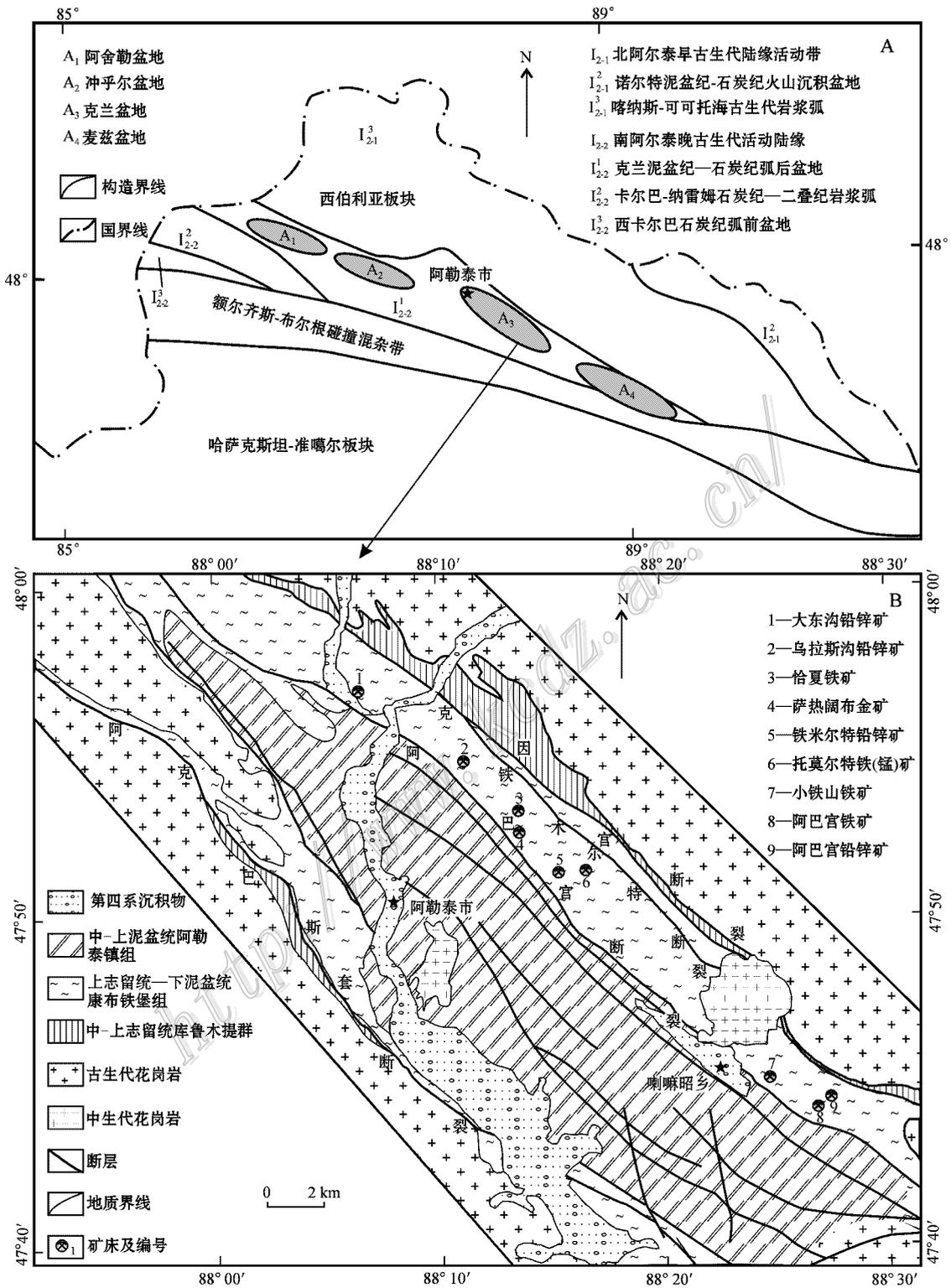


图 1 阿尔泰大地构造单元图(A) (据何国琦等, 2004) 及克兰盆地区域地质矿产图(B)

Fig. 1 Tectonic units of Altay (A) (modified after He et al., 2004) and geological map of Kelan basin (B)

① 新疆有色 706 队. 2003. 新疆阿勒泰市铁米尔特地区区域地质矿产图. 内部资料.

~461 Ma, 如阿巴宫-铁米尔特花岗岩; 刘锋等, 2009a; 柴凤梅等, 2010), 中二叠世(276 Ma, 如喇嘛昭黑云母二长花岗岩; 汪涛等, 2005), 三叠世(202 Ma, 如尚可兰碱长花岗岩; Wang et al., 2008) 和晚侏罗纪(150 Ma, 如将军山晚花岗岩; Chen et al., 2002)。

2 矿床地质特征

矿区出露上志留统一下泥盆统康布铁堡组, 分为上、下2个亚组。下亚组分布在矿区北东侧, 下部为变质流纹质晶屑凝灰岩、变质流纹质熔岩, 上部主要岩性有变质凝灰质粉砂岩、变质钙质砂岩夹薄层大理岩和变质流纹质晶屑凝灰岩。上亚组分布在矿区中部(图2), 依据岩性组合可分为3个岩性段: 第一岩性段主要为变质流纹质晶屑凝灰岩, 局部见变质流纹质火山角砾岩; 第二岩性段为绿泥片岩、变质凝灰质砂岩、变质火山角砾凝灰岩、变质英安质凝灰岩、变质钙质粉砂岩、大理岩等, 为赋矿层位; 第三岩

性段为变质流纹质晶屑凝灰岩、变质流纹岩、变质流纹质火山角砾岩、变质流纹质集块角砾岩、变质晶屑凝灰岩、变质角砾凝灰岩等。

矿区东北部发育中-晚奥陶世片麻状黑云母花岗岩, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(459 \pm 4.9) \text{Ma}$ (柴凤梅等, 2010)。矿区发育黑云母花岗岩斑岩脉, 侵入到康布铁堡组第二岩性段中, 锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄为 $(401.6 \pm 0.6) \text{Ma}$ (杨富全等, 2012)。

托莫尔特矿区已圈定出3个铁矿体, 其中2号和3号矿体为隐伏矿体, 矿体大致平行分布。1号矿体控制长650 m, 平均厚度8.8 m, 控制斜深260 m。2号矿体控制长550 m, 平均厚度15.0 m, 控制斜深540 m。3号矿体控制长350 m, 平均厚度12.8 m, 控制斜深615 m。矿体顺层分布, 呈似层状、透镜状、板状, 沿走向和倾向均有分枝复合。

矿石类型为稠密浸染状铁矿石、块状铁矿石, 少量条带状铁矿石。矿石构造以浸染状、块状为主, 条带状、角砾状、细脉状、网脉状次之。矿石结构有自

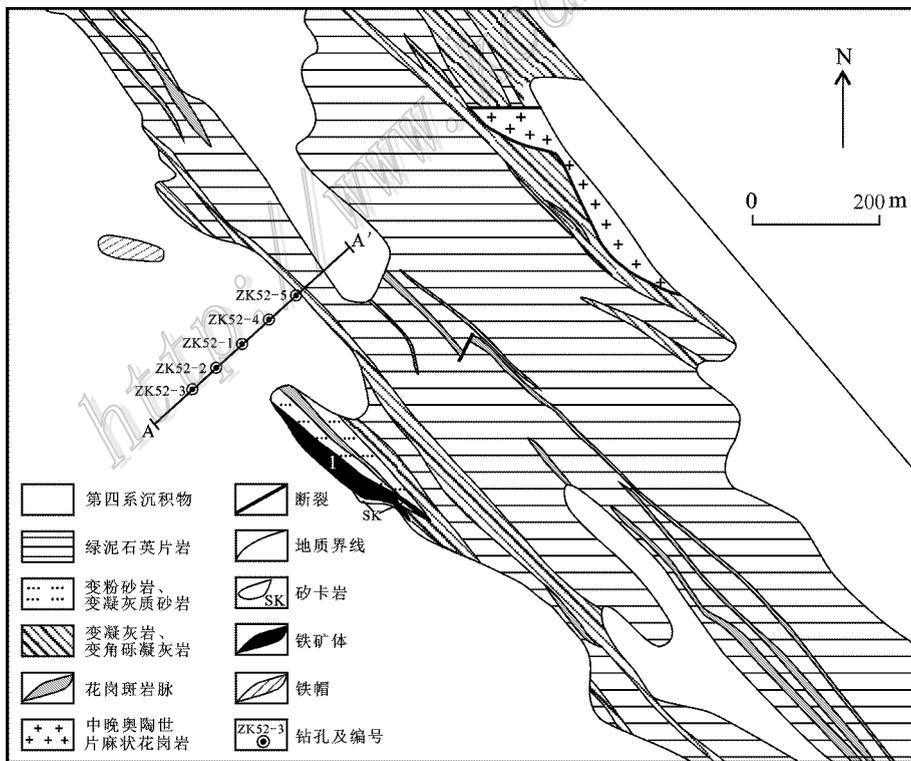


图2 托莫尔特铁(锰)矿区地质略图^①

Fig. 2 Simplified geological map of the Tuomoerte Fe(Mn) deposit

① 黄承科, 李长江, 朱天伦, 张忠利, 王永, 董满云, 潘一. 2008. 新疆阿勒泰市托莫尔特铁矿详查报告. 内部资料.

形-他形粒状结构、交代溶蚀结构、包裹结构等。矿石中金属矿物主要有磁铁矿、磁赤铁矿、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、软锰矿等。非金属矿物主要有方解石、石英、黑云母、绢云母、石榴子石、阳起石、绿帘石、绿泥石等。矿石全铁平均品位 31.3%~33.7%, Mn 平均品位 4.4%~7.6%。2 号铁矿体局部(如 48 线)伴生薄层铜矿体, Cu 平均品位 0.21%~1.03%。

围岩蚀变主要为硅化、绢云母化、绿泥石化、石榴子石化、阳起石化、透闪石化等。不同岩性中发育不同蚀变组合, 凝灰岩中主要发育绿帘石化、绿泥石化、阳起石化、硅化, 少量石榴子石化, 偶见黄铁矿化和磁黄铁矿化。黄铁矿化黑云母花岗斑岩中发育硅化、绿帘石化、绿泥石化、黄铁矿化、磁铁矿化。黑云母花岗斑岩附近的粉砂岩中, 发育黄铜矿化、磁铁矿化和黄铁矿化。大理岩中主要发育矽卡岩化(石榴子石、阳起石、绿帘石), 少量磁铁矿化、黄铜矿化和黄铁矿化。石榴子石多呈自形浸染状分布, 与蒙库铁矿体附近的他形块状石榴子石明显不同。

杨富全等(2012)根据矿体特征、穿插关系、矿物共生组合、生成顺序及矿石组构等特征, 将矿床的成矿过程划分为火山沉积期、岩浆热液叠加改造期和区域变质期。火山沉积期为主要成矿期, 形成铁矿体并伴生锰。岩浆热液叠加改造期主要是黑云母花岗斑岩脉穿插于铁矿体中, 在岩脉中形成黄铁矿、磁铁矿, 呈细脉-网脉状、浸染状分布, 同时伴有石英细脉、绿帘石和绿泥石。岩脉附近矿体围岩为灰岩时, 常形成矽卡岩, 伴有磁铁矿化。同时, 在围岩中形成含铜石英脉, 或黄铜矿浸染状分布于变质粉砂岩和灰岩中。岩浆热液成矿期是铜矿主要成矿期。区域变质期主要表现为矿体与围岩一起变形, 火山沉积期形成的铁矿物变质成磁铁矿, 同时细粒矿物重结晶成粗粒矿物。

3 流体包裹体研究

3.1 样品及分析方法

本次用于包裹体研究的样品分别采自 ZK60-8、ZK60-9、ZK60-10、ZK60-11、ZK60-12、ZK60-13 和 ZK60-14 七个钻孔中。火山沉积期的石英脉中, 以出现磁铁矿和软锰矿为特征, 粒度相对较粗(图 3A)。岩浆热液叠加改造期的石英脉中含有黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物, 穿插早期的磁铁矿矿石(图

3B、C)。区域变质期的石英脉粒度较细, 较纯净, 基本不含其他矿物, 穿插早期的含黄铁矿、黄铜矿石英脉(图 3D)。由于岩浆热液叠加改造期的石英脉中包裹体不很发育, 且体积相对较小, 因此, 本文主要研究对象为火山沉积期和区域变质期的石英脉。

流体包裹体显微测温工作, 在中国地质大学(北京)地球化学实验室利用英国产 Linkam THMSG 600 冷热台进行, 可测温范围为 $-196 \sim +600^{\circ}\text{C}$, 冷冻和加热数据误差分别为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。显微镜型号为 OLMPUS-BX51, 放大倍数 100~800 倍。在 -56.6°C 、 0.0°C 和 371.4°C , 系统用人造包裹体进行了校正。冷冻测温时, 利用液氮对包裹体降温, 并观察包裹体变化, 待其冷冻后, 缓慢升温, 当接近相变点时控制升温速率, 使之小于 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 观察记录三相点、冰点、笼形化合物融化温度等。对气液两相包裹体, 盐度利用 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系的冰点-盐度关系表(Bodnar, 1993)查得, 密度利用 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系的 $t-\rho$ 相图(Bodnar, 1983)查得。对 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 型包裹体, 盐度通过 CO_2 笼形化合物融化温度与盐度关系表(Collins, 1979)来确定, 密度利用经验公式(刘斌等, 1987)求得。

流体包裹体气相、液相成分分析在中国科学院地质与地球物理研究所包裹体实验室完成。首先是气体的提取过程, 选取 500 mg 石英样品放入洁净的石英管内, 逐渐升温到 100°C , 然后将试管抽成真空, 当分析管内压力小于 $6 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 后, 以 $1^{\circ}\text{C}/3 \text{ s}$ 的速度将爆裂炉内的温度逐渐升高到 450°C , 此时, 提取气体。将所提取的气体用四级杆质谱仪进行气相成分测量。取石英样品 1 g 在马福炉中爆裂 10 min (爆裂温度上限是 450°C), 加入 5 ml 蒸馏水在超声离心状态下震荡 10 min, 提取离心后的清液, 用离子色谱仪测量阴阳离子的成分。

3.2 流体包裹体类型和特征

托莫尔特铁(锰)矿床石英中包裹体主要为原生包裹体, 偶见线状分布的次生包裹体。原生包裹体依据室温下化学组成, 可进一步划分为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型和 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 型。 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型主要有气液两相包裹体(图 4A~E)、纯气体包裹体(图 4F)、富气体包裹体(图 4G)。 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 型主要为含液体 CO_2 的三相包裹体(图 4H、I)。

气液两相包裹体中气相分数为 5%~30%, 加热时均一到液相。包裹体长轴 2~20 μm , 多数在 4~10 μm , 形态为不规则形、椭圆形、长条形、负晶形。此



图3 托莫尔特铁(锰)矿不同成矿期石英脉特征

A. 火山沉积期含磁铁矿石英脉; B, C. 岩浆热液叠加改造期含黄铁矿石英脉; D. 区域变质期石英脉

Fig. 3 Characteristics of quartz of different periods in the Tuomoerte Fe-(Mn) deposit

A. Magnetite-bearing quartz vein of volcano-sedimentation period; B, C. Pyrite-bearing quartz vein of magmatic-hydrothermal period; D. Quartz vein of regional metamorphism period

类包裹体分布普遍,成群分布,常与其他类型包裹体共生。纯气体包裹体由单一气相组成,包裹体长轴 $5\sim 10\ \mu\text{m}$,形态不规则状。富气体包裹体由气相和液相组成,气相分数为 $70\%\sim 85\%$,加热时均一到气相。包裹体长轴 $5\sim 8\ \mu\text{m}$,形态为不规则状。纯气体包裹体和富气体包裹体相对不发育。

含液体 CO_2 的三相包裹体主要出现在区域变质期形成的石英中,既有原生包裹体也有次生包裹体,由 V_{CO_2} 、 L_{CO_2} 和 $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ 三相组成, CO_2 相的体积百分数为 $10\%\sim 40\%$ 。室温下一般出现液态 CO_2 、气态 CO_2 和水溶液相,部分呈现两相(V_{CO_2} 和 $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$),但降温后出现三相。包裹体形态为不规则形、负晶形、不完全负晶形、椭圆形等,长轴为 $3\sim 12\ \mu\text{m}$ 。该类包裹体呈孤立状、成群或成带广泛分布在石英中,常与其他类型包裹体共生。

3.3 显微测温结果

火山沉积期石英中流体包裹体均一温度变化范围较大,介于 $142\sim 405^\circ\text{C}$,主要集中在 $170\sim 300^\circ\text{C}$,峰值为 190°C (图5a)。冰点温度变化于 $-20.5\sim$

-1.9°C 。利用冰点在冷冻法冰点-盐度关系表中,查得流体 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $3.23\%\sim 22.71\%$,主要集中在 $6\%\sim 9\%$ 和 $14\%\sim 20\%$ (图5b)。用包裹体均一温度和盐度在 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系的 $t-w-\rho$ 相图上查得密度为 $0.62\sim 1.09\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。

区域变质期石英脉中以发育含液体 CO_2 包裹体为特征, CO_2 的初熔温度为 $-64.3\sim -61^\circ\text{C}$,表明包裹体中 CO_2 不纯,有一定量的 CH_4 或 N_2 存在(Bur-russ, 1981)。笼形物消失温度为 $3.6\sim 7.5^\circ\text{C}$,部分均一温度为 $6.3\sim 22.1^\circ\text{C}$,完全均一温度介于 $210\sim 523^\circ\text{C}$,主要集中在 $210\sim 420^\circ\text{C}$,峰值为 310°C (图5a)。流体包裹体 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $4.8\%\sim 11.33\%$,峰值为 11% (图5b),计算得密度为 $0.85\sim 1.05\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。

3.4 流体包裹体成分

(1) 液相成分特征

7件火山沉积期和区域变质期石英中的液相成分表明,火山沉积期和区域变质期成矿流体的液相成分基本相似(表1),阳离子以 Na^+ 为主,次为 K^+ (Na^+/K^+ 比值范围为 $4.4\sim 12.57$)和 Ca^{2+} ;阴离子成

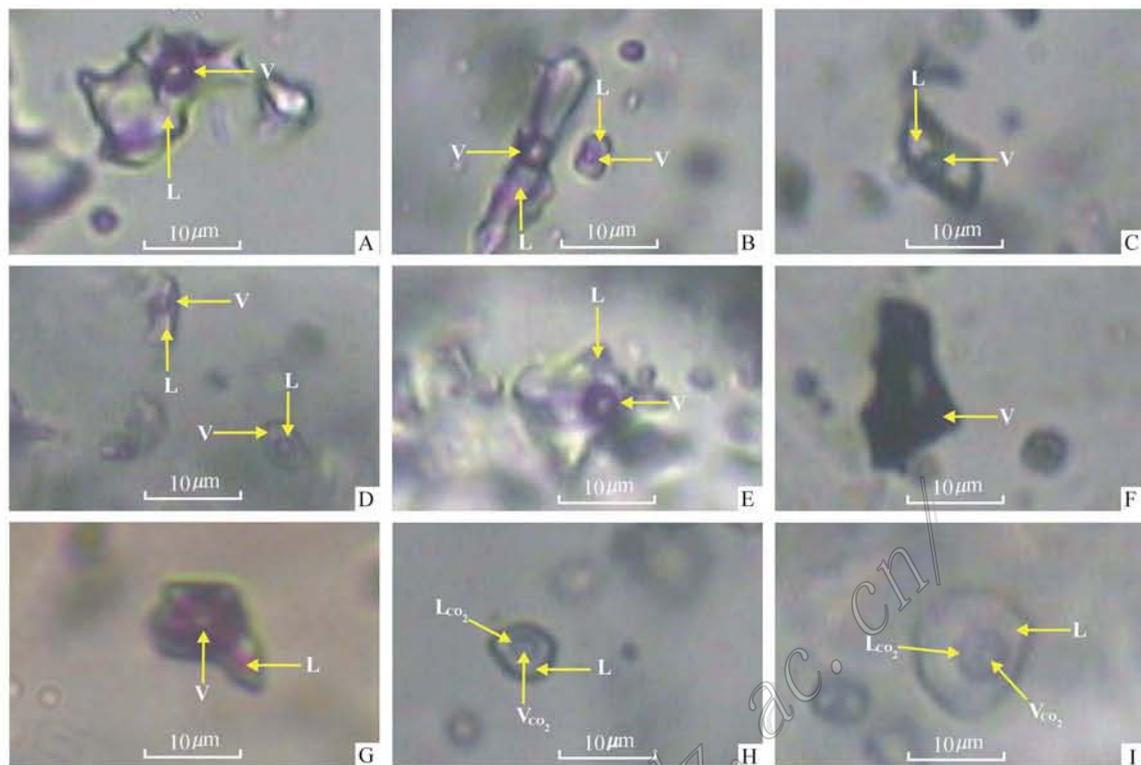


图 4 托莫尔特铁(锰)矿流体包裹体显微照片

A~E. 气液两相包裹体; F. 纯气体包裹体; G. 富气体包裹体; H、I. 含液体 CO₂ 的三相包裹体

Fig. 4 Photomicrographs of fluid inclusions from the Tuomoerte Fe-Mn deposit

A~E. Two-phase vapor-liquid inclusions in quartz; F. Vapor inclusions in quartz; G. Vapor-rich inclusions in quartz; H、I. Three-phase CO₂-rich inclusions in quartz

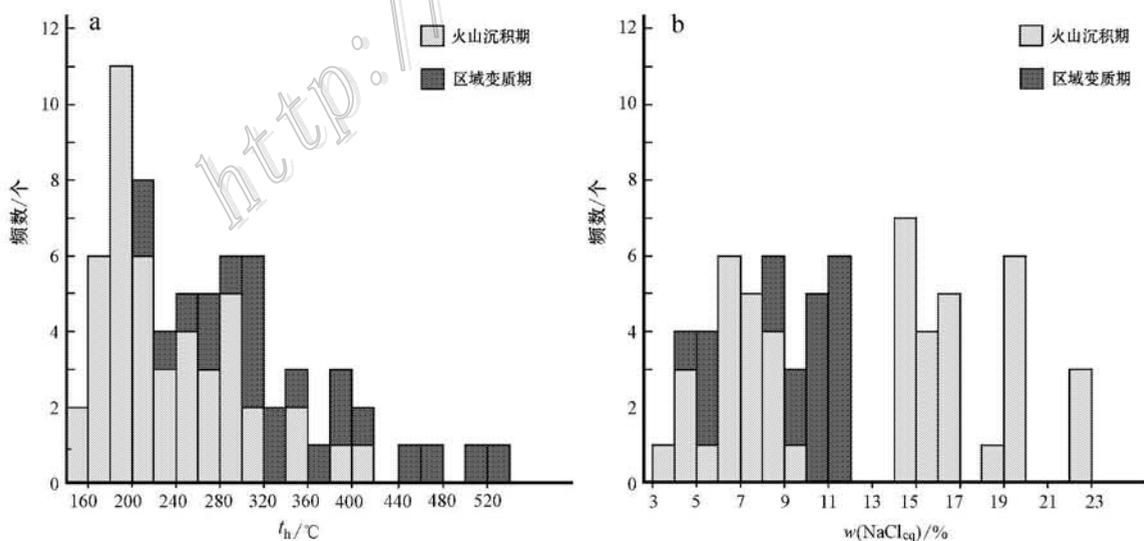


图 5 托莫尔特铁(锰)矿床包裹体均一温度(a)、盐度(b)直方图

Fig. 5 Histograms of homogenization temperature (a) and salinity (b) for the inclusions in the Tuomoerte Fe-Mn deposit

表1 托莫尔特铁(锰)矿石英流体包裹体液相成分
Table 1 Liquid composition of fluid inclusions in the Tuomoerte Fe-Mn deposit

序号	样品编号	形成阶段	$w(B)/10^{-6}$										参数		
			F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	总量	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	Na ⁺ /K ⁺	M ⁻ /M ⁺		
1	ZK60-9		-	6.00	2.72	5.28	1.00	-	0.41	15.41	2.21	5.28	1.30		
2	ZK60-10	火山沉积期		2.63	1.58	2.75	0.25	-	0.17	7.38	1.66	11.00	1.33		
3	ZK60-12		0.07	2.72	1.02	2.38	0.25	-	0.21	6.65	2.67	9.52	1.34		
4	ZK60-14		0.07	7.62	2.15	6.24	0.62	-	0.46	17.09	3.54	10.06	1.33		
5	ZK60-8		-	0.58	1.18	0.88	0.20	-	0.17	3.01	0.49	4.40	1.41		
6	ZK60-11	区域变质期	-	1.64	0.97	1.76	0.14	?	0.17	4.68	1.69	12.57	1.26		
7	ZK60-13		0.04	11.88	3.27	10.92	1.33	0.04	0.21	27.69	3.63	8.21	1.22		

表2 托莫尔特铁(锰)矿石英流体包裹体气相成分
Table 2 Vapor composition of fluid inclusions in the Tuomoerte Fe-Mn deposit

序号	样品编号	形成阶段	$x(H_2O)/\%$													参数		
			H ₂ O	N ₂	Ar	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	H ₂ S	CO ₂ /CH ₄	H ₂ O/CO ₂	R/O						
1	ZK60-9		91.97	1.179	0.091	6.18	0.459	0.123	0.001	13.46	14.88	0.29						
2	ZK60-10	火山沉积期	84.25	1.496	0.107	13.47	0.472	0.207	0.001	28.54	6.25	0.16						
3	ZK60-12		82.63	2.094	0.282	12.94	1.379	0.671	0.002	9.38	6.39	0.32						
4	ZK60-14		95.27	0.804	0.066	3.50	0.258	0.097	0	13.57	27.22	0.33						
5	ZK60-8		48.23	6.639	1.057	35.98	6.330	1.759	0.004	5.68	1.34	0.41						
6	ZK60-11	区域变质期	64.97	3.028	0.206	30.76	0.609	0.423	0.001	50.51	2.11	0.13						
7	ZK60-13		78.14	0.741	0.020	20.92	0.1222	0.057	0.001	171.19	3.74	0.04						

分以 Cl^- 为主,其次是 SO_4^{2-} , $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值变化于 0.49~3.63 之间。除个别样品外,火山沉积期 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量总体高于区域变质期。 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值在火山沉积期也高于区域变质期,但阴离子和阳离子比值基本相同。

(2) 气相成分特征

石英中流体包裹体的气相成分(表2)表明,火山沉积期和区域变质期成矿流体的气相成分相似,以 H_2O [$x(\text{H}_2\text{O})$ 为 48.23%~95.27%]、 CO_2 [$x(\text{CO}_2)$ 为 3.5%~35.98%] 为主,其次为 N_2 、 CH_4 、 C_2H_6 , 含少量 H_2S 及微量 Ar。火山沉积期 CO_2 含量 [$x(\text{CO}_2)$ 为 3.5%~13.47%, 平均为 9.02%]、 N_2 [$x(\text{N}_2)$ 为 0.804%~2.094%] 和 CO_2/CH_4 比值 (9.38~28.54) 明显低于区域变质期 [$x(\text{CO}_2)$ 为 20.92%~35.98%, 平均 29.22%; $x(\text{N}_2)$ 为 0.741%~6.639%; $\text{CO}_2/\text{CH}_4 = 5.68 \sim 171.19$], 但 H_2O [$x(\text{H}_2\text{O})$ 为 82.63%~95.27%] 和 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ (6.25~27.22) 明显高于区域变质期 [$x(\text{H}_2\text{O})$ 为 48.23%~78.14%, $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2 = 1.34 \sim 3.74$]。

4 氢、氧同位素分析

4.1 样品及分析方法

本次用于氢、氧同位素研究的样品分别来自 ZK60-8~14 七个钻孔中。本文主要研究对象是火山沉积期和区域变质期的石英脉。

氢、氧同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室进行,氢和氧同位素用 MAT 253 EM 质谱计进行测试,氧同位素的分析精密度的 $\pm 0.2\text{‰}$, 氢同位素的分析精密度的 $\pm 2\text{‰}$ 。首先在显微镜下挑选石英单矿物,纯度达 99% 以上。氧同位素分析方法为 BrF_5 法 (Clayton et al., 1963), 先

将纯净的石英样品分别与 BrF_5 反应 15 h, 萃取氧。分离出的氧进入 CO_2 转化系统, 温度为 700°C , 时间为 12 min, 最后收集 CO_2 (Mao et al., 2002)。氢同位素分析采用爆裂法, 其测试程序为: 加热石英包裹体样品使其爆裂, 释放挥发分, 提取水蒸气, 然后在 400°C 条件下使水与锌反应产生氢气, 再用液氮冷冻后, 收集到有活性碳的样品瓶中 (Coleman et al., 1982)。

4.2 氢、氧同位素组成

托莫尔特铁(锰)矿床氢、氧同位素测试结果列于表 3。

5 件火山沉积期石英的 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 变化范围较大, 介于 $-105\text{‰} \sim -82\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值介于 $10.4\text{‰} \sim 11.3\text{‰}$ 。使用石英-水分馏方程 $1000\alpha = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$ (Clayton et al., 1972) 和同一样品及相近样品石英中流体包裹体均一温度平均值, 计算流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-1.4 \sim 3.6\text{‰}$, 平均值为 0.5‰ 。

3 件区域变质期石英 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 介于 $-91\text{‰} \sim -76\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值介于 $10.2\text{‰} \sim 10.6\text{‰}$ 。应用石英-水分馏方程 $1000\alpha = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$ (Clayton et al., 1972) 和同一样品及相近样品石英中流体包裹体均一温度平均值, 计算流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 变化于 $3.0\text{‰} \sim 3.8\text{‰}$, 平均值 2.4‰ 。

5 讨论

5.1 成矿流体性质

(1) 火山沉积期

托莫尔特铁(锰)矿床火山沉积期石英中流体包裹体类型以气液两相包裹体为主, 均一温度主要集中于 $170 \sim 300^\circ\text{C}$, 峰值为 190°C 。成矿流体 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $3.23\% \sim 22.71\%$, 主要集中在 $6\% \sim 9\%$ 和 14%

表 3 托莫尔特铁(锰)矿氢、氧同位素组成

Table 3 Oxygen and hydrogen isotopic data of the Tuomoerte Fe-Mn deposit

序号	样号	矿物	形成阶段	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$t_h/^\circ\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$
1	ZK60-09	石英		-92	11.3	249	2.3
2	ZK60-10	石英		-88	10.9	289	3.6
3	ZK60-12	石英	火山沉积期	-105	10.8	199	-1.0
4	ZK60-14	石英		-82	10.8	199	-1.0
5	ZK60-15	石英		-82	10.4	199	-1.4
6	ZK60-08	石英		-91	10.6	281	3.0
7	ZK60-11	石英	区域变质期	-86	10.5	306	3.8
8	ZK60-13	石英		-76	10.2	306	3.5

~20% ,密度为 0.62~1.09 g/cm³ ,表明该阶段成矿流体性质为中-低温、中-低盐度、中-低密度。耿新霞等(2010)测得与托莫尔特铁(锰)矿相邻的铁米尔特铅锌矿(赋矿地层同为康布铁堡组上亚组第二岩性段)喷流沉积期石英中气液两相包裹体均一温度变化于 150~330℃ ,成矿流体 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 4%~16% ,密度为 0.77~0.97 g/cm³ ,与本文所测得数据相似,同时也与克兰盆地大东沟铅锌矿成矿流体特征一致(刘敏等,2008;2009a)暗示赋存于康布铁堡组上亚组第二岩性段的 VMS 型铅锌矿和火山-沉积型铁(锰)矿的热液性质基本相似,以中-低温、中-低盐度、中-低密度为特征。

火山沉积期成矿流体阳离子以 Na⁺ 为主(平均占阳离子总量的 78% 以上),其次为 K⁺ 和 Ca²⁺。阴离子成分以 Cl⁻ 为主(平均占阴离子总量的 62% 以上),其次是 SO₄²⁻ ,为该阶段矿物运移的主要配阴离子。Roedder(1979)研究指出,包裹体组分包括 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻ 等离子和离子团,是成矿流体重要部分。流体的 Na⁺/K⁺ 比值和 F⁻/Cl⁻ 比值可作为判断流体来源的重要指示标志(Roedder,1972;卢焕章等,1990;张德会,1992;汪莉娟等,2009;刘敏等,2009b)。一般情况下,来自岩浆热液的流体中 Na⁺/K⁺ < 1,而 Na⁺/K⁺ > 10 和 F⁻/Cl⁻ < 1,则表明流体来源于幔源岩浆或变质热液。本文 3 件火山沉积期的样品 Na⁺/K⁺ ≥ 10(除 1 件 Na⁺/K⁺ 比值为 5.28),F⁻/Cl⁻ < 1,暗示成矿流体的来源为岩浆热液或者变质热液。

火山沉积期成矿流体以 H₂O [x(H₂O) 为 82.63%~95.27%],CO₂ [x(CO₂) 为 3.50%~13.47%] 为主,其次为 N₂、CH₄、C₂H₆,含少量 H₂S 及微量 Ar。N₂ 的存在表明流体来源并非单源,而且具有有机成因的特点,这也得到硫同位素的证实。火山沉积期 1 件样品的 δ³⁴S 值为 -20‰,表明在火山沉积期有少量硫具有生物成因硫的特征,硫来自细菌还原海水硫酸盐(杨富全等,2012)。还原性气体与氧化气体的比值是衡量成矿环境氧化还原程度的一个重要参数,托莫尔特铁(锰)矿还原性气体(R)包括 CH₄、C₂H₆、H₂S、N₂,氧化性气体(O)为 CO₂。4 件火山沉积期的样品 R/O 的值均小于 1,变化于 0.16~0.33,表明托莫尔特铁(锰)矿是氧化环境下成矿。

综上所述,火山沉积期成矿流体属于中-低温、中-低盐度、中-低密度的 H₂O-NaCl 体系。

(2) 区域变质期

前人研究表明,阿尔泰造山带形成时伴随有强烈的造山作用(Bibikova,1992;Jahn,1998;Wang et al.,2006),使古生代地层均遭受了绿片岩相到角闪岩相的变质作用(郑常青等,2007)。克兰盆地的康布铁堡组同样在不同程度上受到变形变质改造,铁米尔特-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(徐学纯等,2005)。在这种程度的变质作用下,碳质流体(CO₂-CH₄-N₂)较为发育(徐九华等,2009)。托莫尔特铁(锰)矿床区域变质期石英中同样以发育含液体 CO₂ 三相包裹体为特征,完全均一温度主要集中在 210~420℃(峰值为 310℃)。成矿流体 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 4.8%~11.33%,峰值为 11%,密度为 0.85~1.05 g/cm³。徐九华等(2008;2009)在对与托莫尔特铁(锰)矿相邻的铁米尔特铅锌矿流体包裹体研究时发现,区域变质作用形成的石英脉中发育 H₂O-CO₂ 型包裹体和碳质流体包裹体(由单相或富 CO₂ 包裹体组成),H₂O-CO₂ 型包裹体完全均一温度为 243~412℃,与托莫尔特铁(锰)矿区域变质期石英中含液体 CO₂ 三相包裹体温度范围基本一致,低于张翠光等(2007)通过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的黑云母带变质温度(445~550℃)。

区域变质期成矿流体阳离子同样以 Na⁺ 为主(平均占阳离子总量的 70% 以上,最高可达 87%),其次为 K⁺ 和 Ca²⁺。阴离子成分以 Cl⁻ (平均占阴离子总量的 33%~78%)和 SO₄²⁻ (平均占阴离子总量的 22%~67%)为主。与火山沉积期相比,Cl⁻/SO₄²⁻ 比值相对较低,反映出该阶段矿物运移配阴离子主要为 SO₄²⁻。3 件区域变质期的样品 Na⁺/K⁺ > 1,F⁻/Cl⁻ < 1,暗示成矿流体的来源并非单一的岩浆热液,可能有地层流体的加入。

与火山沉积期成矿流体气相成分相比,区域变质期成矿流体同样以 H₂O [x(H₂O) 为 48.23%~78.14%],CO₂ [x(H₂O) 为 20.92%~35.98%,平均为 29.22%] 为主,但 CO₂ 含量明显升高,导致 CO₂/CH₄ 比值明显升高,而 H₂O/CO₂ 比值相对降低。成矿流体中如此高的 CO₂ 含量可能暗示了变质流体的参与(陈衍景等,2007)。3 件区域变质期的样品 R/O 的值均小于 1,变化于 0.04~0.41,同样表明区域变质期为氧化环境。

综上所述,区域变质期成矿流体属于中-高温、中-

低盐度、中-低密度的 $H_2O-CO_2-CH_4-N_2-NaCl$ 体系。

5.2 成矿流体来源

5 件火山沉积期石英的 δD_{SMOW} 变化范围较大, 介于 $-105\text{‰} \sim -82\text{‰}$, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 $-1.4\text{‰} \sim 3.6\text{‰}$ 。在 $\delta D-\delta^{18}O_{H_2O}$ 图解(图 6)中, 样品点落在岩浆水左下方与大气降水线之间。尽管 $\delta D-\delta^{18}O_{H_2O}$ 图解表明火山沉积期成矿流体为岩浆水与大气降水的混合, 但实际上成矿作用发生在海底, 大气降水的贡献可能不大。陈毓川等(1996)在解释阿舍勒铜锌矿的氢、氧同位素时认为, 水岩反应影响热流体的氧同位素组成, 具有大气降水的特征实际上是深循环的海水。4 件磁铁矿 $\delta^{18}O$ 值分别为 -1.1‰ 、 -0.3‰ 、 0.5‰ 和 0.8‰ , 平均为 -0.025‰ , 非常接近海水($\delta^{18}O \approx 0$)表明磁铁矿的氧来自海水(另文发表)。结合该阶段流体包裹体气相和液相成分表明成矿流体富含 Na^+ 、 Cl^- 和 H_2O , 成矿流体具有海水特征及成矿流体来源并非单源的特点, 推断火山沉积期成矿流体是海水与岩浆水的混合。

3 件区域变质期石英 δD_{SMOW} 介于 $-91\text{‰} \sim -76\text{‰}$, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 变化于 $3.0\text{‰} \sim 3.8\text{‰}$ 。在 $\delta D-\delta^{18}O_{H_2O}$ 图解(图 6)中, 样品点落在区域变质水和岩浆水左下侧。区域变质期流体以富含 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_6 和 N_2 为特征, 为 $H_2O-CO_2-CH_4-N_2-NaCl$

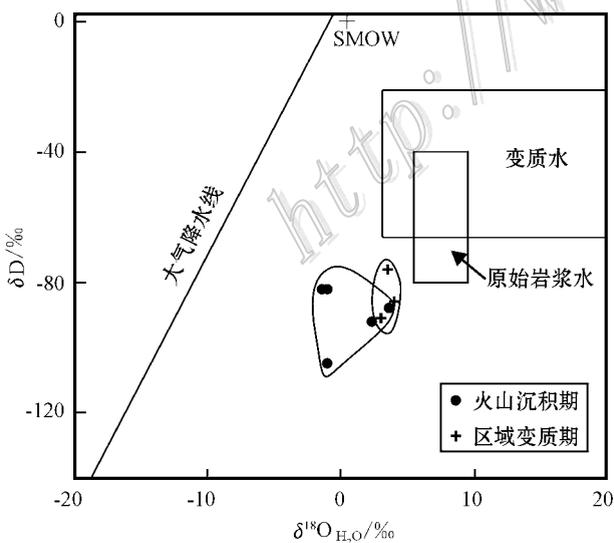


图 6 托莫尔特铁(锰)矿床 $\delta D-\delta^{18}O_{H_2O}$ 图解

(原始岩浆水范围据 Sheppard, 1986)

Fig. 6 δD versus $\delta D-\delta^{18}O_{H_2O}$ diagram of the Tuomoerte Fe-Mn deposit (Data of primary magmatic water after Sheppard, 1986)

型流体, 与成矿热液来源为区域变质及相关岩浆活动的克兰盆地含铜(金)石英脉流体特征具有相似性(徐九华等 2011)。然而, 托莫尔特铁(锰)矿床野外地质观察表明, 矿区及周围缺乏区域变质期岩浆活动, 因此, 排除了岩浆水来源的可能性, 鉴于这些样品是矿区地层变质和变形时形成的石英脉, 推断区域变质期成矿流体主要为变质水混合深循环的大气降水。

6 结 论

(1) 托莫尔特铁(锰)矿床位于南阿尔泰晚古生代活动陆缘的克兰盆地, 矿床赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组中上亚组第二岩性段。火山沉积期石英中流体包裹体以气液两相包裹体为主, 区域变质期石英中以发育含液体 CO_2 的三相包裹体为特色。

(2) 火山沉积期成矿流体属于中-低温、中-低盐度、中-低密度的 $H_2O-NaCl$ 体系, 以富含 Na^+ 、 Cl^- 和 H_2O 为特征。区域变质期流体以富含 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_6 和 N_2 为特征, 流体性质为中-高温、中-低盐度、中-低密度的 $H_2O-CO_2-CH_4-N_2-NaCl$ 型流体, 具有明显的变质流体特点。

(3) 氢、氧同位素特征表明火山沉积期成矿流体为海水和岩浆水的混合, 区域变质期成矿流体主要为变质水混合深循环的大气降水。

志 谢 野外工作期间得到新疆有色地勘局申茂德总工程师、郭正林处长、新疆有色地勘局 706 队郭旭吉总工的帮助; 流体包裹体测试在中国地质大学(北京)地球化学实验室诸慧燕老师和中国科学院地质与地球物理研究所流体包裹体实验室朱和平老师的帮助下完成, 氢、氧同位素测试由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室万德芳和罗续荣老师完成, 在此一并感谢。

参考文献/References

- 柴凤梅, 董连慧, 杨富全, 刘 锋, 耿新霞, 黄承科. 2010. 阿尔泰山南缘克朗盆地铁木尔特花岗岩体年龄、地球化学特征及成因 [J]. 岩石学报, 26(2): 377-386.
- 陈衍景, 倪 培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖 勇, 苏文超, 张 辉. 2007. 不同类型热液金矿系统热液流体包裹体特征 [J]. 岩石学

- 报, 23(9): 2085-2108.
- 陈毓川, 叶庆同, 冯京, 牟传龙, 周良仁, 王全明, 黄光昭, 庄道泽, 任秉琛. 1996. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社. 1-330.
- 耿新霞, 杨富全, 杨建民, 黄承科, 刘锋, 柴凤梅, 张志欣. 2010. 新疆阿尔泰铁木尔特铅锌矿床流体包裹体研究及地质意义[J]. 岩石学报, 26(3): 695-706.
- 何国琦, 成守德, 徐新, 李锦轶, 郝杰. 2004. 中国新疆及邻区大地构造图(1:2 500 000)说明书[M]. 北京: 地质出版社. 1-65.
- 刘斌, 段光贤. 1987. NaCl-H₂O 溶液包裹体的密度式和等容式及其应用[J]. 矿物学报, 7(4): 345-352.
- 刘锋, 杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 耿新霞. 2009a. 阿尔泰造山带阿巴宫花岗岩年代学及地球化学研究[J]. 岩石学报, 25(6): 1416-1425.
- 刘锋, 杨富全, 李延河, 马宝钦, 柴凤梅, 耿新霞. 2009b. 新疆阿勒泰市阿巴宫铁磷灰石微量和稀土元素特征及矿床成因探讨[J]. 矿床地质, 28(3): 251-264.
- 刘敏, 张作衡, 王永强, 郭旭吉. 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, 郭旭吉, 陈伟十. 2009a. 新疆阿尔泰大东沟铅锌矿床流体包裹体特征及找矿作用[J]. 矿床地质, 28(3): 282-296.
- 刘敏, 王志良, 张作衡, 陈伟十, 杨丹. 2009b. 新疆东天山土屋斑岩铜矿床流体包裹体地球化学特征[J]. 岩石学报, 25(6): 1446-1455.
- 卢焕章, 李秉纶. 1990. 包裹体地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 153-154.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 李天德, 傅旭杰. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社. 1-493.
- 王莉娟, 彭志刚, 祝新友, 邓吉牛, 王玉往, 朱和平. 2009. 青海省锡铁山 Sedex 型铅锌矿床成矿流体来源及演化-流体包裹体及同位素地球化学证据[J]. 岩石学报, 25(11): 3007-3015.
- 王涛, 洪大卫, 童英, 韩宝福, 石玉若. 2005. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义[J]. 岩石学报, 21(3): 640-650.
- 徐九华, 单立华, 丁汝福, Hart C J, 王琳琳, 卫小锋. 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.
- 徐九华, 林龙华, 王琳琳, 褚海霞, 卫小锋, 陈栋梁. 2009. 阿尔泰克兰盆地 VMS 矿床的变形变质与碳质流体特征[J]. 矿床地质, 28(5): 585-598.
- 徐九华, 肖星, 迟好刚, 王琳琳, 林龙华, 褚海霞, 龚运辉. 2011. 阿尔泰南缘克兰盆地的脉状金-铜矿化及其流体演化[J]. 岩石学报, 27(5): 1299-1310.
- 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, 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. 2008a. 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.
- 杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 刘锋, 周刚, 耿新霞, 刘国仁, 徐林刚. 2008b. 新疆阿尔泰蒙库铁矿床的成矿流体及成矿作用[J]. 矿床地质, 27(6): 659-680.
- 杨富全, 刘锋, 柴凤梅, 张志欣, 耿新霞, 吕书君, 姜丽萍, 欧阳刘进. 2011. 新疆阿尔泰铁矿: 地质特征、时空分布及成矿作用[J]. 矿床地质, 30(4): 575-598.
- 杨富全, 郭旭吉, 黄承科, 刘锋, 柴凤梅, 耿新霞, 张保江. 2012. 新疆阿尔泰托莫尔特铁(锰)矿成矿作用[J]. 岩矿测试, 31(5): 906-914.
- 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.
- 张德会. 1992. 矿物包裹体液相成分特征及其矿床成因意义[J]. 地球科学, 17(6): 677-688.
- 张志欣, 杨富全, 柴凤梅, 刘锋, 耿新霞, 吕书君, 姜丽萍, 钟天智, 欧阳刘进. 2011. 新疆阿尔泰乌吐布拉克铁矿床稀土元素地球化学研究[J]. 矿床地质, 30(1): 87-102.
- 张志欣, 杨富全, 刘锋, 柴凤梅, 耿新霞, 欧阳刘进, 姜丽萍, 吕书君. 2012. 新疆阿尔泰南缘乌吐布拉克铁矿成矿机制研究[J]. 岩石学报, 28(7): 2043-2056.
- 郑常青, 徐学纯, Takenori K, Masaki E. 2007. 新疆阿尔泰冲乎尔地区蓝晶石-夕线石型变质带独居石 CHIME 二叠纪年龄及其地质意义[J]. 高校地质学报, 13(3): 566-573.
- Bibikova Y E, Kirnozova T I, Kozakov I K, Kotov A B, Neymark L A, Gorokhovskiy B M and Shuleshko I K. 1992. U-Pb ages for poly-metamorphic complexes on the southern Flank of the Mongolian and Gobi Alta[J]. Geotectonics, 26: 166-172.
- Bodnar R J. 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids[J]. Econ. Geol., 78: 535-542.
- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57: 683-684.
- Burruss R C. 1981. Analysis of phase equilibrium in C-O-H-S fluid inclusion[A]. In: Hollister L S, Crawford M L, eds. Short course handbook[M]. Mineralogical Association of Canada, 6: 39-74.
- Chen B and Jahn B M. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implication[J]. Geological Magazine, 139(1): 1-13.
- Clayton R N and Mayeda T K. 1963. The use of bromine pentafluoride

- in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27:43-52.
- Clayton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research*, 77:3057-3067.
- Coleman M L, Sheppard T J, Durham J J, Rouse J E and Moore G R. 1982. Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 54:993-995.
- Collins P L F. 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and use freezing data for estimation of salinity[J]. *Econ. Geol.*, 74:1435-1444.
- Jahn B M. 1998. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from the East-Central Asia orogenic belt[A]. *Abstracts of IGCP-420 First Workshop*[M]. Urumqi, Xinjiang, China. 1-2.
- Mao J W, Wang Y, Ding T, Chen Y, Wei J and Yin J. 2002. Dashuigou tellurium deposit in Sichuan province, China: S, C, O, and H isotope data and their implications on hydrothermal mineralization[J]. *Resource Geology*, 52:15-23.
- Roedder E. 1972. Composition of fluid inclusions[A]. In: Fleischer M, ed. *Data of geochemistry*[M]. Sixth Edition. Washington, D C. Geological survey professional paper 440 JJ, 164.
- Roedder E. 1979. In physics and chemistry of the Earth[M]. Oxford: Pergamas Press, 9-35.
- Sheppard S M F. 1986. Characterization and isotopic variations in natural waters[J]. *Reviews in Mineralogy*, 16:165-183.
- Wang T, Hong D W, Jahn B M, Tong Y, Wang Y B, Han B F and Wang X X. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. *The Journal of Geology*, 114:735-751.
- Wang T, Jahn B M and Kovachet V P. 2008. Mesozoic anorogenic granitic magmatism in the Altai Paleozoic accretionary orogen, NW China, and its implications for crustal architecture and growth[C]. *AOGS 5th Annual General Meeting, Busan, Korea, Abstract SE 53-A010*.
- Wang Y W, Wang J B, Wang S L, Ding R F and Wang L J. 2003. Geology of the Mengku iron deposit, Xinjiang, China—a metamorphosed VMS? [A]. In: Mao J W, Goldfarb R J, Seltmann R, Wang D H, Xiao W J, Hart C, eds. *Tectonic evolution and metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan. Proceedings volume of the International Symposium of the IGCP-473 project in Urumqi and guidebook of the field excursion in Xinjiang, China*[C]. August 9-21, 2003. London: Centre for Russian and Central Asian Mineral Studies, Natural History Museum, 181-200.
- Xu L G, Mao J W, Yang F Q, Daniel H and Zheng J M. 2010. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39:423-440.