

新疆阿尔泰什根特铁矿床地质特征及成矿机制

李彦¹, 杨成栋², 谷高中³, 韩伟鹏¹, 李强², 王旭¹

(1. 河北省地矿局第七地质大队, 河北 三河 065201; 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. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第四地质大队, 新疆 阿勒泰 836500)

摘要: 什根特铁矿赋存于康布铁堡组火山沉积岩系中, 矿体呈层状、透镜状、脉状, 受地层控制。同时发育矽卡岩及磁铁矿化。矿床形成经历了火山沉积期(主成矿期), 岩浆热液期(矽卡岩型矿化)和区域变质期。火山沉积期和岩浆热液期退化蚀变阶段的磁铁矿均具有富 Fe, 贫 Si、Ti、V、Mg、Mn 特点; 磁铁矿稀土元素配分模式和原始地幔标准化蛛网图具有相似曲线变化特征, 指示火山沉积期和退化蚀变阶段的铁矿化具有相同的物质来源, 即来自基性火山岩。早期矽卡岩阶段石榴子石中流体包裹体均一温度为 160~403℃, 集中在 180~260℃, 盐度集中在 5%~9% (质量分数, NaCl_{eq}, 下同), δD 介于 -134‰~-125‰, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 4.7‰~8.6‰, 表明流体为岩浆水。石英碳酸盐阶段流体包裹体均一温度为 140~536℃, 主要集中在 160~340℃, 盐度集中在 6%~16%, 表明流体具有从高温演化到低温、中低盐度和中低密度的特征, 石英的 δD 介于 -98‰~-95‰, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 -0.6‰~2.0‰, 表明该阶段流体来自岩浆水混合大气降水。

关键词: 铁矿床; 地质特征; 成矿机制; 什根特; 阿尔泰; 新疆

中图分类号: P618.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)01-0099-16

Geological characteristics and metallogenic mechanism of the Shigente iron deposit in Altay, Xinjiang

LI Yan¹, YANG Cheng-dong², GU Gao-zhong³, HAN Wei-peng¹, LI Qiang² and WANG Xu¹

(1. No. 7 Geological Party of the Hebei Bureau of Geology, Sanhe, 065201, China; 2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. No. 4 Geological Party of the Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Altay 836500, China)

Abstract: The Shigente iron deposit is hosted in the volcano-sedimentary rocks of the Kangbutiebao Formation. The orebodies occur in bedding, lenticular, and vein forms, bounded by the strata. Skarnization and magnetite mineralization are both present in the ore district. The ore-forming process can be divided into volcanic sedimentary (the main mineralization period), magmatic hydrothermal (skarn-type mineralization period), and regional metamorphic periods. Magnetite in the volcanic sedimentary period and the retrograde alteration stage of the magmatic hydrothermal period is rich in Fe and depleted in Si, Ti, V, Mg, Mn. The chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of magnetite show similar characteristics, which indicates that the iron mineralization in the volcanic sedimentary period and the retrograde alteration stage had the same metal source, namely the mafic volcanic rocks. Homogenization temperatures of fluid

收稿日期: 2017-03-10; 接受日期: 2017-12-01

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0601201); 新疆阿勒泰地区资源补偿奖励资金项目

作者简介: 李彦(1968-), 本科, 工程师, 从事地质矿产矿产和管理工作, E-mail: 1043081158@qq.com; 通讯作者: 杨成栋(1987-), 助理研究员, 主要从事金属矿床成矿作用研究, E-mail: ycd.198747@163.com。

inclusions of garnets at the early skarn stage vary from 160 to 403°C, generally in the range of 180 to 260 °C. Salinities range from 5% to 9% NaCleq; δD values range from -134‰ to -125‰ , and $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values are between 4.7‰ and 8.6‰, implying that the fluids were derived from magmatic fluids. Homogenization temperatures of fluid inclusions in the quartz-carbonate stage vary from 140 to 536°C, mainly in the range of 160 to 340°C, and the salinities range from 6% to 16% NaCleq, which indicates that the fluids are characterized by the evolution from high to low temperatures, moderate-low salinities, and moderate-low densities. δD values of quartz range from -98‰ to -95‰ , and $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values are between -0.6‰ and 2.0‰ , showing that the fluids in this stage were derived from magmatic fluids, with some contributions from the meteoric water.

Key words: iron deposit; geological characteristics; metallogenic mechanism; Shigente; Altay; Xinjiang

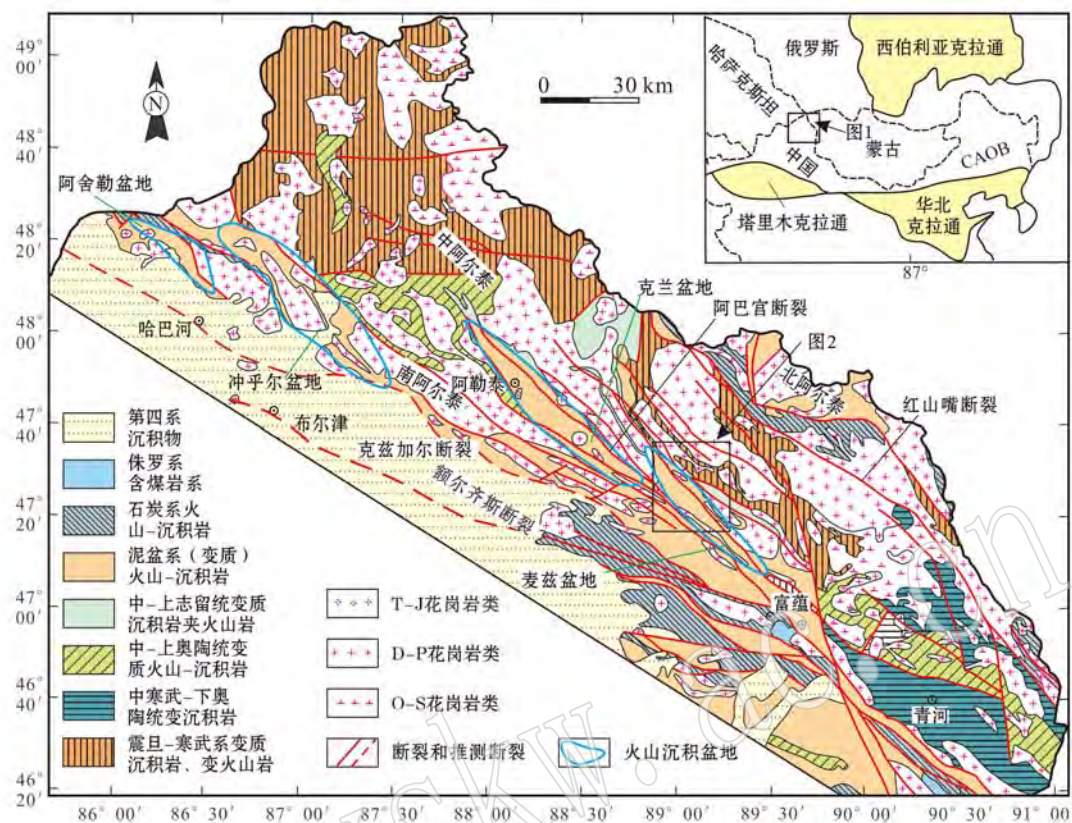
Fund support: National Key R&D Program of China (2017YFC0601201); Xinjiang Altay Region Resources Compensation Fund Projects

新疆阿尔泰山南缘是我国重要的有色金属成矿带之一,也是新疆铁矿重要产地。这些矿床主要分布于泥盆纪 4 个斜列的火山沉积盆地中,从北西南东依次为阿舍勒盆地、冲乎尔盆地、克兰盆地和麦兹盆地。矿床主要赋存于上志留-下泥盆统康布铁堡组变质火山沉积岩系、下-中泥盆统阿舍勒组火山沉积岩系,少数赋存于中-上泥盆统阿勒泰镇组变质火山沉积岩系。与海相火山作用有关的矿床主要为 VMS 型、火山岩型和矽卡岩型铜、铅、锌、铁、金矿(王京彬等, 1998; 王登红等, 2002; 杨富全等, 2011), 如阿舍勒大型铜锌矿床(杨富全等, 2013, 2016)、萨尔朔克中型多金属矿(杨富全等, 2015; Yang *et al.*, 2017a)、可可塔勒大型铅锌矿(Wan *et al.*, 2010)、蒙库大型铁矿(杨富全等, 2008; Yang *et al.*, 2010)、阿巴宫中型铁磷矿(刘锋等, 2009)、托莫尔特中型铁锰矿(杨富全等, 2012)等。麦兹盆地矿产丰富, 主要有 VMS 型铅锌矿(如可可塔勒、铁列克萨依、大桥等)和矽卡岩型铁矿(如乌吐布拉克、蒙库等)。前人对麦兹盆地的铁矿进行了较详细地研究, 如总结了蒙库铁矿、乌吐布拉克铁矿、巴特巴克布拉克铁矿、巴利尔斯铁矿(Xu *et al.*, 2010; 张志欣等, 2011; 藏梅等, 2013; 杨俊杰等, 2016)的成矿规律(张建中等, 1987; 王登红等, 2002; 张振福, 2003; 杨富全等, 2011)。对于麦兹盆地铁矿成因存在较多争议, 主要集中在主成矿作用是矽卡岩型和火山岩型之争(张建中等, 1987; 王登红等, 2002; Wang *et al.*, 2003; 郭正林等, 2006; 杨富全等, 2011), 麦兹盆地有没有火山岩型铁矿是一个重要科学问题, 关系到区域成矿规律总结和下一步找矿方向。什根特是新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第四地质大队近年来发现的铁矿, 赋存于康布铁

堡组下亚组黑云母变粒岩、角闪斜长变粒岩、斜长角闪片岩中, 矿体呈层状, 透镜状, 顺层分布。尽管规模较小, 但初步研究表明, 该矿是麦兹盆地为数很少的火山沉积型铁矿。对该矿进行系统的研究, 有助于建立矿床模型和指导进一步找矿。本文重点描述了什根特铁矿的矿床地质特征, 开展磁铁矿电子探针, 磁铁矿主量元素、微量元素和稀土元素, 石榴子石和石英显微测温, 石榴子石和石英氢和氧同位素分析, 探讨了成矿机制, 为矿床模型构建和区域成矿规律总结提供依据。

1 区域地质背景

新疆阿尔泰山可划分为北阿尔泰山、中阿尔泰山和南阿尔泰山。北阿尔泰山位于红山嘴断裂以北, 主要由早泥盆世-早石炭世火山沉积岩组成。中阿尔泰山位于红山嘴断裂与阿巴宫-库尔提断裂之间, 主要为早古生代变质岩系。南阿尔泰山北以阿巴宫-库尔提断裂为界, 南以克兹加尔断裂为界与额尔齐斯构造带相邻, 主要由泥盆纪变质火山沉积岩系组成。阿舍勒盆地、冲乎尔盆地、克兰盆地和麦兹盆地是南阿尔泰山的重要组成部分(图 1), 也是与海相火山作用有关的铜、铅、锌、铁、金矿主要分布区。麦兹盆地出露地层主要有上志留统-下泥盆统康布铁堡组和中-上泥盆统阿勒泰镇组(图 2)。前者分为 2 个亚组, 下亚组以中深变质岩为主, 分为 2 个岩性段, 主要岩性为磁铁变粒岩、浅粒岩、斜长角闪岩、角闪片麻岩、黑云斜长片麻岩等, 并可见少量大理岩透镜体, 该组岩层的原生层理构造已基本消失, 主要被片理、片麻理取代, 是什根特铁矿的主要赋矿层位。上亚组为一套浅-中等变质的浅海相火山岩-火山碎屑沉积岩-陆源碎

图 1 新疆阿尔泰地质略图(据 Yang *et al.*, 2013 修改)Fig. 1 Simplified regional geological map of the Altay orogen belt (modified after Yang *et al.*, 2013)

屑沉积岩-碳酸盐岩组合,分为 3 个岩性段,主要岩性有片麻岩、变粒岩、浅粒岩、变质流纹岩、斜长角闪岩、变流纹质凝灰岩、变凝灰质砂岩、变火山角砾岩、角闪片岩、黑云石英片岩、变钙质砂岩、变长石石英粉砂岩、大理岩等。阿勒泰镇组为一套浅-中等变质碎屑沉积-泥质沉积-碳酸盐沉积组合,下部为泥质沉积-碳酸盐沉积组合,主要岩性有黑云石英片岩、变钙质砂岩、大理岩,局部见变流纹质凝灰岩夹层,上部为变粉砂岩、变钙质砂岩。

麦兹盆地构造活动强烈,主要为麦兹复式向斜,其内部次级褶皱和北西-南东向断裂均发育。向斜核部地层为阿勒泰镇组,两翼为康布铁堡组;轴面倾向北东,南西翼地层层序正常,北东翼倒转。次级褶皱多分布于麦兹复式向斜北东翼,均为紧闭线性褶皱。区内断裂发育,断裂带内岩石碎裂,形成构造角砾岩、片理化和片麻理化。

侵入岩以早泥盆世花岗岩类为主,主要分布于麦兹向斜两翼外侧,沿北西向构造线展布,岩性主要为英云闪长岩、黑云母花岗岩及花岗斑岩等。蒙库矿区及外围片麻状英云闪长岩和(黑云母)花岗岩

锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 378 ~ 404 Ma(童英等,2007; Yang *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2010)。乌吐布拉克矿区南(黑云母)英云闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 386 ~ 388 Ma(张志欣等,2011)。另有少量中基性岩脉,分布于麦兹向斜内部,岩性主要为角闪岩、辉长苏长岩及辉长辉绿岩等。

麦兹盆地矿产丰富,以铅锌矿和铁矿为特色,这些矿床均赋存于康布铁堡组中,矿床类型主要有 VMS 型铅锌矿(如可可塔勒、铁列克萨依、大桥、阿克哈仁等)、矽卡岩型铁矿(如乌吐布拉克、蒙库、巴特巴克布拉克等),少量火山岩型铁矿(如什根特)和多金属矿(如红岭铁锰铅锌矿)。

2 矿床地质特征

2.1 含矿岩系

什根特铁矿床位于麦兹盆地,据富蕴县城北西直线距离约 92 km。矿区出露地层为康布铁堡组下亚组,贯穿矿区中部,呈北西-南东向延伸(图3)。第一

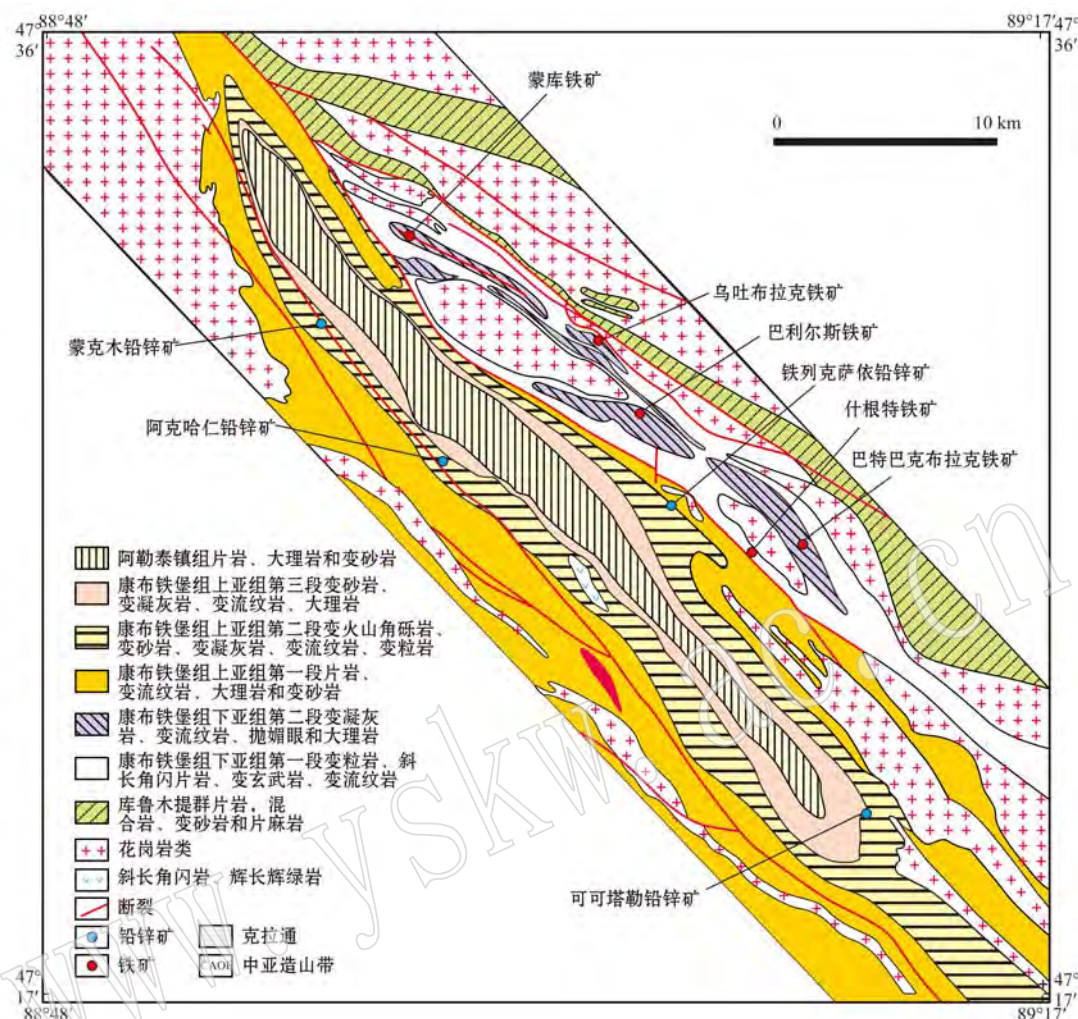


图 2 麦兹盆地地质矿产略图(据新疆有色地质勘查局 706 队,2003^①资料修改)

Fig. 2 Geological and mineral sketch map of the Maizi Basin (modified after No. 706 Geological Party, Xinjiang Nonferrous Georexploration Bureau, 2003^①)

岩性段为黑云(磁铁)变粒岩、黑云钾长变粒岩、黑云石英片岩、角闪黑云片岩、角闪斜长变粒岩(图 4c)、浅粒岩、含二云钾长浅粒岩夹黑云斜长片麻岩、不纯大理岩。第二岩性段为(二长)浅粒岩、含角闪浅粒岩、含(黑云)磁铁矿二长浅粒岩(图 4a)、长石石英岩(图 4b)夹少量大理岩、斜长角闪岩(原岩为基性火山岩)。

2.2 侵入岩及构造

矿区及外围侵入岩主要为北部的细粒英云闪长岩,岩石具弱片麻状构造。火山岩地层中伟晶岩脉较发育,呈北西向分布。岩体与地层接触部位和伟晶岩中均可见磁铁矿化。区内褶皱构造发育,由南

西向东北依次划分出南部背斜、中部向斜和北部背斜,均呈北西-南东向展布。

2.3 矿体及矿石特征

矿体赋存于康布铁堡组下亚组第一岩性段变粒岩、斜长角闪岩,或变粒岩与细粒英云闪长岩的接触部位(图 5b),有部分矿化赋存于伟晶岩中(图 5b)。矿区地表出露主要铁矿体 3 条,均顺层产出,常呈铁帽(褐铁矿化)或含磁铁矿蚀变带产出(图 5a、5c)。矿体总体走向北西-近东西向,倾向北东。矿体形态以似层状、脉状、透镜状为主,在平面上显示平行排列,沿走向常见膨胀收缩、尖灭再现。矿体规模大小不一,单个矿体长 30~170 m 不等,宽约 3~8 m,赋

① 新疆有色地质勘查局 706 队. 2003. 新疆阿尔泰可可塔勒铅锌矿床东段详查报告.

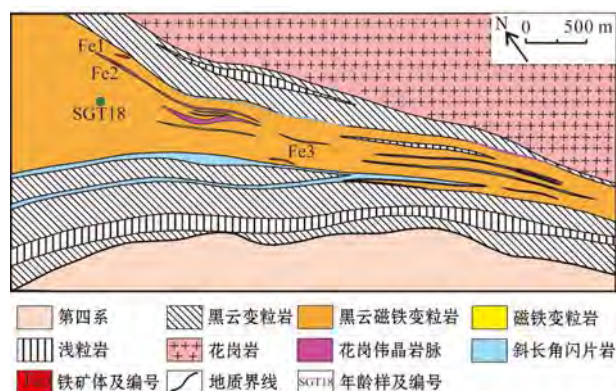


图 3 什根特铁矿区地质略图(据新疆地质矿产勘查开发局第四地质大队, 2015^①)

Fig. 3 Simplified geological map of the Shigente iron ore district (after No. 4 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2015^①)

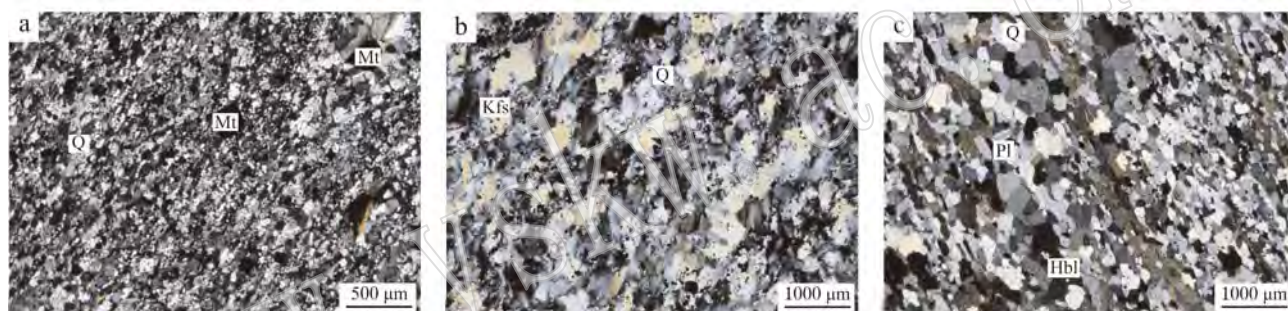


图 4 什根特铁含矿火山岩系镜下特征(+)

Fig. 4 Photomicrographs of ore-bearing volcanic rocks from the Shigente iron deposit(+)

a—含磁铁矿二长浅粒岩; b—长石英岩; c—角闪斜长变粒岩; Mt—磁铁矿; Q—石英; Pl—斜长石; Hbl—角闪石; Kfs—钾长石
a—magnetite monzo-leucopelite; b—feldspar quartzite; c—amphibole plagioclase granulite; Mt—magnetite; Q—quartz; Pl—plagioclase; Hbl—hornblende; Kfs—K-feldspar

根据矿体、矿石特征、蚀变、矿物组合及生成关系, 将什根特铁矿成矿过程划分为海相火山沉积期、岩浆热液(矽卡岩)期和区域变质期。火山沉积期主要形成块状、条带状、浸染状铁矿化, 顺层分布, 是铁主要成矿期, 矿区含矿岩系黑云变粒岩中较多的磁铁矿也是该阶段的产物。岩浆热液期与矿区北部细粒英云闪长岩侵入有关, 形成伟晶岩脉, 局部伴有磁铁矿化。同时形成矽卡岩化, 进一步划分为早期矽卡岩阶段、退化蚀变阶段和石英碳酸盐阶段。早期矽卡岩阶段主要形成石榴子石, 少量辉石; 退化蚀变阶段主要形成绿帘石、绿泥石和磁铁矿; 石英碳酸盐阶段主要形成石英(方解石)脉。区域变质期主要是含矿火山岩系和矿体发生褶皱变形, 原沉积变质期形成的铁矿物变成磁铁矿, 矿物颗粒发生重结晶变大。

存于条带状黑云母磁铁变粒岩、斜长角闪片岩中, 产状与围岩一致。产于斜长角闪片岩中的磁铁矿体上下盘均为黑云母变粒岩, 与围岩界线清楚。矿石平均 TFe 品位 38%~47.4%。矿石构造主要为条带状(图 5f)、块状(图 5h)、团块状(图 5e)、浸染状(图 5g)。矿石结构主要有它形粒状结构、半自形-它形粒状结构等。矿石中金属矿物主要为磁铁矿, 偶见孔雀石; 非金属矿物主要有石榴子石、绿帘石、石英、斜长石、钠长石、钾长石、绿泥石、角闪石、白云母。

2.4 围岩蚀变及成矿期次划分

围岩蚀变主要是石榴子石化、绿帘石化、硅化、碳酸盐化、伟晶岩化。伟晶岩化(主要矿物为钠长石、白云母和石英)主要呈脉状分布在矿体附近。矽卡岩化没有显示分带性, 可见矽卡岩化与磁铁矿关系密切(图 5e)。

3 样品及分析方法

3.1 电子探针样品

选取 4 件条带状磁铁矿样品进行了镜下观察和磁铁矿电子探针主量元素分析。电子探针分析工作在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成, 仪器型号为 JXA-8230 电子探针仪, 仪器工作条件: 20 nA、电压 15 kV, 束斑直径 5 μm。

3.2 单矿物地球化学分析

对 5 件磁铁矿进行了主量、微量及稀土元素地球化学分析。SET12-1 和 SET12-11 来自火山沉积期, 为含磁铁矿变粒岩, 其他 3 件来自退化蚀变阶段, 为石榴子石磁铁矿石。测试单位为国家地质实验测试中心, 主量元素采用熔片 XRF 方法(国家标

① 新疆地质矿产勘查开发局第四地质大队, 2015. 新疆阿尔泰什根特铁矿靶区验证报告.

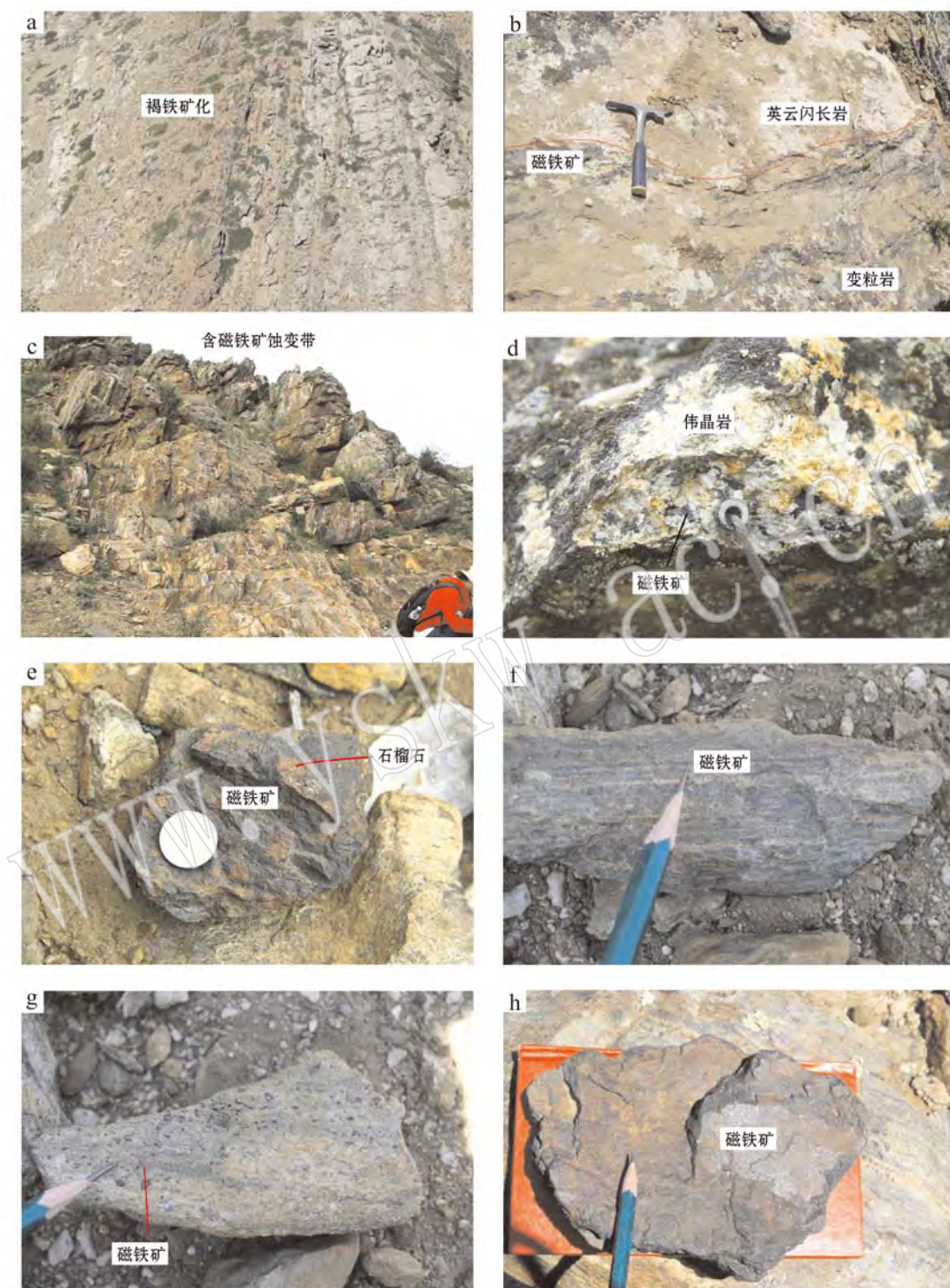


图 5 什根特铁矿矿化特征

Fig. 5 Characteristics of mineralization in the Shigente iron deposit

- a—地表褐铁矿化；b—磁铁矿分布于英云闪长岩与变粒岩接触带上；c—磁铁矿蚀变带；d—磁铁矿浸染状分布于伟晶岩中；e—石榴子石磁铁矿矿石；f—一条带状磁铁矿；g—磁铁矿浸染状分布于变粒岩中；h—块状磁铁矿
a—ferritization on the earth's surface; b—magnetite is distributed in the contact zone of the tonalite and granulite; c—magnetite alteration zone; d—magnetite occurring as disseminations in the pegmatite; e—garnet magnetite ore; f—magnetite ore with banded structure; g—magnetite occurring as disseminations in the granulite; h—magnetite ore with massive structure

准 GB/T14506.28-1993 监控) 在 X 荧光光谱仪 3080E 上测定, 其中 FeO 采用容量滴定法(国家标准

GB/T14506.13-1993 监控), 稀土和微量元素先采用 Teflon 熔样罐进行熔样, 然后采用 FinniganMAT 公

司生产的双聚焦高分辨 ICP-MS 进行测定(标准 DZ/T 0223-2001 监控),相对标准偏差优于 5%。

3.3 包裹体及氢氧同位素样品

本次对什根特铁矿 8 件采自岩浆热液期早期矽卡岩阶段和石英碳酸盐阶段的石榴子石磁铁矿矿石、石英脉等进行了流体包裹体特征研究。将样品磨成厚度为 0.25~0.3 mm 双面光包体片,对其中石榴子石和石英进行流体包裹体岩相学和显微测温研究。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 冷热台上进行,可测温范围为-196~+600℃,精度为±0.1℃。

对 3 件采自早期矽卡岩阶段石榴子石磁铁矿矿石中石榴子石和 3 件石英碳酸盐阶段的石英进行 H 和 O 同位素分析。首先挑选用于氢、氧同位素测试的石榴子石和石英单矿物,纯度达 99% 以上。氧同位素分析方法为 BrF₅ 法(Clayton and Mayeda, 1963),首先将纯净样品与 BrF₅ 反应 15 h,萃取氧。分离出的氧进入 CO₂ 转化系统,温度为 700℃,时间为 12 min,最后收集 CO₂(Mao *et al.*, 2002)。

氢同位素分析采用爆裂法,其测试程序为:加热石榴子石和石英包裹体样品使其爆裂,释放挥发分,提取水蒸汽,然后在 400℃ 条件下使水与锌反应

产生氢气,再用液氮冷冻后,收集到有活性炭的样品瓶中(Coleman *et al.*, 1982)。石榴子石氢和氧同位素在核工业北京地质研究所分析,石英氢和氧同位素在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室分析,用 MAT 253 EM 质谱计进行测试。氧同位素的分析精密度为±0.2‰,氢同位素的分析精密度为±2‰。

4 分析结果

4.1 磁铁矿元素地球化学

电子探针分析结果显示(表 1),4 件条带状磁铁矿矿石中 8 个磁铁矿点的主量元素特征如下:FeO^T 含量变化于 91.807%~94.307%,平均为 92.983%,表明磁铁矿纯度较高;其它元素含量较低,如 MnO (0.018%~0.233%)、Al₂O₃ (0.000~0.043%)、SiO₂ (0.000~0.455%)、V₂O₃ (0.000~0.055%)、Cr₂O₃ (0.000~0.318%),TiO₂、MgO 多数低于检出限,只有 2 个点分别为 0.059% 和 0.093%、0.014% 和 0.018%。磁铁矿具有富 Fe,贫 Si、Ti、V、Mg、Mn 特征。FeO^T 含量与 Al₂O₃ 含量具有正相关,与 SiO₂ 为负相关,随着 SiO₂ 增加,FeO^T 含量下降,表明相对基性的环境更适合铁矿形成。FeO^T 含量与 Mn 含量关系复杂(图 6)。

表 1 什根特铁矿磁铁矿电子探针分析结果 w_B/%
Table 1 EMPA data of magnetite in the Shigente iron deposit

点号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	NiO	MnO	FeO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Total
SGT12-1-1.1	0.017	0.000	0.039	0.225	0.000	0.000	0.040	93.411	0.000	0.009	93.741
SGT12-1-2.1	0.000	0.000	0.000	0.041	0.000	0.000	0.018	92.531	0.020	0.055	92.670
SGT12-1-3.1	0.018	0.018	0.006	0.455	0.000	0.002	0.049	92.117	0.019	0.000	92.696
SGT12-2-1.1	0.002	0.000	0.025	0.041	0.059	0.000	0.055	93.985	0.010	0.000	94.177
SGT12-2-2.1	0.028	0.014	0.039	0.244	0.000	0.000	0.073	91.807	0.318	0.006	92.529
SGT12-3-2.2	0.024	0.000	0.043	0.132	0.000	0.032	0.024	94.307	0.000	0.026	94.588
SGT12-4-1.1	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.214	92.900	0.042	0.045	93.207
SGT12-4-3.1	0.000	0.000	0.016	0.000	0.093	0.000	0.233	92.805	0.005	0.035	93.187

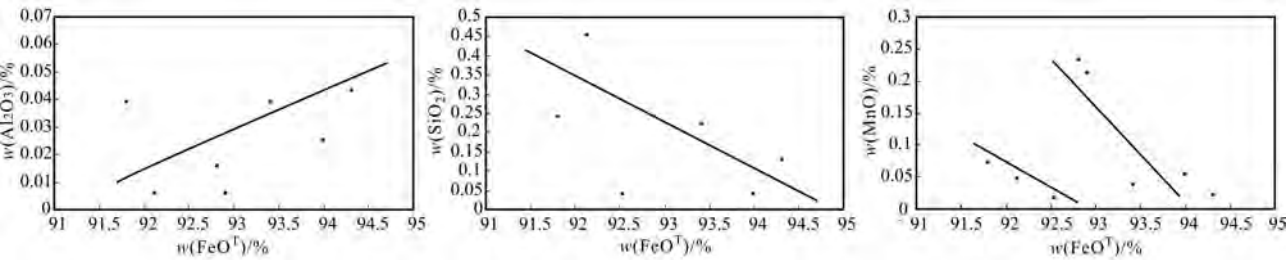


图 6 什根特铁矿磁铁矿主量元素协变图

Fig. 6 Covariation diagram of major oxides of magnetite by electron microprobe analysis in the Shigente iron deposit

5 件磁铁矿的主量元素化学分析结果表明(表 2), $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量变化于 99.06% ~ 101.50%, MnO

表 2 什根特铁矿磁铁矿主量元素($w_{\text{B}}/\%$)、稀土元素和微量元素($w_{\text{B}}/10^{-6}$)含量

Table 2 Chemical compositions of major elements ($w_{\text{B}}/\%$), trace elements and rare earth elements ($w_{\text{B}}/10^{-6}$) in the magnetite from the Shigente iron deposit

样品号	SGT12-1	SGT12-6	SGT12-9	SGT12-10	SGT12-11
SiO_2	0.59	0.57	0.47	0.23	0.30
Al_2O_3	0.11	0.19	0.06	0.09	0.10
CaO	0.13	0.06	0.09	0.06	0.10
$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$	101.4	100.5	99.06	101.5	100.9
K_2O	<0.05	0.08	<0.05	<0.05	<0.05
MgO	0.15	0.13	0.13	0.14	0.14
MnO	0.29	0.36	0.49	0.41	0.21
Na_2O	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
P_2O_5	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
TiO_2	0.09	0.05	0.03	0.04	0.04
LOI	-2.55	-1.75	-0.29	-2.60	-2.34
Total	100.21	100.11	100.04	99.87	99.45
Cr	147.0	58.3	2.6	5.1	45.0
Co	28.0	32.3	50.3	36.0	36.9
Ni	31.1	31.9	63.0	46.2	24.3
Ge	2.34	2.09	3.01	2.65	1.95
Zn	126	73	881	276	209
Rb	0.26	2.29	0.12	0.10	0.17
Sr	0.94	0.99	0.62	0.28	1.22
Y	5.17	0.73	17.60	1.86	6.59
Zr	99.1	32.0	3.0	142.0	245.0
Nb	1.03	0.09	0.45	0.27	1.94
Ba	17.50	21.10	9.41	7.26	7.44
Hf	2.71	0.74	0.14	3.21	6.00
Ga	30.3	19.7	56.6	32.8	36.7
Ta	0.09	<0.05	0.19	<0.05	0.16
Sc	1.14	4.52	0.93	5.39	3.79
Th	1.10	1.79	0.22	2.45	13.4
U	0.89	0.28	3.18	1.16	3.17
V	312	203	364	162	164
Pb	93.5	17.6	20.9	6.7	17.5
La	0.98	0.64	2.94	0.31	1.88
Ce	1.26	1.30	3.28	0.56	2.66
Pr	0.29	0.19	0.88	0.08	0.46
Nd	1.20	0.61	3.30	0.29	1.74
Sm	0.32	0.12	0.66	0.08	0.35
Eu	0.12	<0.05	0.16	<0.05	0.11
Gd	0.55	0.13	1.25	0.13	0.64
Tb	0.09	<0.05	0.21	<0.05	0.10
Dy	0.56	0.10	1.48	0.19	0.66
Ho	0.12	<0.05	0.38	<0.05	0.18
Er	0.41	0.07	1.34	0.16	0.65
Tm	0.07	<0.05	0.23	<0.05	0.11
Yb	0.56	0.10	1.73	0.25	0.95
Lu	0.11	<0.05	0.35	0.05	0.21
ΣREE	6.64	<3.51	18.19	<2.30	10.70
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	1.26	4.59	1.22	0.89	1.42
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	1.98	3.44	2.88	2.50	3.47
$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$	0.81	1.08	0.60	0.43	0.56
δEu	0.87		0.53		0.70

注: SET12-1 和 SET12-11 来自火山沉积期,其他 3 件来自退化蚀变阶段。

(0.21% ~ 0.49%), Al_2O_3 (0.06% ~ 0.19%), TiO_2 (0.03% ~ 0.09%), SiO_2 (0.23% ~ 0.59%), MgO (0.13% ~ 0.15%)。与电子探针数据相比, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量增加,其他元素含量变化不大。两种方法的测试结果基本一致,表明磁铁矿纯度较高,其他成分含量很低的特点。

磁铁矿单矿物 ICP-MS 微量元素分析(表 2)表明,磁铁矿的 ΣREE 低($<2.30 \times 10^{-6} \sim 18.19 \times 10^{-6}$),相对富集 LREE ($\text{LREE}/\text{HREE} = 1.61 \sim 2.06$), LREE 分异较 HREE 略明显[(La/Sm) $_{\text{N}} = 1.98 \sim 3.47$, (Gd/Yb) $_{\text{N}} = 0.43 \sim 1.08$]。3 件样品具有中等负 Eu 异常($\text{Eu} = 0.53 \sim 0.87$),在磁铁矿稀土元素球粒陨石标准化配分图上,曲线平缓,具有 Ce 和 Eu 负异常的 V 字形(图 7a),火山沉积期和退化蚀变阶段磁铁矿曲线特征相似。

磁铁矿中 Zn 含量为 $73 \times 10^{-6} \sim 881 \times 10^{-6}$, 平均值 313×10^{-6} 。V 为 $162 \times 10^{-6} \sim 364 \times 10^{-6}$, 平均值 208×10^{-6} 。Sc 为 $0.93 \times 10^{-6} \sim 5.39 \times 10^{-6}$, 平均值 3.15×10^{-6} 。Ga 为 $19.7 \times 10^{-6} \sim 56.6 \times 10^{-6}$, 平均值 35.2×10^{-6} 。Co 含量为 $28.0 \times 10^{-6} \sim 50.3 \times 10^{-6}$, 平均 36.7×10^{-6} , Ni 含量为 $24.3 \times 10^{-6} \sim 63.0 \times 10^{-6}$, 平均 39.3×10^{-6} , Ni/Co 值为 0.66 ~ 1.11, 平均 1.06。Zn/V 值为 0.36 ~ 1.70, 平均 1.23。在磁铁矿原始地幔标准化蛛网图上, Th、U、La、Zr 和 Hf 相对富集, Rb、Nb、Sr 和 Ti 相对亏损(图 7b),火山沉积期和退化蚀变阶段磁铁矿曲线特征相似。

4.2 流体包裹体特征及显微测温结果

石榴子石中原生流体包裹体以液体包裹体为主,少量气体包裹体和含子矿物多相包裹体。液体包裹体中气液比占 5% ~ 30%(图 8),气体包裹体中气液比占 60%。含子矿物包裹体中可见暗色不透明金属矿物。

见表 3,石榴子石液体和气体包裹体均一温度变化较大,介于 160 ~ 403℃,集中在 180 ~ 260℃,峰值为 200℃ 和 250℃。冰点温度为 $-12.9 \sim -0.1^\circ\text{C}$,在冷冻法冰点-盐度关系表中(Bodnar, 1993)查得流体盐度为 0.18% ~ 16.80%(质量分数, NaCl_{eq} , 全文同),集中在 5% ~ 9%(图 9),密度为 0.75 ~ 1.00 g/cm³。含子矿物多相包裹体气泡消失温度 200 ~ 262℃,子矿物消失温度高于气泡消失温度,有的子矿物加温到 600℃ 仍然不消失,为过饱和盐水包裹体,是子矿物和溶液同时捕获的产物,子矿物的溶

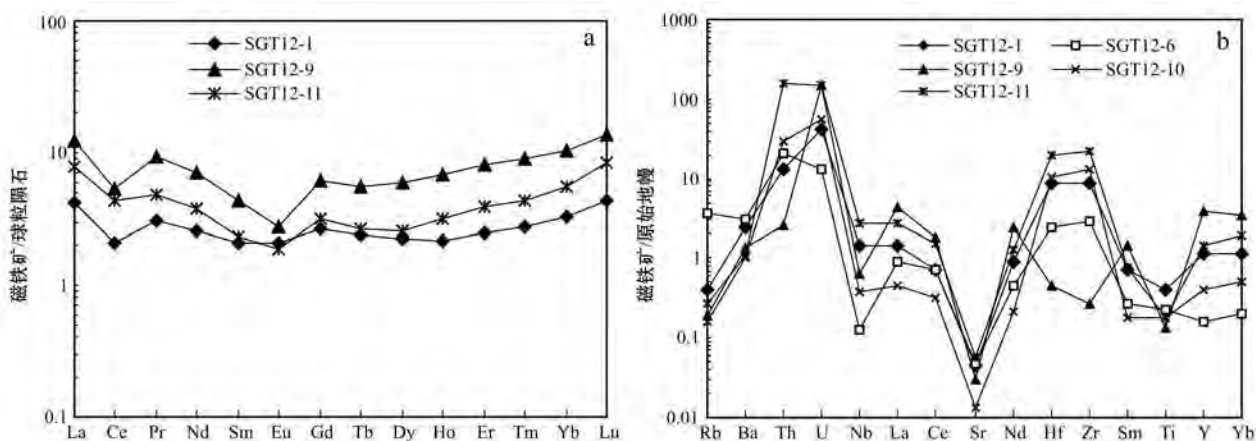


图 7 什根特铁矿磁铁矿稀土元素球粒陨石标准化图(a)和微量元素原始地幔蛛网图(b) (球粒陨石和原始地幔据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of the magnetite from the Shigente iron deposit (chondrite-normalized and primitive mantle-normalized values after Sun and McDonough, 1989)

化温度不能代表溶液的真实盐度 (Mao *et al.*, 2003)。

石英中以液体包裹体为主, 少量为含液体 CO_2 的三相包裹体(图 8)、气体包裹体和含子矿物多相包裹

体。液体包裹体中气液比为 5%~50%(图 8), 气体包裹体中气液比占 50%~80%。含液体 CO_2 的三相包裹体由液相 CO_2 、气体 CO_2 和水溶液组成, 包裹体较大, 长轴 10~20 μm , CO_2 与水溶液相比为 25%~50%。

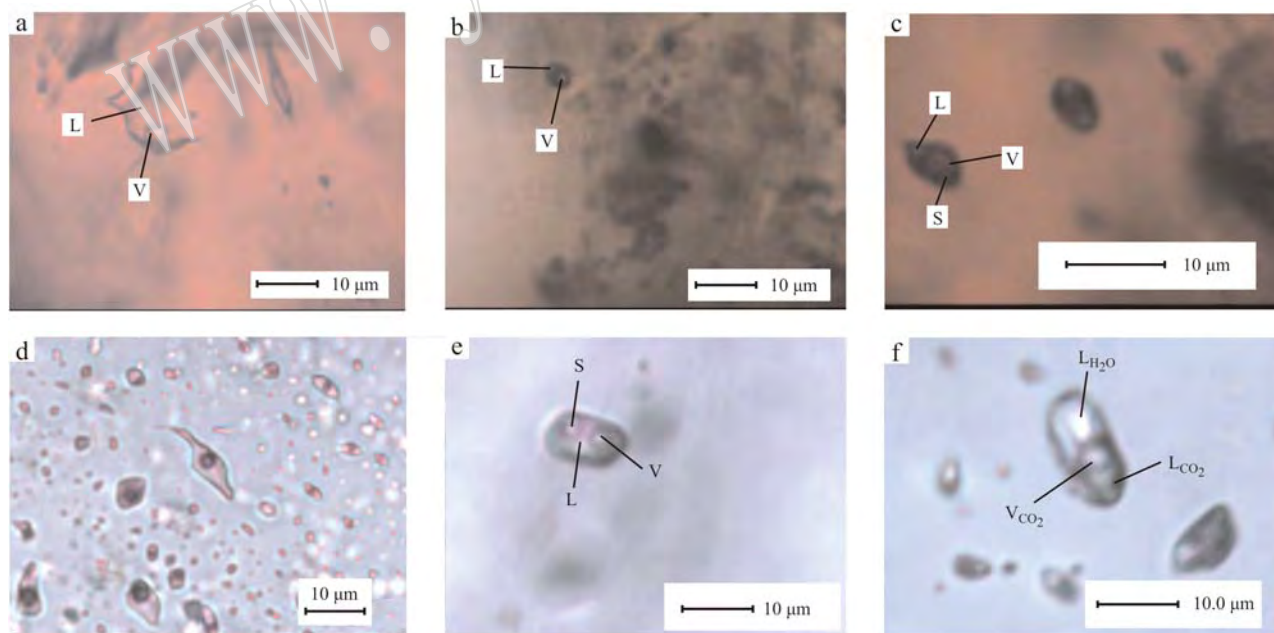


图 8 什根特铁矿流体包裹体显微照片

Fig. 8 Photomicrographs of fluid inclusions from the Shigente iron deposit

a—石榴子石液相包裹体; b—石榴子石气体包裹体; c—石榴子石含子矿物包裹体; d—石英液体包裹体; e—石英含子矿物包裹体; f—石英三相 CO_2 包裹体; L—液相; V—气相; S—子矿物; L_{CO_2} —液相 CO_2 ; V_{CO_2} —气相 CO_2 ; $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ —水溶液

a—liquid inclusions in garnet; b—vapor inclusions in garnet; c—daughter mineral-bearing inclusions in garnet; d—liquid inclusions in quartz; e—daughter mineral-bearing inclusions in quartz; f—three-phase CO_2 -type inclusions in quartz; L—liquid; V—vapor; S—daughter mineral; L_{CO_2} —liquid CO_2 ; V_{CO_2} —vapor CO_2 ; $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ —aqueous liquid

表 3 什根特铁矿石石榴子石和石英中流体包裹体显微测温结果

Table 3 Microthermometric data for the fluid inclusions in garnet and quartz from the Shigente iron deposit

主矿物	包裹体类型	$T_{m_{ice}}/^{\circ}C(N)$	$T_{m_{hal}}/^{\circ}C(N)$	$T_{h_{tot}}/^{\circ}C(N)$	盐度/%	$\rho/g\cdot cm^{-3}$
石榴子石	液体	$-12.9\sim-0.1(17)$		$160\sim323(28)$	$0.18\sim16.80(17)$	$0.75\sim1.00$
	气体			$403(1)$		
	含子矿物	$-6.5\sim-1.9(2)$	$>450(2)$	$200\sim306(4)$	$3.23\sim9.86(2)$	$0.85\sim0.90$
石英	液体	$-16.6\sim-0.1(43)$		$140\sim473(82)$	$0.18\sim19.53(43)$	$0.65\sim1.05$
	气体	$-1.8(1)$		$373\sim>600(6)$		
	含子矿物	$-11.3(1)$	$>400(1)$	$161(1)$	$15.27(1)$	$1.00\sim1.05$

注: $T_{m_{ice}}$ 冰点温度, $T_{m_{hal}}$ 子矿物融化温度, $T_{h_{tot}}$ 完全均一温度, N 测定包裹体数量。

石英中 3 个气体包裹体均一温度较高,变化于 $373\sim536^{\circ}C$,另外 3 个包裹体加温到 $600^{\circ}C$ 气泡仍然不消失。获得 1 个包裹体冰点温度分布于 $-1.8^{\circ}C$,盐度为 3.06%。液体包裹体均一温度变化于 $140\sim473^{\circ}C$,主要集中在 $160\sim340^{\circ}C$,峰值在 $170^{\circ}C$ 、 $210^{\circ}C$ 和 $270^{\circ}C$;盐度变化范围大,介于 $0.18\%\sim19.53\%$,峰值为 6.5%、10.5% 和 15%。一个含子矿物多相包裹体气泡消失温度为 $161^{\circ}C$,子矿物融化温度大于 $400^{\circ}C$,盐度为 15.27%。对 7 个含 CO_2 三相包裹体进行显微测温, CO_2 的初熔温度为 $-56.8\sim-57.4^{\circ}C$,表明流体成分中除 CO_2 外,还存在少量 CH_4 或 N_2 (Burruss, 1981)。2 个含液体 CO_2 的三相

包裹体笼形化合物熔化温度为 $4.1\sim6.5^{\circ}C$,根据 Collins(1979)利用笼形化合物的熔化温度和盐度关系表,求的 CO_2 型包裹体盐度为 $6.54\%\sim10.33\%$ 。4 个含液体 CO_2 三相包裹体的部分均一温度为 $26.6\sim28.1^{\circ}C$,包裹体完全均一温度为 $234\sim332^{\circ}C$ 。

4.3 氢氧同位素特征

对 3 件石榴子石和 3 件石英进行了 H、O 同位素测定(表 4)。石榴子石 δD 为 $-125\text{‰}\sim-134\text{‰}$, $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值介于 $5.0\text{‰}\sim7.8\text{‰}$ 。使用石榴子石-水分馏方程 $1000\alpha = 1.22 \times 10^6 T^{-2} - 4.88$ (Taylor, 1976)和石榴子石中流体包裹体均一温度平均值,计算流体的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 $4.7\text{‰}\sim8.6\text{‰}$ 。

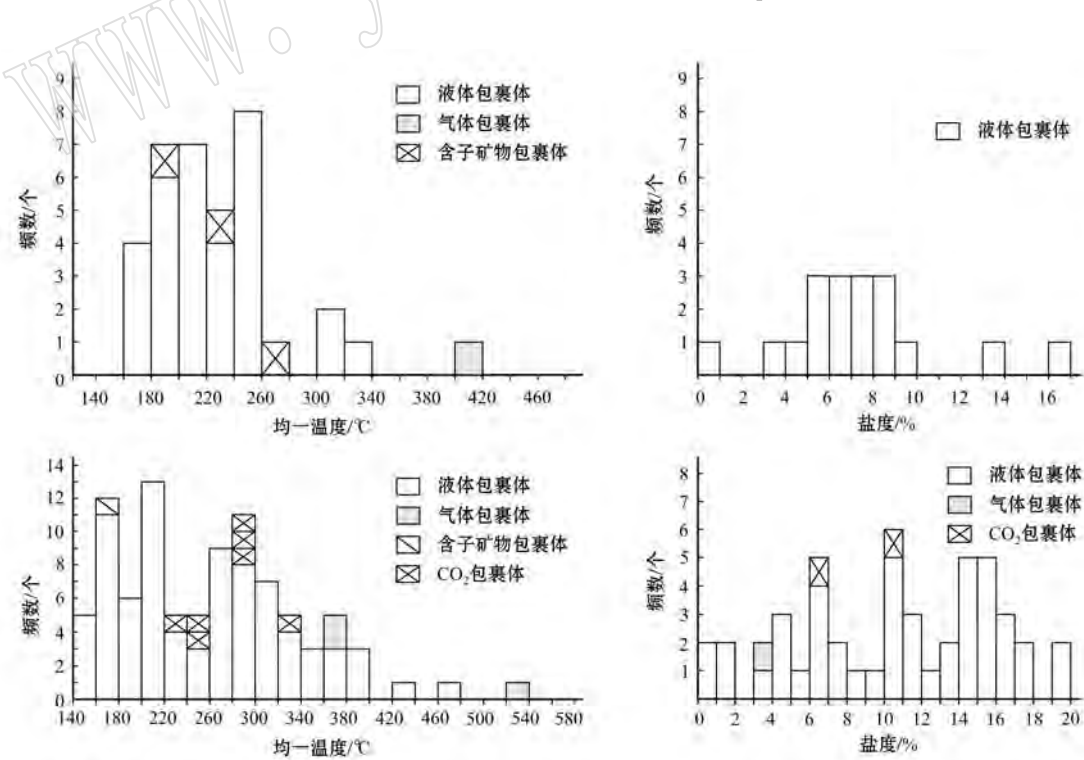


图 9 什根特铁矿流体包裹体均一温度和盐度直方图

Fig. 9 Histograms of homogenization temperature and salinity for the inclusions of the Shigente iron deposit

3 件石英的 δD 变化范围较大, 介于 $-98\text{‰} \sim -95\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值介于 $8.4\text{‰} \sim 9.6\text{‰}$ 。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 $-0.6\text{‰} \sim -2.0\text{‰}$ 。

表 4 什根特铁矿石榴子石和石英 H 和 O 同位素结果

Table 4 Oxygen and hydrogen isotopic data of the garnet and quartz from the Shigente iron deposit

样品号	样品名称	矿物	$\delta D_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$
SGT12-1	石榴子石磁铁矿矿石	石榴子石	-133	5.0	210	4.7
SGT12-2	石榴子石磁铁矿矿石	石榴子石	-134	7.8	272	8.6
SGT12-3	石榴子石磁铁矿矿石	石榴子石	-125	6.7	258	7.3
SGT12-13	含石英脉磁铁矿矿石	石英	-95	9.6	282	2.0
SGT12-15	含石英脉磁铁矿矿石	石英	-98	8.4	250	-0.6
SGT12-16	含石英脉磁铁矿矿石	石英	-97	8.8	251	-0.1

5 讨论

5.1 磁铁矿成因标型

林师整(1982)统计分析了国内外大量磁铁矿单矿物数据, 作出了 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$ 三角成因图解(图 10)。在该图解中什根特铁火山沉积期 2 件样品落在沉积变质型范围内, 表明磁铁矿的形成经历过沉积作用和变质过程; 3 件退化蚀变阶段样品落在矽卡岩型范围内。磁铁矿成因判别图解与地质特征一致。

磁铁矿中 Ni 等含量是反映成矿过程及成因的一个重要标志(徐国凤等, 1979; 王奎仁, 1989; 陈光远等, 1989), 前人认为岩浆成因磁铁矿的 Ni 含量较高 $100 \times 10^{-6} \sim 440 \times 10^{-6}$, 气液交代成因磁铁矿中 Ni 通常偏低(平均 30×10^{-6})。什根特铁矿 2 件火山沉积期磁铁矿 Ni 含量 ($24.3 \times 10^{-6} \sim 31.1 \times 10^{-6}$) 低于岩浆热液期的退化蚀变阶段 ($31.9 \times 10^{-6} \sim 63.0 \times 10^{-6}$), Co 含量也存在差别, 火山沉积期 ($28 \times 10^{-6} \sim 36.9 \times 10^{-6}$) 低于退化蚀变阶段 ($32.3 \times 10^{-6} \sim 50.3 \times 10^{-6}$); 而 Cr 和 TiO_2 含量火山沉积期 ($45 \times 10^{-6} \sim 147 \times 10^{-6}$, $0.04 \times 10^{-2} \sim 0.09 \times 10^{-2}$) 明显高于退化蚀变阶段 ($2.6 \times 10^{-6} \sim 58.3 \times 10^{-6}$, $0.03 \times 10^{-2} \sim 0.05 \times 10^{-2}$)。这些微量元素特征反映出火山沉积期和退化蚀变阶段具有不同的物理化学条件和矿物形成过程。一般认为, Ni、Co 更易于在地壳深部富集, 高 Ni/Co 值是深源的特征(严炳铨等, 1993)。什根特铁矿 5 件磁铁矿 Ni/Co 值为 $0.66 \sim 1.11$, 平均 1.06, 大于 1, 表明其成因可能与深部物质有关。

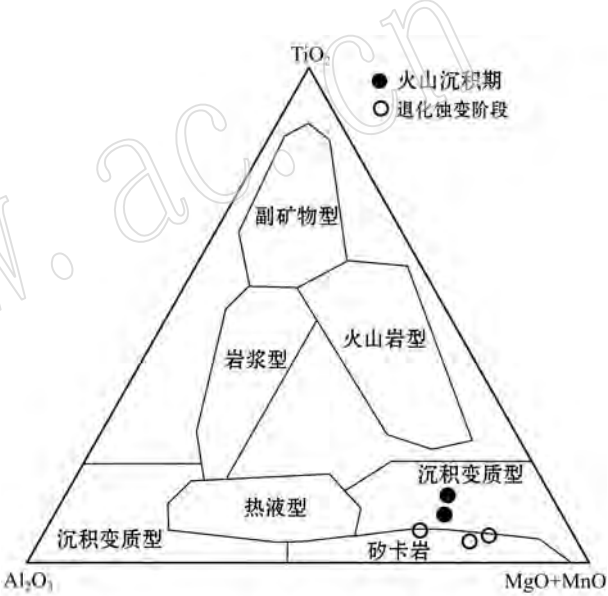


图 10 什根特铁矿磁铁矿 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$ 成因图解(底图据林师整, 1982)

Fig. 10 Ternary plot of $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$ from the Shigente iron deposit (after Lin Shizheng, 1982)

火山沉积期和岩浆热液期退化蚀变阶段的磁铁矿均具有富 Fe, 贫 Si、Ti、V、Mg、Mn 特点; 稀土元素均具有轻稀土略富集, 中等负 Eu 和 Ce 异常的相似配分模式图; 在磁铁矿原始地幔标准化蛛网图上, 火山沉积期和退化蚀变阶段磁铁矿均具有 Th、U、La、Zr 和 Hf 相对富集, Rb、Nb、Sr 和 Ti 相对亏损的曲线特征, 指示火山沉积期和退化蚀变阶段的铁矿具有相同的物质来源, 即均来自基性火山岩。

Ce 有两种价态(Ce^{3+} 和 Ce^{4+}), 对氧化还原环境敏感, 常作为示踪沉积盆地古海水的氧化还原状态(Fryer, 1977), Ce 负异常通常反映氧化环境。什根

特铁火山沉积期和退化蚀变阶段磁铁矿均具有负 Ce 异常, $\delta Ce = 0.49 \sim 0.90$, 表明磁铁矿形成于氧化环境。

5.2 成矿流体性质

岩浆热液期早期矽卡岩阶段石榴子石中流体包裹体均一温度为 $160 \sim 403^\circ\text{C}$, 集中在 $180 \sim 260^\circ\text{C}$, 盐度为 $0.18\% \sim 16.80\%$, 集中在 $5\% \sim 9\%$, 密度为 $0.75 \sim 1.00 \text{ g/cm}^3$, 表明早期矽卡岩阶段流体为中温、低盐度和中低密度的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系。均一温度与盐度相关图上(图 11), 盐度随着温度的升高而降低。

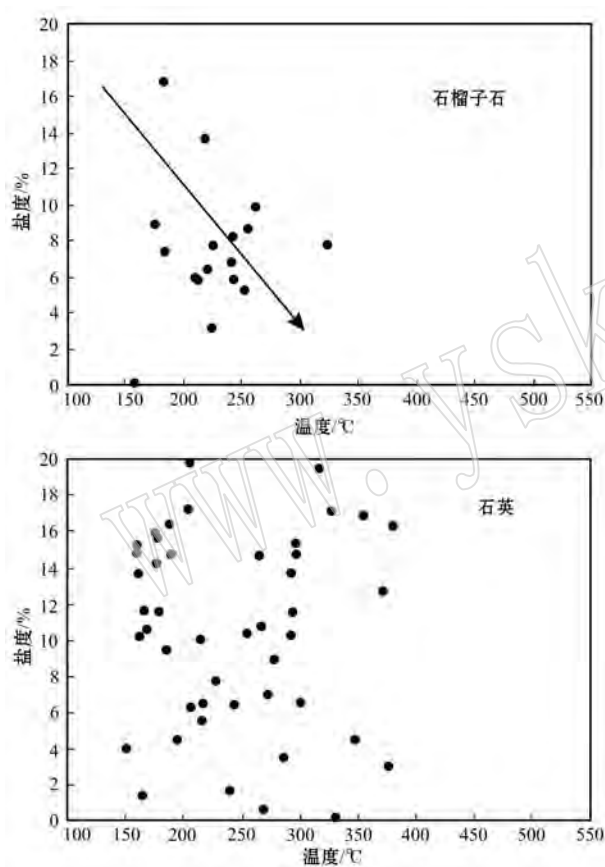


图 11 什根特铁矿均一温度-盐度关系图

Fig. 11 Diagram of homogenization temperatures versus salinity of fluid inclusions in the Shigente iron deposit

石英碳酸盐阶段石英中包裹体类型复杂, 以 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型为主, 还发育 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 型包裹体。流体包裹体均一温度 $140 \sim 536^\circ\text{C}$, 主要集中在 $160 \sim 340^\circ\text{C}$, 盐度变化于 $0.18\% \sim 19.53\%$, 集中在 $6\% \sim 16\%$, 密度为 $0.65 \sim 1.05 \text{ g/cm}^3$, 表明石英碳酸盐阶段流体具有从高温演化到低温、中低盐度和中低密度的特征。均一温度与盐度相关图上(图 11), 盐

度与温度相关性不明显。

5.3 成矿流体来源

3 件早期矽卡岩阶段石榴子石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $4.7\% \sim 8.6\%$, 落在岩浆水的范围内或接近岩浆水 ($5.5\% \sim 9.5\%$, Sheppard, 1986), δD 介于 $-134\% \sim -125\%$, 明显低于岩浆水范围 ($-80\% \sim -40\%$, Sheppard, 1986)。在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解中(图 12), 3 件样品点落在岩浆水下方。矽卡岩及铁矿化是矿区北部细粒英云闪长岩的岩浆热液交代火山岩的产物, 结合氢和氧同位素特征, 认为形成矽卡岩的流体来源于岩浆水。

3 件石英碳酸盐阶段石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-0.6\% \sim 2.0\%$, 明显低于岩浆水范围 ($5.5\% \sim 9.5\%$, Sheppard, 1986), δD 介于 $-98\% \sim -95\%$, 也低于岩浆水范围 ($-80\% \sim -40\%$, Sheppard, 1986)。在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解中(图 12), 3 件样品点落在岩浆水与大气降水之间, 表明该阶段的流体来自岩浆水混合大气降水。

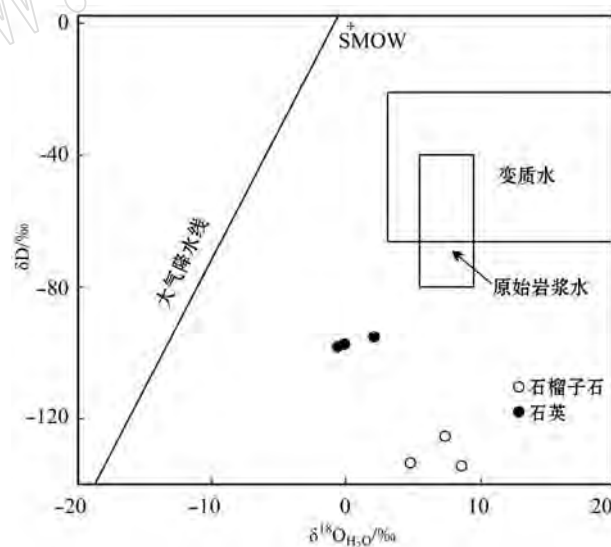


图 12 什根特铁矿 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解

(原始岩浆水范围据 Sheppard, 1986)

Fig. 12 δD versus $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ diagram of the Shigente iron deposit (data of primary magmatic water after Sheppard, 1986)

5.3 成矿机制探讨

什根特铁矿赋存于上志留-下泥盆统康布铁堡组下亚组第一岩性段黑云(磁铁)变粒岩、黑云钾长变粒岩、角闪斜长变粒岩、斜长角闪片岩中, 矿体呈层状、透镜状、脉状, 与地层产状一致, 除矿体外, 变粒岩中普遍发育浸染状分布的磁铁矿。矿石构造主

要为条带状、块状、团块状和浸染状,这些特征表明什根特铁矿主成矿作用为火山沉积作用,属海相火山岩型的一个亚类型火山沉积型。海相火山岩型铁矿的形成过程与海底火山作用晚期岩浆-热液演化有关(张招崇等,2014)。在火山口附近,发育大量与火山作用有关的断裂和裂隙,成为海水下渗的通道。岩浆在岩浆房中发生分异形成高温卤水,同时岩浆房提供大量的热可以加热下渗海水使其发生对流循环,并从火山岩围岩中淋滤出铁等成矿物质进入流体中形成富铁流体,这种富铁流体喷发到海底形成层状、似层状和透镜状铁矿物。

什根特矿区北部发育细粒英云闪长岩,受岩浆期后热液的影响,矿区发育矽卡岩,并伴有矽卡岩型铁矿化,表现为石榴子石磁铁矿矿石、绿帘石绿泥石磁铁矿矿石。矿区发育伟晶岩,部分伟晶岩中有磁铁矿化。综合这些矿化特征,认为什根特铁矿为海相火山沉积型,经历了岩浆期后热液形成的矽卡岩型矿化叠加改造。什根特主成矿作用与火山沉积作用有关,含矿地层时代可代表主成矿作用时代。项目组获得角闪斜长变粒岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 400.2 ± 1.2 Ma(杨富全未刊数据),可以代表角闪斜长变粒岩的原岩(基性火山岩)的形成时代,也限定什根特铁矿主成矿作用发生在 400 Ma,属早泥盆世成矿。与同处在麦兹盆地的 VMS 型铁列克萨依铅锌矿(400 Ma,柴凤梅等,2012)和可可塔勒铅锌矿(398 Ma, Yang *et al.*, 2017b)形成时代一致。

综合课题组和前人近年来在麦兹盆地蒙库、巴特巴克布拉克、巴利尔斯和乌吐布拉克铁矿,可可塔勒和列克萨依铅锌矿等的研究成果,认为什根特铁矿在 400 Ma 形成康布铁堡组火山沉积岩系,火山活动间歇期形成火山沉积型层状铁矿(主成矿作用)。之后矿区北部岩浆侵位形成细粒英云闪长岩,岩浆期后热液交代基性火山岩和灰岩透镜体,首先形成石榴子石等早期矽卡岩矿物,该阶段的流体为中温、低盐度和中低密度的 H_2O -NaCl 体系。随着退化蚀变作用形成绿帘石、绿泥石和磁铁矿(矽卡岩型铁矿化)。石英碳酸盐阶段主要形成石英脉、石英方解石脉叠加到早期矽卡岩阶段和退化蚀变阶段形成的矽卡岩中,该阶段的流体具有从高温演化到低温、中低盐度和中低密度的特征。区域变质作用使康布铁堡组火山沉积岩系、矿区北部细粒英云闪长岩和矿体发生变形和变质作用。

6 结论

(1) 什根特铁矿赋存于康布铁堡组变粒岩和斜长角闪片岩中,矿体呈层状、透镜状、脉状,受地层控制。发育矽卡岩化及磁铁矿。矿石构造主要为条带状、块状、团块状和浸染状。矿床形成经历了火山沉积期(主成矿期),岩浆热液期(矽卡岩型矿化)和区域变质期。

(2) 火山沉积期和岩浆热液期退化蚀变阶段的磁铁矿均具有富 Fe, 贫 Si、Ti、V、Mg、Mn 特点;磁铁矿稀土元素配分模式图和原始地幔标准化蛛网图上,均具有相似曲线变化特征,指示火山沉积期和退化蚀变阶段的铁矿具有相同的物质来源,即来自基性火山岩。

(3) 岩浆热液期早期矽卡岩阶段石榴子石中流体包裹体均一温度为 $160 \sim 403^\circ\text{C}$,集中在 $180 \sim 260^\circ\text{C}$,盐度集中在 $5\% \sim 9\%$,表明流体为中温、低盐度和中低密度的 H_2O -NaCl 体系。石英碳酸盐阶段流体包裹体均一温度 $140 \sim 536^\circ\text{C}$,主要集中在 $160 \sim 340^\circ\text{C}$,盐度集中在 $6\% \sim 16\%$,表明流体具有从高温演化到低温、中低盐度和中低密度的特征。

(4) 早期矽卡岩阶段石榴子石 δD 介于 $-134\permil \sim -125\permil$, $\delta^{18}O_{\text{SMOW}}$ 值 $5.0\permil \sim 7.8\permil$, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 $4.7\permil \sim 8.6\permil$,表明流体为岩浆水。石英碳酸盐阶段石英的 δD 介于 $-98\permil \sim -95\permil$, $\delta^{18}O_{\text{SMOW}}$ 值介于 $8.4\permil \sim 9.6\permil$, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 $-0.6\permil \sim 2.0\permil$,表明该阶段流体来自岩浆水混合大气降水。

致谢 参加野外和室内研究的还有杨富全研究员、刘锋研究员、郑佳浩博士、杨俊杰硕士等,野外工作中得到新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第四地质大队秦纪华总工等,新疆阿勒泰地区国土资源局的各位领导的大力支持和帮助,在此一并致以衷心的感谢。

References

- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O -NaCl solutions[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 683-684.
- Burruss R C. 1981. Analysis of phase equilibria in C-O-H-S fluid inclusions[A]. Hollister L S and Crawford M L. *Short Course Hand-*

- book[C]. Mineralogical Association of Canada, 6: 39~74.
- Chai Fengmei, Yang Fuquan, Liu Feng, *et al.* 2012. Geochronology and genesis of the meta-felsic volcanic rocks in the Kangbutiebao Formation from the Maizi Basin at the southern margin of the Altay, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geology, 47(1): 221~239 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guangyuan, Shao wei and Sun Daisheng. 1989. Genetic Mineralogy of Gold Deposits in Jiadong Rigion with Emphasis on the Gold Prospecting[M]. Chongqing: Chongqing Press, 1~70 (in Chinese).
- 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: 3 057~3 067.
- Coleman M L, Sheppard T J, Durham J J, *et al.* 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 the use of freezing data for estimation of salinity[J]. Econ. Geol., 74: 1 435~1 444.
- Fryer B J. 1997. Rare earth evidence in iron formation for changing Precambrian oxidation states[J]. Geochimica et Cosmochimica, 41: 361~367.
- Guo Zhenglin, Kang Jichang, Qiu Yinjiang, *et al.* 2006. Volcanic sedimentary structure evolvment and mineralization of Mengku basin at south marg in of Altai mountain, Xinjiang[J]. Mineral Resources and Geology, 20(4~5): 348~352 (in Chinese with English abstract).
- Lin Shizheng. 1982. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2(3): 166~174 (in Chinese with English abstract).
- Liu Feng, Yang Fuquan, Li Yanhe, *et al.* 2009. Trace element and rare earth element characteristics of apatite from Abagong iron deposit in Altay City, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 28(3): 251~264 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Li Yinqing, Goldfarb R, *et al.* 2003. Fluid inclusion and noble gas studies of the Dongping gold deposit, Hebei Province, China: A mantle connection for mineralization? [J]. Economic Geology, 98: 517~534.
- Mao Jingwen, Wang Yintian, Ding Tiping, *et al.* 2002. Dashiuguo 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.
- Sheppard S M F. 1986. Characterization and isotopic variations in natural waters[J]. Reviews in Mineralogy, 16: 165~183.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Taylor B E. 1976. Origin and significance of C-O-H fluids in the formation of Ca-Fe-Si skarn, Osgood Mountains, Humboldt County, Nevada[D]. Unpublished PhD Thesis, Stanford University, 306.
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, *et al.* 2007. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai mountains and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1 933~1 944 (in Chinese with English abstract).
- Wan Bo, Zhang Lianchang, Xiao Wenjiao, *et al.* 2010. Geological and geochemical characteristics and ore genesis of the Keketale VMS Pb-Zn deposit, Southern Altai Metallogenic Belt, NW China[J]. Ore Geology Reviews, 37: 114~126.
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, *et al.* 2002. Minerogentic Series and Regularity of Mineralization in the Altai Metallogenic Province, China[M]. Beijing: Atomic Press, 1~493 (in Chinese).
- Wang Jingbin, Qin Kezhang, Wu Zhiliang, *et al.* 1998. Volcanic Exhalative Sedimentary Lead-zinc Deposits in the South Margin of Altay Mountains, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~210 (in Chinese).
- Wang Kuiren. 1989. Earth and Universe Genetic Mineralogy [M]. Hefei: Anhui Educational Publishing House, 1~210 (in Chinese).
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Shulai, *et al.* 2003. Geology of the Mengku iron deposit, Xinjiang, China—a metamorphosed VMS? [A]. Mao Jingwen, Goldfarb R J, Seltmann R, *et al.* Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan[C]. Proceedings volume of the International Symposium of the IGCP-473 project in Urumqi and guidebook of the field excursion in Xinjiang, China: August 9-21, 2003. London: Centre for Russian and Central Asian Mineral Studies, Natural History Museum, 181~200.
- Xu Guofeng and Shao Jianlian. 1979. The typomorphic characteristics of magnetite and its significance[J]. Geology and Prospecting, 8(3): 30~37 (in Chinese with English abstract).
- Xu Lingang, Mao Jingwen, Yang Fuquan, *et al.* 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.
- Yan Bingquan, Wu Kelong, Wang Wenteng, *et al.* 1993. Study on the genetic mineralogy of magnetites from the Zhangzhou Complex Massif in Fujian Province[J]. Geology of Fujian, 12(1): 1~16 (in Chinese).

- Yang Chengdong, Yang Fuquan, Geng Xinxia, *et al.* 2017a. Geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes of Middle Devonian igneous rocks of the Sarsuk polymetallic Au deposit: implications for understanding the tectonic evolution of the south Altay Orogenic Belt, Northwest China[J]. *International Geology Review*, 59(4): 448~469.
- Yang Chengdong, Yang Fuquan, Chai Fengmei, *et al.* 2017b. Timing of the formation of the Keketale Pb-Zn deposit, Xinjiang, Northwest China: Implications for the metallogeny of the South Altay Orogenic Belt[J]. *Geological Journal*, doi: 10.1002/gj.2933.
- Yang Fuquan, Guo Xuji, Huang Chengke, *et al.* 2012. Metallogenesis of the Tuomoerte Fe(Mn) deposit in Altay, Xinjiang[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 31(5): 906~914(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Liu Feng, Chai Fengmei, *et al.* 2011. Iron deposits in Altay, Xinjiang: Geological characteristics, time-space distribution and metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 30(4): 575~598(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Liu Feng and Li Qian. 2015. Geological characteristics and metallogenesis of the Saershuoke polymetallic deposit in Altay, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2366~2382(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Liu Feng, Li Fengming, *et al.* 2013. LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of zircons from volcanic rocks and subvolcanic intrusions in Ashele Cu-Zn ore district, Xinjiang, and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 32(5): 869~883(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Liu Feng, *et al.* 2013. A review of the geological characteristics and mineralization history of iron deposits in the Altay orogenic belt of the Xinjiang, Northwest China[J]. *Ore Geol. Rev.*, 54: 1~16.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Liu Feng, *et al.* 2010. Geochronology and geochemistry of the granites from the Mengku iron deposit, Altay Mountains, northwest China: implications for its tectonic setting and metallogenesis[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(6): 803~818.
- Yang Fuquan, Wu Yufeng, Yang Junjie, *et al.* 2016. Mineral deposit model for VMS type polymetallic copper deposits in the Ashele ore dense district of Altay, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4): 701~715(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Yang Fuquan, Chai Fengmei, *et al.* 2008. Ore forming fluids and metallogenesis of Mengku iron deposit in Altay, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 27(6): 659~680(in Chinese with English abstract).
- Yang Junjie, Yang Fuquan, Chai Fengmei, *et al.* 2016. Skarn mineral characteristics of the Batebakebulake iron deposit in Altay, Xinjiang, and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 35(4): 758~774(in Chinese with English abstract).
- Zang Mei, Dong Lianhui, Chai Fengmei, *et al.* 2013. Research on REE geochemistry of the Baliersi iron deposit in Altay, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(2): 203~212(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianzhong, Feng Binghuan, Jin Haojia, *et al.* 1987. The genetic relationship between marine volcanic rocks and iron deposit at Abagong-mengku area, Altay district, Xinjiang and ore-forming geological features[J]. *Bulletin of Xi'an Institute Geology Mineral Resources*, CAGS, 20: 89~180(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Li Houmin, *et al.* 2014. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1189~1204(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenfu. 2003. Analysis of characteristics of typical Fe deposit in Altai region, Xinjiang and their genesis and potential[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18(Supp.): 80~83(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhixin, Yang Fuquan, Chai Fengmei, *et al.* 2011. Study on chronology and genesis of granite in the Wutubulake iron district, southern margin of Altay[J]. *Geological Review*, 57(3): 350~365(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柴凤梅, 杨富全, 刘 锋, 等. 2012. 阿尔泰山南缘麦兹盆地康布铁堡组变质酸性火山岩年龄及岩石成因[J]. *地质科学*, 47(1): 221~239.
- 陈光远, 邵 伟, 孙岱生. 1989. 胶东成因矿物学与找矿[J]. 重庆: 重庆出版社, 1~70.
- 郭正林, 康吉昌, 仇银江, 等. 2006. 新疆阿尔泰山南缘蒙库盆地火山沉积构造演化与成矿[J]. *矿产地质*, 20(4~5): 348~352.
- 林师整. 1982. 磁铁矿物化学、成因及演化的探讨[J]. *矿物学报*, 2(3): 166~174.
- 刘 锋, 杨富全, 李延河, 等. 2009. 新疆阿勒泰市阿巴宫铁矿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): 251~246.
- 童 英, 王 涛, 洪大卫, 等. 2007. 中国阿尔泰山北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. *岩石学报*, 23(8): 1933~1944.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 2002. 阿尔泰山成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社, 1~493.
- 王京彬, 秦克章, 吴志亮, 等. 1998. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型

- 铅锌矿床[M]. 北京:地质出版社, 1~210.
- 王奎仁. 1989. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥:安徽教育出版社, 108~129.
- 徐国风, 邵洁莲. 1979. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探, 8(3): 30~37.
- 严炳铨, 吴克隆, 王文腾. 1993. 福建漳州复式岩体磁铁矿的成因矿物学特征[J]. 福建地质, 12(1): 1~16.
- 杨富全, 郭旭吉, 黄承科, 等. 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.
- 杨富全, 李凤鸣, 秦纪华, 等. 2013. 新疆阿舍勒铜锌矿区(潜)火山岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 32(5): 869~883.
- 杨富全, 刘 锋, 柴凤梅, 等. 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, 刘 锋, 李 强. 2015. 新疆阿尔泰萨尔朔克多金属矿地质特征及成矿作用[J]. 岩石学报, 31(8): 2 366~2 382.
- 杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 等. 2008. 新疆阿尔泰蒙库铁矿床成矿流体及成矿作用[J]. 矿床地质, 27(6): 659~680.
- 杨富全, 吴玉峰, 杨俊杰, 等. 2016. 新疆阿尔泰阿舍勒矿集区铜多金属矿床模型[J]. 大地构造与成矿学, 40(4): 701~715.
- 杨俊杰, 杨富全, 柴凤梅, 等. 2016. 新疆阿尔泰巴特巴克布拉克铁矿床矽卡岩矿物特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 35(4): 758~774.
- 藏 梅, 董连慧, 柴凤梅, 等. 2013. 新疆阿尔泰南缘巴利尔斯铁矿床稀土元素地球化学研究[J]. 地球学报, 34(2): 203~212.
- 张建中, 冯秉寰, 金浩甲, 等. 1987. 新疆阿尔泰阿巴宫-蒙库海相火山岩与铁矿的成生关系及成矿地质特征[J]. 中国地质科学院西安地质研究所所刊, 20: 89~180.
- 张招崇, 侯 通, 李厚民, 等. 2014. 岩浆-热液系统中铁的富集机制探讨[J]. 岩石学报, 30(5): 1 189~1 204.
- 张振福. 2003. 新疆阿尔泰一带典型铁矿床特征、成因及找矿前景分析[J]. 地质找矿论丛, 18(增刊): 80~83.
- 张志欣, 杨富全, 柴凤梅, 等. 2011. 阿尔泰南缘乌吐布拉克铁矿区花岗质岩石年代学及成因[J]. 地质论评, 57(3): 350~365.

致 谢

2017 年度,许多专家们在百忙之中抽出时间,接受编辑部邀请为本刊评审了稿件,他们对文章的学术质量进行了把关,付出了辛勤的劳动,也为提高刊物质量做出了贡献。在此,编辑部特代表主编及主办单位,向这些专家表示衷心的感谢!这些专家有(以姓氏拼音为序):

安 芳	柏道远	包志伟	曾令森	柴凤梅	陈 超	陈天虎	陈卫锋
陈振宇	崔学民	戴 慧	党 志	邓 新	第五春荣	董海良	杜远生
丰成友	付山岭	高 翔	郭旭升	郭 颖	韩宝福	郝艳玲	何丽娟
贺振宇	黄思静	江思宏	姜尧发	姜耀辉	赖绍聪	雷新荣	李建康
李金娟	李小伟	李 艳	李益龙	李永军	廖世勇	刘超辉	刘 娟
刘明学	刘起展	刘 琰	刘 羽	卢保奇	鲁安怀	陆现彩	马昌前
马鸿文	孟繁聪	裴先治	彭三国	彭头平	钱 青	丘志力	阮青锋
施光海	史仁灯	宋玉财	苏本勋	孙德有	孙庆峰	孙 卫	唐功建
唐菊兴	田作林	童 英	汪 洋	王洪作	王金勇	王京刚	王凯兴
王立本	王立强	王晓霞	王彦斌	王长秋	巫 翔	吴柏林	吴朝东
吴春明	吴宏海	夏群科	徐九华	徐夕生	徐学义	许荣科	许文良
薛传东	闫 峻	闫平科	杨永强	杨志军	杨主明	叶会寿	叶 霖
游国庆	于炳松	于 方	袁 静	袁顺达	张建新	张铭杰	张 乾
张招崇	赵省民	赵一鸣	赵 昭	郑远川	钟大康	周维芝	周午纵
周跃飞	朱建喜	朱 江	朱筱敏	朱永峰	宗克清		