

文章编号: 0258-7106 (2012) 05-1051-16

新疆西天山智博铁矿床蚀变矿物学、矿物化学特征 及矿床成因探讨*

蒋宗胜¹, 张作衡¹, 王志华², 李凤鸣^{2,3}, 田敬全⁴

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 中国地质大学
地球科学与资源学院, 北京 100083; 3 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 新疆 乌鲁木齐 830000;
4 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队, 新疆 库尔勒 841000)

摘 要 智博铁矿床是西天山东部阿吾拉勒铁成矿带新发现的大型磁铁矿矿床之一。赋矿围岩为下石炭统大哈拉军山组火山岩及火山碎屑岩。围岩蚀变广泛发育, 识别出3个阶段: 第一阶段以辉石+钠长石+磁铁矿为主; 第二阶段以角闪石+钾长石+绿帘石+磁铁矿+黄铁矿为主; 第三阶段以绿帘石+绿泥石+方解石+石英+黄铁矿+赤铁矿+黄铜矿为主。电子探针分析表明, 智博铁矿与其他岩浆-热液成因铁床具有类似的蚀变矿物化学成分。辉石以透辉石为主($Di=62.97\% \sim 83.56\%$), 含少量钙铁辉石($Hd=16.44\% \sim 36.45\%$); 火山岩中斜长石($Ab_{47.57-57.82} An_{41.5-51.87} Or_{0.56-0.68}$)蚀变形成钠长石($Ab_{77.89-99.33} An_{0.46-2.48} Or_{0.21-20.3}$); 与热液作用有关的钾长石叠加改造早期蚀变矿物; 角闪石主要为阳起石; 晚期发育富铁绿帘石 [$Fe/(Fe+Al)=0.2 \sim 0.36$] 以及绿泥石蚀变矿物。与火山岩中的磁铁矿 [$w(TiO_2) 3.08\%$] 相比, 矿体中磁铁矿具有低 $w(TiO_2) (0.23\%)$ 的特点, 部分早期浸染状磁铁矿与火山岩中的磁铁矿 $w(V_2O_5)$ 相当, 暗示该矿化阶段的铁质部分来源于围岩。矿物学及矿物化学表明, 热液交代作用对成矿具有重要的贡献。同时, 智博铁矿具有一些暗示铁矿浆成因的结构特征, 如块状磁铁矿与围岩呈截然接触, 磁铁矿胶结围岩角砾, 磁铁矿条带呈流动状分布以及板条状磁铁矿等。结合铁矿带区域地质特征, 认为智博铁矿可能主要由富铁岩浆流体形成, 在形成大量块状富铁矿体的同时, 伴随有广泛的围岩蚀变。矿区内大量的磁铁矿矿化与晚石炭世大陆岛弧岩浆活动有密切的成因联系。

关键词 地质学; 矿物化学; 围岩蚀变; 富铁岩浆流体; 智博铁矿; 阿吾拉勒铁成矿带; 西天山

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Alteration mineralogy, mineral chemistry and genesis of Zhibo iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang

JIANG ZongSheng¹, ZHANG ZuoHeng¹, WANG ZhiHua², LI FengMing^{2,3} and TIAN JingQuan⁴

(1 MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 4 No. 3 Geological Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract

The Zhibo iron deposit is one of the recently-discovered large magnetite deposits in the Awulale iron metallogenic belt, which is located at the eastern corner of western Tianshan Mountains. The ore bodies are hosted

* 本文为国家重点基础研究发展计划(2012CB416803)、国家科技支撑计划(2011BAB06B02-05)和地质矿产调查评价项目(12120111085060)联合资助的成果

第一作者简介 蒋宗胜, 男, 1986年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: jzongsheng@126.com

收稿日期: 2012-06-20; 改回日期: 2012-08-24; 秦思婷编辑。

mainly by volcanic and volcanoclastic rocks of the Lower Carboniferous Dahalajunshan Formation. The wall rocks of the Zhibo iron deposit have been strongly altered. Three stages of alteration assemblages and associated mineralization have been recognized: Stage I, dominantly composed of pyroxene+albite+magnetite; Stage II, characterized by amphibole+K-feldspars+epidote+magnetite+pyrite; and Stage III dominated by epidote+chlorite+calcite+quartz+pyrite+hematite±chalcopyrite. Electron microprobe analyses indicate that the Zhibo deposit have compositional features of mineral assemblages similar to many other magmatic-hydrothermal iron oxide deposits. Pyroxene consists mainly of diopside ($Di=62.97\% \sim 83.56\%$), with minor hedenbergite ($Hd=16.44\% \sim 36.45\%$). Igneous plagioclase ($Ab_{47-57-57.82} An_{41-5-51.87} Or_{0.56-0.68}$) has been altered into albite ($Ab_{77.89-99.33} An_{0.46-2.48} Or_{0.21-20.3}$). K-feldspar related to late hydrothermal alteration is superimposed upon the pre-existing associations. Amphiboles are entirely of actinolite composition. Abundant Fe-epidote [$Fe/(Fe+Al)=0.22 \sim 0.36$] and minor chlorite have pervasively replaced early mineral assemblages. In contrast with high titanium ($3.08\% TiO_2$) magnetite in volcanic rocks, most magnetite from the ore bodies has lower $w(TiO_2)$ (0.23%). A small amount of disseminated magnetite has a $w(V_2O_5)$ similar to the magnetite from volcanic rocks, suggesting minor iron movement from the wall rock during the early metasomatism. Mineralogy and mineral chemistry of the altered minerals indicate that metasomatic replacement played an important role in mineralization. In addition, the Zhibo iron deposit also has some textural features suggestive of an Fe-rich melt origin for the deposit, such as the abrupt contact between the wall-rock and massive magnetite ore, the existence of significant amounts of breccia, the arrangement of magnetite that defines a flow texture, and platy magnetite. Combined with regional geology of the Awulake iron metallogenic belt, it might be suggested that Fe-rich magmatic liquids constituted the most plausible origin for the mineralization, producing massive magnetite ore bodies associated with extensive wall rock alteration. There existed a genetic relationship between late Carboniferous continental arc magmatism and massive magnetite mineralization.

Key words: geology, mineral chemistry, wall rock alteration, Fe-rich magmatic liquids, Zhibo iron deposit, Awulake iron metallogenic belt, western Tianshan Mountains

新疆阿吾拉勒铁成矿带位于西天山东段,东西长 250 km,南北宽 10~20 km。近年来,随着查岗诺尔、智博、备战、敦德、式可布台、松湖、尼新塔格-阿克沙克等大中型铁矿床(图 1)的发现与评价,该成矿带已成为新疆铁矿勘查与研究的热点地区,被国土资源部评选为十大新资源基地^①。通过近年来的勘查评价,上述多个矿床深部见厚大矿层,矿床规模不断扩大,累计探求铁矿石资源量近 10 亿吨,新增 2 亿吨以上(董连慧等, 2012)。这些铁矿床多产于石炭纪火山岩内,与中基性火山岩的喷发以及后期热液活动有一定的成因联系,矿床类型为火山岩型铁矿床(董连慧等, 2011)。

智博(又称诺尔湖)铁矿位于新疆巴州和静县境内,是新疆地质矿产勘查开发局第三地质大队于 2006 年发现的大型磁铁矿矿床,现由新疆巴州凯宏

矿业开发。截至 2010 年,已控制铁矿石资源量(332+333)约 2.35 亿吨,平均全铁品位在 25%~61%之间,其中,富磁铁矿($TFe \geq 50\%$)矿石 1.1 亿吨,在深部及外围仍显示出良好的找矿远景^②。目前,关于智博铁矿的研究十分薄弱,仅有部分学者对其开展研究工作。田敬全等(2009)认为,矿床主要受石炭纪大哈拉军山组一套火山岩控制,具火山热液型矿床特征。冯金星等(2010)认为,智博铁矿属于以安山质岩浆为母岩浆的岩浆矿床(主要)和热液矿床(次要)的复合型矿床。Zhang 等(2012)对矿区内出露的花岗岩岩体和岩脉进行了地球化学与同位素定年研究,认为其具有后碰撞 A 型花岗岩地球化学特征,形成时代为 304.1 Ma 和 294.5 Ma。笔者等对矿区内火山岩进行锆石 U-Pb 定年获得约 300.3 Ma 的年龄(蒋宗胜等, 2012),地球化学研究表明,矿区

① 中国地质调查局. 2010. 国土资源大调查矿产资源评价成果. 内部资料.

② 新疆地质矿产勘查开发局第三地质大队. 2011. 新疆和静县诺尔湖铁矿详查地质报告. 内部资料.

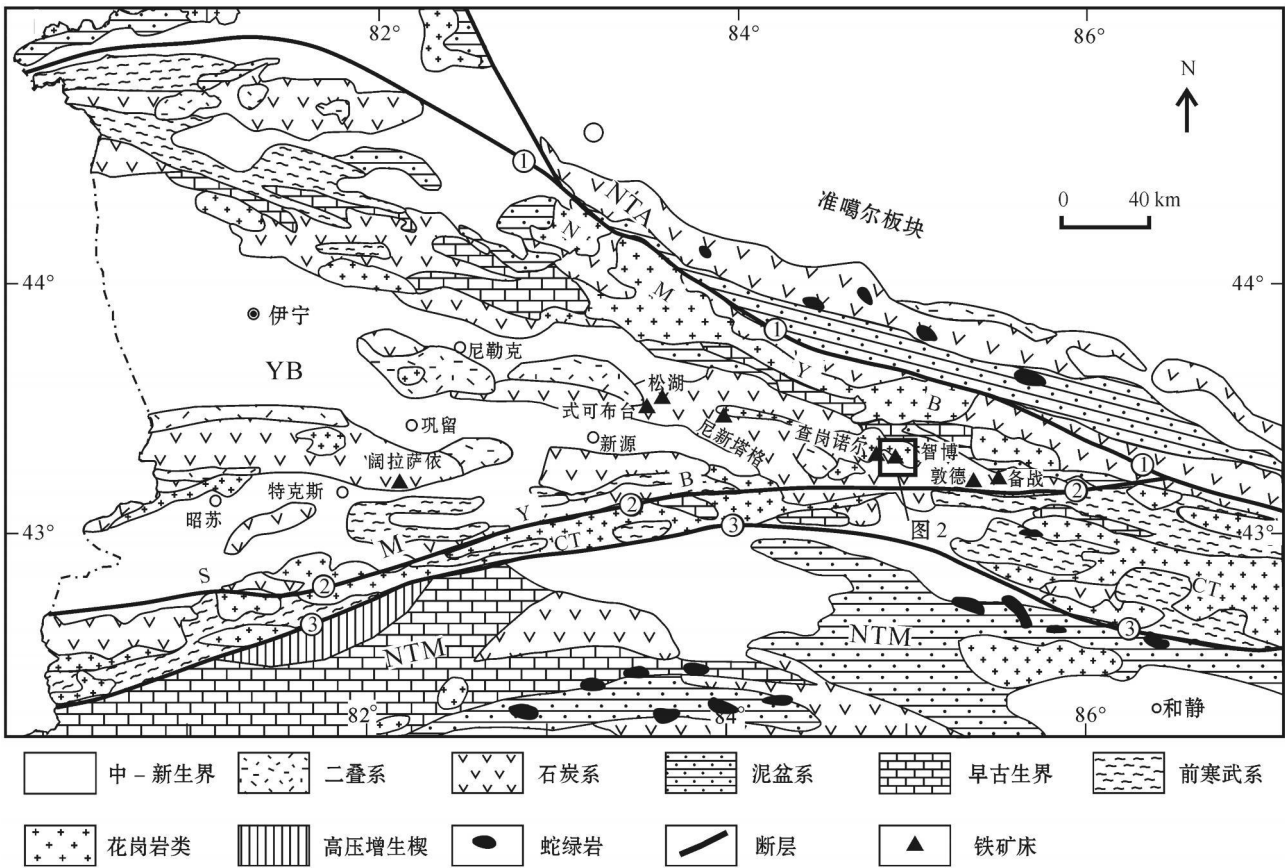


图 1 西天山区域地质简图(据高俊等, 2009; 李凤鸣等, 2011 修改)

YB—伊犁地块; NTA—北天山弧增生体; NMYB—伊犁地块北缘活动陆缘; SMYB—伊犁地块南缘活动陆缘; CT—中天山复合弧地体; NTM—塔里木北部陆缘; ①—天山北缘断裂带; ②—尼古拉耶夫线-那拉提北坡断裂; ③—中天山南断裂

Fig. 1 Simplified geological map of western Tianshan Mountains (modified after Gao et al., 2009; Li et al., 2011)
YB—Yili Block; NTA—North Tianshan Accretionary Wedge; NMYB—Northern Active Continental Margin of Yili Block; SMYB—Southern Active Continental Margin of Yili Block; CT—Central Tianshan Arc Terrane; NTM—Northern margin of Tarim Block; ①—North Tianshan Suture; ②—Nikolaev Line-North Nalati Suture; ③—South Central Tianshan Suture

火山岩属于俯冲过程末期阶段大陆岛弧岩浆作用的产物, 初步探讨了成矿环境。

智博铁矿发育广泛的蚀变作用, 主要为一套钠(钾)-钙质蚀变矿物。对蚀变矿物组合开展岩相学与矿物化学的研究有助于揭示蚀变作用的形成机制以及矿床成因。本文选取智博铁矿内与成矿关系密切的蚀变岩石进行详细的矿相学、岩相学观察, 对主要蚀变矿物及矿石矿物进行化学分析, 初步探讨矿床的围岩蚀变特征以及矿床成因。

1 区域地质背景

西天山造山带属于中亚增生型造山带的一部分, 在晚古生代经历了显著的侧向和垂向增生

(Windley et al., 1990; Xiao et al., 2009)。综合近年来的研究成果, 高俊等(2009)将西天山区域构造单元自北向南以天山北缘断裂带、那拉提北坡断裂带和中天山南缘断裂带为界, 划分为北天山弧增生体、伊犁地块、中天山复合弧地体和塔里木北部陆缘(图 1)。

伊犁地块位于西天山准噶尔板块与塔里木板块之间, 自西向东呈楔形尖灭, 其南、北两侧以断续出露的蛇绿岩以及高压变质岩石的晚古生代缝合带为界(肖序常等, 1992; 何国琦等, 1994; Gao et al., 1998)。元古宙古老基底由前寒武纪地层组成(陈义兵等, 1999; 李继磊等, 2009), 其上覆盖有大量与晚古生代造山活动有关的火山岩地层。其中, 以石炭纪大哈拉军山组分布最为广泛, 也是区内最重要的

赋矿地层, 主要由一套中-基性的火山熔岩-火山碎屑岩组成(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。大哈拉军山组火山岩具有复杂的地球化学组成, 形成于裂谷(车自成等, 1996; 夏林圻等, 2004)或岛弧(朱永峰等, 2005; 钱青等, 2006; Wang et al., 2007; 龙灵利等, 2008)的构造环境中。其形成时代跨度较大, 年龄从西到东逐渐变新(由 $> 363 \text{ Ma}$ 到 313 Ma ; 朱永峰等, 2005; 翟伟等, 2006; 安芳等, 2008; Zhu et al., 2009)。西天山地区古生代侵入岩广泛分布, 早石炭世及其以前的古生代侵入岩呈带状分布, 主要为一套与洋盆俯冲有关的钙碱性侵入岩, 晚石炭世及其后的晚古生代侵入岩呈面状分布, 主要为一套与同碰撞有关的富铝花岗岩和后造山的富钾花岗岩(朱志新等, 2011)。

西天山在晚古生代大陆地壳增生和改造过程中, 区域火山活动强烈, 强烈的构造运动和岩浆活动伴随着多期次、多类型的壳幔相互作用, 造成了铜铁金的富集, 形成了许多重要的成矿区带, 如阿希-京希-伊尔曼德金-铜矿集区、达巴特-莱历斯高尔斑岩铜钼矿集区(朱永峰等, 2007)以及阿吾拉勒铁成矿带。阿吾拉勒铁成矿带位于西天山东段, 产于伊犁地块东北缘活动带中, 含矿地层主要为下石炭统大哈拉军山组及上石炭统伊什基里克组中-基性火

山岩-火山碎屑岩。侵入岩以正长花岗岩、花岗闪长岩以及石英闪长岩为主。区内已发现矿床(点)12个, 火山岩型铁矿床赋存于大哈拉军山组中, 火山热液型铁矿床赋存于二叠纪岩浆岩中, 成矿作用显示出与下石炭系大哈拉军山组火山岩及二叠纪岩浆岩侵入、喷发活动有关(田敬全等, 2009)。

2 矿床地质

2.1 矿区地质

智博铁矿位于新疆自治区和静县西北约 200 km 的博罗科努山系主脊线上, 构造位置处于伊犁地块东北缘的活动带(图 1), NW 向区域性大断裂南侧, 与查岗诺尔铁矿直线距离约 10 km。矿区内出露地层主要为大哈拉军山组火山岩(图 2a), 具有大陆岛弧火山岩地球化学特征, 形成年龄为 300.3 Ma (蒋宗胜等, 2012)。智博矿区矿体赋存于大哈拉军山组第二段, 岩性主要为玄武岩、粗面安山岩和玄武质粗面安山岩等。矿区构造整体较为简单, 主要为一单斜构造。西段矿区发育一定程度的成矿后断裂, 对矿体的延伸和侧伏形态有一定的破坏作用; 中、东矿段深部仅有小断层活动, 对矿体整体形态分布影响较小。矿区内侵入岩以花岗闪长岩和石英闪

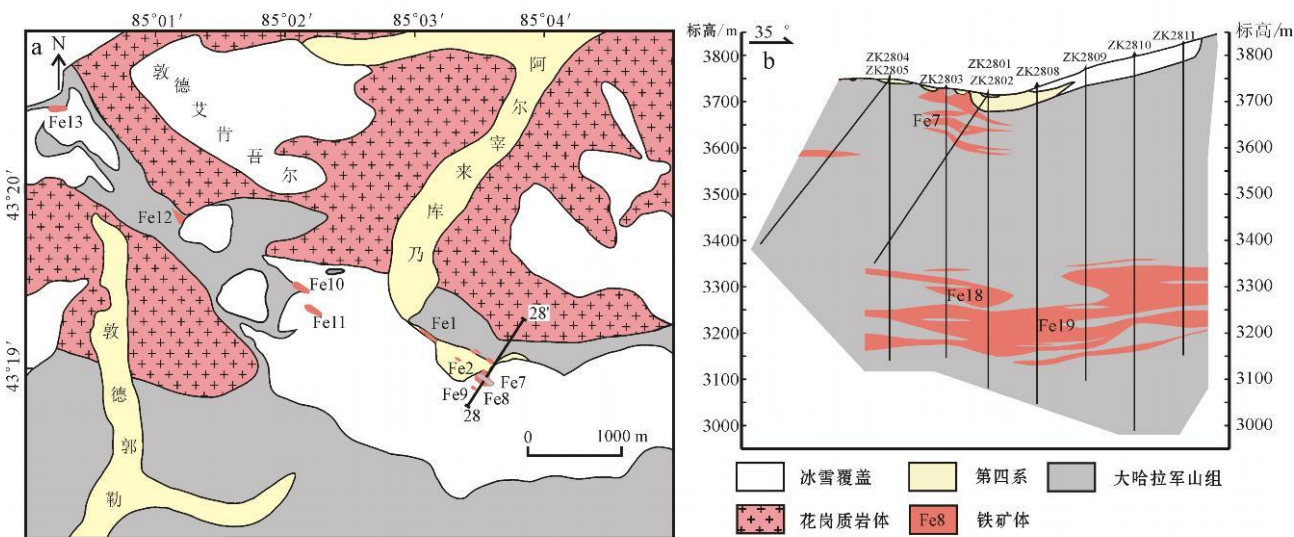


图 2 智博铁矿矿区地质图(a)和 28 勘探线剖面图(b)

Fig. 2 Geological map of the Zhibo iron deposit (a) and geological section of No. 28 exploration line (b)

长岩为主, 主要分布在矿区西南部, 与火山岩地层以及矿体为侵入接触关系。花岗岩岩体具有A型花岗岩特征, 形成年龄为304.1 Ma和294.5 Ma(Zhang et al., 2012)。

2.2 矿体及矿石特征

智博铁矿已控制矿化带东西长约5.5 km, 宽约1.5 km, 分为东、中、西和Fe13号矿体4个含矿段, 共圈定68个矿体。其中, 东矿段圈定出11个铁矿物, 资源量占全区的97%以上, 包括Fe15-1、Fe15-2、Fe18、Fe19、Fe20等几个主矿体^①。矿区内铁矿物大部分被第四纪沉积物及冰水堆积物覆盖, 仅有少部分出露于地表, 出露形态为似层状, 中矿段已进行露天开采(图3a)。矿体深部厚大, 形态多为层状、似层状、透镜状(图2b), 总体走向NW-SE方向, 产状较缓。矿石矿物以大量磁铁矿为主, 含少量浸染状黄铁矿, 局部可见细脉赤铁矿及零星黄铜矿。脉石矿物主要为绿帘石、钾长石、透辉石、钠长石、阳起石、绿泥石等蚀变矿物。矿石构造以块状构造和浸染状构造为主, 角砾状构造次之, 局部为条带状构造、脉状-网脉状构造; 矿石结构包括半自形-他形粒状结构、交代残余结构、碎裂结构以及板条状结构。复杂多样的矿石结构构造显示出多期次成矿以及叠加改造成矿的特点。

2.3 围岩蚀变

智博铁矿发育广泛的围岩蚀变, 以透辉石化、钠长石化、钾长石化、阳起石化、绿帘石化为主, 含少量绿泥石化和碳酸盐化。围岩蚀变具多阶段的特点, 靠近矿体, 围岩蚀变强烈, 矿体顶、底板几乎全为绿帘石化-钾长石化-绿泥石化玄武岩、安山岩。根据野外观察和岩相学观察, 按照蚀变矿物之间的共生关系, 本文将蚀变作用划分为3个阶段: 第一阶段蚀变矿物以透辉石+钠长石为主, 伴随有少量磁铁矿化(图3e~g, l; 图4a, b), 磁铁矿呈他形粒状充填于透辉石±钠长石矿物颗粒之间, 形成浸染状矿石; 第二阶段蚀变矿物组合主要为钾长石+阳起石+绿帘石(图3e, g; 图4f), 是矿区内分布最为广泛的蚀变矿物组合(图3b, c), 伴生有大量磁铁矿以及少量浸染状黄铁矿, 是磁铁矿主要形成阶段, 该阶段常见有以榍石为主的副矿物(图4e, f); 第三阶段蚀变矿物组合以绿帘石+绿泥石+方解石+石英为主(图4e), 伴生有大量粗粒脉状黄铁矿和细脉状赤铁矿(图3k; 图

4n), 局部形成少量黄铜矿化(图3f; 图4o), 是硫化物的主要形成阶段。详细的围岩蚀变与成矿阶段划分参见王志华等(2012)。

3 蚀变矿物学特征及电子探针分析

在划分蚀变阶段的基础上, 挑选不同蚀变特征的样品(取样位置见表1), 对主要蚀变矿物进行矿物化学分析, 测试在中国地质科学院矿产资源研究所使用JEOL JXA-8230型电子探针完成, 工作条件为: 加速电压20 kV, 电流20 nA, 束斑直径5 μm 。主要蚀变矿物及矿石矿物的矿物学和矿物化学特征如下。

3.1 辉石

辉石是智博铁矿早期阶段的蚀变矿物, 多与钠长石和磁铁矿密切共生(图4a, b), 主要呈自形-半自形柱状、粒状出现, 单偏光下无色, 正高突起, 正交偏光下, 最高干涉色二级蓝绿, 常见有后期阳起石、绿帘石、绿泥石等矿物的叠加改造。电子探针分析(表2)表明, 智博铁矿中辉石属钙质辉石的透辉石-钙铁辉石系列(图5; Morimoto et al., 1988), 以透辉石为主($\text{Di}=62.97\% \sim 83.56\%$), 含少量钙铁辉石($\text{Hd}=16.44\% \sim 36.45\%$), 而锰钙辉石成分含量极低, 除1个辉石成分点(zb492-3.3)为 $\text{Jo}=3.08\%$ 、 $\text{Mn}/\text{Fe}=0.15$ 外, 其余测试点含量均小于0.6%, $\text{Mn}/\text{Fe} \leq 0.02$, 所有辉石的 $\text{Mg}/\text{Fe}=1.85 \sim 5.16$ 。与基质辉石($\text{Jo}=16.44\% \sim 27.69\%$)相比, 包裹于黄铁矿中的辉石更富钙铁辉石端员($\text{Jo}=31.43\% \sim 36.45\%$)。

3.2 长石

智博铁矿蚀变围岩中的长石主要包括早期阶段的钠长石和稍晚期的钾长石。钠长石与早期磁铁矿成矿关系密切, 与辉石和磁铁矿一起组成早期阶段的蚀变矿物组合。钠长石主要由火山岩中的斜长石蚀变而成, 多见于蚀变安山岩角砾中(图3f, g); 在浸染状矿体中, 多以斑晶的形式出现, 组成似斑状结构(图4a), 局部可见热液钠长石与绿帘石脉共生(图4g, j)。电子探针分析(表3)表明, 在含矿流体作用于围岩时, 火山岩中的斜长石($\text{Ab}_{47.57-57.82} \text{An}_{41.5-51.87} \text{Or}_{0.56-0.68}$)发生明显钠长石化($\text{Ab}_{77.89-99.33} \text{An}_{0.46-2.48} \text{Or}_{0.21-20.3}$)。

① 新疆地质矿产勘查开发局第三地质大队, 2011. 新疆和静县诺尔湖铁矿详查地质报告, 内部资料。

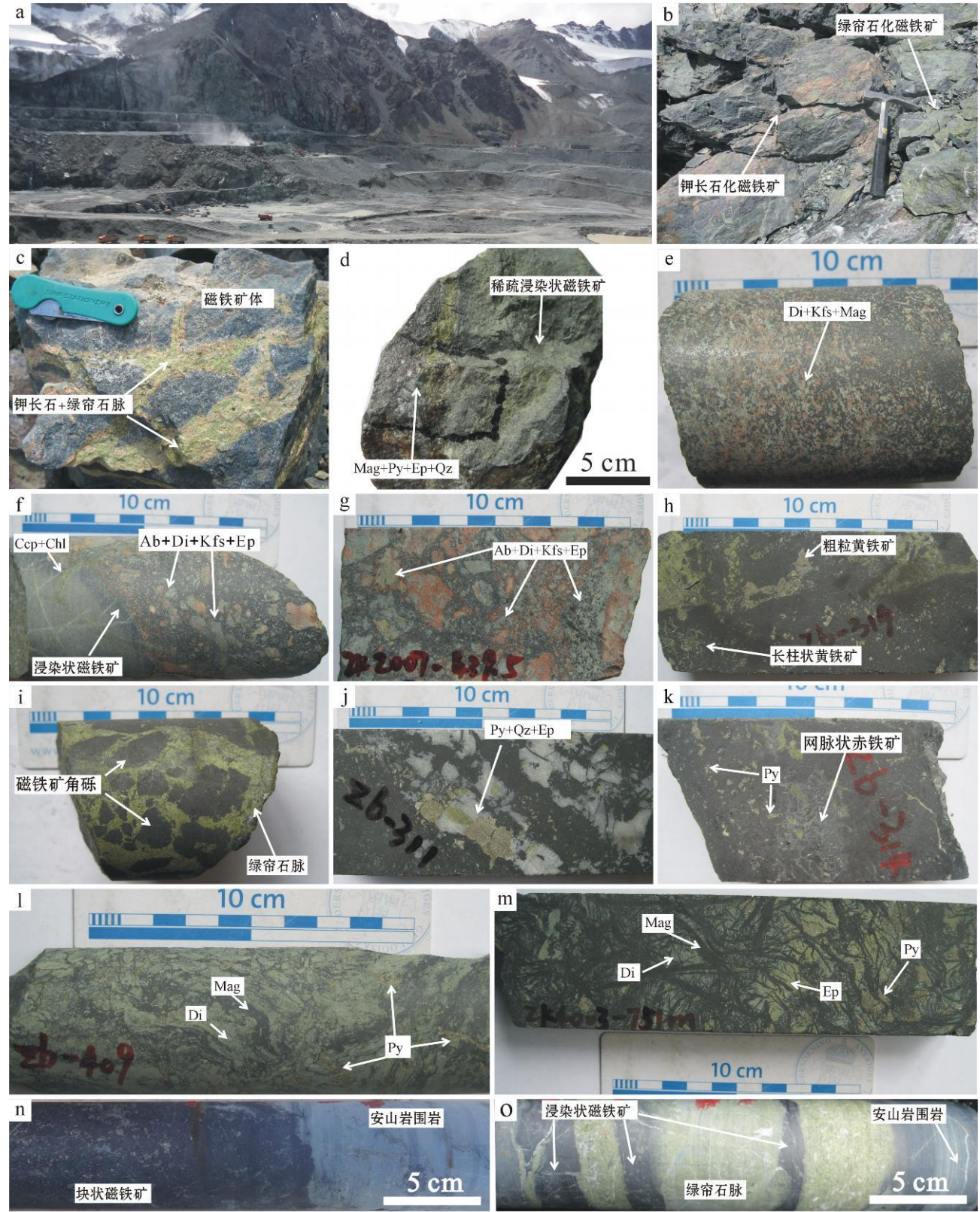


图 3 西天山智博铁矿野外及手标本照片

a. 中矿段采坑; b. 钾长石化磁铁矿和绿帘石化磁铁矿; c. 钾长石+绿帘石脉贯入浸染状磁铁矿; d. 晚期磁铁矿+黄铁矿+绿帘石+石英脉侵入浸染状磁铁矿, 显示两期矿化; e. 浸染状磁铁矿分布于透辉石+钾长石颗粒间; f, g. 围岩角砾被磁铁矿胶结, 发育钠长石化、透辉石化、?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

绿帘石化、钾长石化蚀变；h. 早期柱状黄铁矿和晚期粗粒黄铁矿；i. 磁铁角砾被绿帘石脉胶结；j. 块状磁铁矿中的晚期黄铁矿+石英+绿帘石；k. 块状磁铁矿中的后期网脉状赤铁矿+黄铁矿；l. 磁铁矿与透辉石呈流动条带状分布，被后期黄铁矿切穿；m. 树枝状磁铁矿，晶粒间充填有透辉石+绿帘石+黄铁矿；n. 块状磁铁矿与安山质围岩直接接触，无明显交代蚀变；o. 绿帘石脉与安山岩接触带的磁铁矿化
Di—透辉石；Ab—钠长石；Kfs—钾长石；Ep—绿帘石；Chl—绿泥石；Qz—石英；Mag—磁铁矿；Py—黄铁矿；Ccp—黄铜矿

Fig. 3 Outcrop and hand specimen photographs of the Zhibo iron deposit, western Tianshan Mountains
a. Open pit of the middle ore block; b. Iron ore with epidotization and K-feldspathization; c. K-feldspar+epidote veins crosscutting disseminated magnetite; d. Late magnetite veins associated with epidote, pyrite and quartz crosscutting disseminated magnetite, showing two mineralization stages; e. Disseminated magnetite filling in spaces between diopside and K-feldspar; f, g. Fragmented, altered andesite host rocks cemented by magnetite; fragments strongly replaced by albite+diopside+K-feldspar+epidote; h. Early long columnar pyrite and late coarse-grained pyrite; i. Angular fragments of magnetite cemented by epidote; j. Late pyrite+quartz+epidote in massive magnetite; k. Hematite stockworks in massive magnetite, associated with pyrite and epidote; l. The arrangement of magnetite and diopside defining a flow texture, cut by late pyrite; m. Dendritic magnetite with granules of pyrite, diopside and epidote, filling in interstices between magnetite crystals; n. Massive magnetite ore in contact with andesitic wall rock, with no apparent metasomatic alteration; o. Magnetite mineralization along the contact zone between epidote veins and andesite
Di—Diopside; Ab—Albite; Kfs—K-feldspar; Ep—Epidote; Chl—Chlorite; Qz—Quartz; Mag—Magnetite; Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite

表 1 智博矿区岩芯样品取样钻孔编号及位置

Table 1 Serial number of drill holes and positions of core samples from the Zhibo iron deposit, western Tianshan Mountains														
样品	钻孔编号	深度/m	样品	钻孔编号	深度/m	样品	钻孔编号	深度/m	样品	钻孔编号	深度/m	样品	钻孔编号	深度/m
zb255	ZK3205	502	zb319	ZK4003	703.5	zb406	ZK3207	442	zb275	ZK4003	12.6	zb336	ZK4003	756.4
zb276	ZK4003	30.8	zb343	ZK1305	50	zb409	ZK3207	411.4	zb308	ZK4003	628	zb348	ZK2004	508.9
zb300	ZK4003	573.7	zb345	ZK2004	504.3	zb420	ZK2408	429.6	zb311	ZK4003	681	zb382	ZK0806	430
zb313	ZK4003	687.2	zb385	ZK5502	172.9	zb432	ZK4002	219.4	zb439	ZK2007	88.5	zb491	Zk2812	628.8
						zb492	Zk2812	551.8						

表 2 智博铁矿代表性辉石电子探针分析数据

Table 2 Representative electron microprobe analyses of clinopyroxene from the Zhibo iron deposit, western Tianshan Mountains														
组分	zb345	zb345	zb406	zb406	zb409	zb409	zb409	zb409	zb420	zb420	zb420	zb492	zb492	zb492
	-1.3	-2.2	-1.2	-1.3	-2.1	-2.6	-4.1	-4.2	-1.1	-3.4	-3.5	-3.3	-4.4	-4.5
w(B)/%														
SiO ₂	53.54	53.21	53.23	53.38	53.17	52.70	53.07	52.68	52.40	53.61	53.50	54.70	53.24	53.43
TiO ₂	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.05	0.14	0.27	0.27	0.60	0.29	0.20	0.37	0.49	0.12	0.19	0.02	0.25	0.14
TFeO	6.87	6.94	7.43	8.57	11.14	9.81	10.93	8.68	7.88	6.58	5.27	6.51	7.85	9.09
MnO	0.01	0.17	0.17	0.12	0.19	0.06	0.01	0.12	0.10	0.17	0.00	0.98	0.00	0.12
MgO	14.24	4.20	13.78	13.06	11.58	12.39	12.03	13.39	13.67	14.38	15.26	13.82	13.70	13.31
CaO	24.12	24.08	24.21	23.77	23.44	23.53	23.94	23.70	23.99	24.30	24.65	24.21	23.99	24.12
Na ₂ O	0.18	0.19	0.22	0.24	0.35	0.27	0.18	0.26	0.32	0.16	0.03	0.09	0.21	0.18
K ₂ O	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0.18
总和	99.07	98.93	99.32	99.41	100.48	99.06	100.36	99.20	98.91	99.32	98.93	100.34	99.27	100.57
基于 6 个氧原子数计算														
Si	2.00	2.00	1.99	2.01	2.00	2.00	2.00	2.00	1.98	1.97	2.00	1.99	2.02	2.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01
Fe ³⁺	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.01	0.00	0.00	0.01
Fe ²⁺	0.22	.20	0.21	0.27	0.35	0.30	0.33	0.23	0.23	0.19	0.20	0.16	0.20	0.23
Mn	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00
Mg	0.79	0.79	0.77	0.73	0.65	0.70	0.67	0.78	0.75	0.77	0.80	0.85	0.76	0.77
Ca	0.97	0.97	0.97	0.96	0.94	0.96	0.96	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98	0.96	0.96
Na	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总离子数	3.99	4.01	4.00	4.00	4.01	4.00	3.99	4.01	4.00	4.00	4.01	3.99	3.98	4.00
Mn/Fe	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.15	0.00	0.01
Mg/Fe	3.70	3.64	3.30	2.71	1.85	2.25	1.96	2.75	3.09	3.90	5.16	3.78	3.11	2.61
端员组分/%														
Di	78.40	77.92	76.00	71.95	62.97	68.37	65.92	73.18	75.85	78.73	83.56	76.59	75.12	72.49
Hd	21.57	21.55	23.46	27.69	36.45	31.43	34.04	26.46	23.83	20.74	16.44	20.33	24.88	27.14
Jo	0.03	0.53	0.55	0.36	0.58	0.20	0.04	0.36	0.33	0.54	0.00	3.08	0.00	0.36

注：TFeO 为全铁氧化物；Di—透辉石，Hd—钙铁辉石，Jo—锰钙辉石。
©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

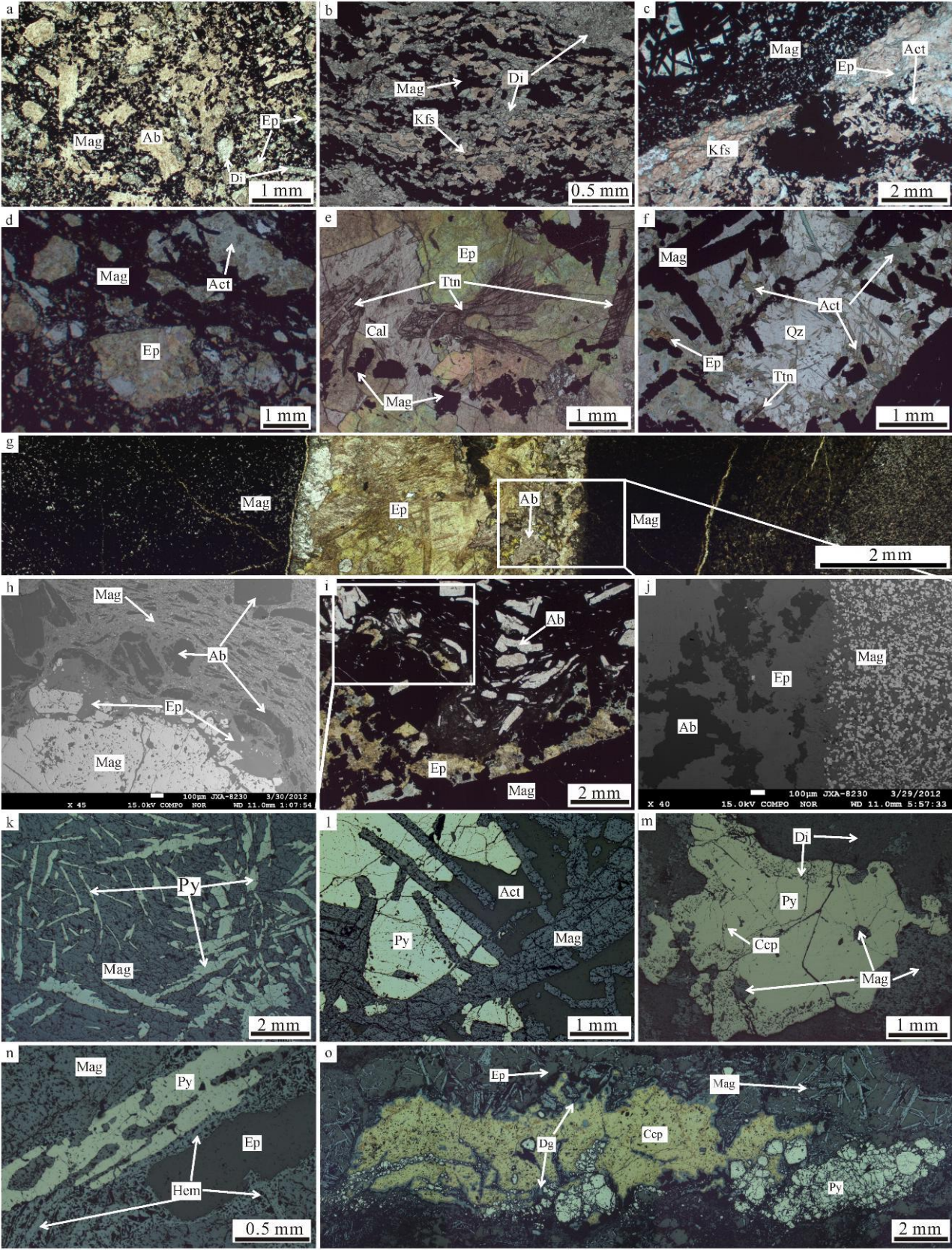


图 4 智博铁矿蚀变与矿化特征显微照片

a. 火山岩早期蚀变阶段的钠长石+透辉石组合, 伴生浸染状磁铁矿; b. 钾长石+透辉石+磁铁矿呈流动状; c. 钾长石+绿帘石+阳起石化蚀变岩与磁铁矿接触; d. 围岩角砾被磁铁矿胶结, 围岩角砾几乎完全蚀变为绿帘石+阳起石; e. 晚期蚀变阶段的绿帘石+方解石+榍石+磁铁矿矿物组合; f. 以阳起石+石英+绿帘石+榍石为主的晚期蚀变矿物组合; g, j. 绿帘石脉与安山岩接触带的磁铁矿化; h, i. 磁铁矿与围岩接触, 没有明显的蚀变, 围岩中的长石斑晶平行于接触带定向排列; k. 黄铁矿呈针柱状分布于磁铁矿中; l. 板条状磁铁矿, 晶粒间充填有黄铁矿和阳起石; m. 粗粒黄铁矿交代磁铁矿, 黄铁矿内见磁铁矿+透辉石残余, 以及零星的黄铜矿; n. 晚期赤铁矿+黄铁矿交代磁铁矿, 伴生有绿帘石; o. 黄铜矿+黄铁矿细脉充填到火山岩围岩裂隙中, 黄铜矿边部发育方辉铜矿

Di—透辉石; Ab—钠长石; Kfs—钾长石; Act—阳起石; Ep—绿帘石; Cal—方解石; Qz—石英; Ttn—榍石; Mag—磁铁矿; Hem—赤铁矿; Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Dg—方辉铜矿

Fig. 4 Microphotographs of alteration and mineralisation types and textures from the Zhibo iron deposit, western Tianshan

a. Volcanic rock replaced by an early alteration assemblage of diopside and albite with disseminated magnetite; b. The arrangement of diopside-K-feldspar+magnetite assemblages defining a flow texture; c. Volcanic rocks with K-feldspathization, epidotization and actinolitization in contact with magnetite; d. Fragments of altered volcanic rock embedded in magnetite, the fragments being strongly epidotized and actionolitized; e. The latest alteration dominated by epidote+calcite+titanite+magnetite assemblages; f. The latest alteration dominated by actinolite+quartz+epidote+titanite assemblages; g, j. Magnetite mineralization along the contact zone between epidote vein and andesite; h, i. Magnetite in contact with andesite with no apparent metasomatic alteration, plagioclase in andesite arranged parallel to the contact zone; k. Long columnar pyrite in massive magnetite; l. Platy magnetite, with granules of pyrite and actinolite filling in interstices between magnetite crystals; m. Pyrite replacing magnetite with magnetite, diopside and trace chalcopyrite inclusions; n. Late hematite+pyrite replacing magnetite commonly together with epidote; o. Late chalcopyrite+pyrite occurring as fracture infillings in volcanic rocks, chalcopyrite marginally converted to digenite

Di—Diopside; Ab—Albite; Kfs—K-feldspar; Act—Actinolite; Ep—Epidote; Cal—Calcite; Qz—Quartz; Ttn—Titanite; Mag—Magnetite; Hem—Hematite; Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite; Dg—Digenite

表 3 智博铁矿代表性长石电子探针分析数据

Table 3 Representative electron microprobe analyses of feldspars from the Zhibo iron deposit, western Tianshan Mountains														
组分	火山岩中斜长石		钠长石						钾长石					
	zb382	zb382	zb255	zb275	zb420	zb420	zb491	zb255	zb275	zb345	zb406	zb420	zb492	zb492
	— 2.5	— 2.8	— 6.5	— 6.2	— 1.5	— 1.10	— 1.1	— 6.6	— 6.1	— 1.7	— 4.6	— 1.6	— 3.4	— 4.1
w(B)/%														
SiO ₂	55.12	58.09	67.71	66.16	61.16	67.15	69.10	63.35	63.65	64.10	64.46	64.53	64.14	63.55
TiO ₂	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05	0.00
Al ₂ O ₃	27.24	26.04	19.52	19.94	21.25	20.01	20.48	18.45	18.06	17.72	18.27	17.95	17.55	17.80
TFeO	0.27	0.08	0.08	0.07	0.73	0.13	0.05	0.25	0.05	0.56	0.17	0.10	0.13	0.35
MnO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00
MgO	0.00	0.03	0.01	0.01	0.27	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	10.59	8.70	0.11	0.55	0.32	0.73	0.25	0.06	0.02	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02
Na ₂ O	5.37	6.70	12.71	11.80	7.61	12.05	9.33	0.52	0.40	0.30	0.36	0.41	0.19	0.43
K ₂ O	0.10	0.12	0.04	0.08	3.01	0.05	0.09	16.52	17.00	17.04	16.97	16.89	17.14	17.02
总和	98.70	99.78	100.18	98.62	94.35	100.15	99.30	99.19	99.21	99.77	100.30	99.91	99.22	99.17
基于 8 个氧原子数计算														
Si	2.52	2.61	2.97	2.94	2.87	2.95	3.01	2.97	2.99	3.00	2.99	3.00	3.00	2.99
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.47	1.38	1.01	1.05	1.17	1.03	1.05	1.02	1.00	0.98	1.00	0.98	0.97	0.99
Fe ²⁺	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.52	0.42	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.47	0.58	1.08	1.02	0.69	1.02	0.79	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02	0.04
K	0.01	0.01	0.00	0.00	0.18	0.00	0.01	0.99	1.02	1.02	1.00	1.00	1.02	1.02
总离子数	5.00	5.00	5.07	5.04	4.98	5.03	4.87	5.04	5.05	5.05	5.03	5.02	5.01	5.05
An	51.87	41.50	0.46	0.48	1.82	3.23	1.45	0.30	0.07	0.05	0.10	0.02	0.11	0.11
Ab	47.57	57.82	99.33	97.08	77.89	96.48	97.91	4.54	3.42	2.58	3.14	3.58	1.65	3.70
Or	0.56	0.68	0.21	0.44	20.30	0.28	0.64	95.17	96.51	97.37	96.76	96.40	98.25	96.19

注: TFeO 为全铁氧化物。
©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

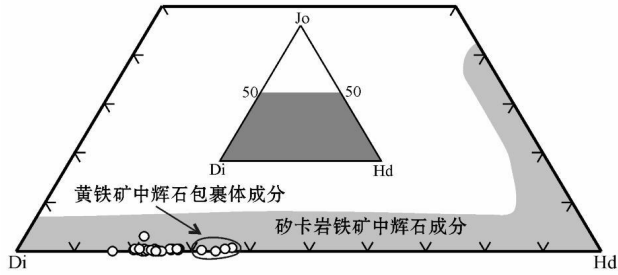


图 5 智博铁矿辉石成分三角图解(据 Meinert et al., 2005)
Di—透辉石; Hd—钙铁辉石; Jo—锰钙辉石
Fig. 5 Ternary plots of pyroxene compositions from the Zhibo iron deposit (after Meinert et al., 2005)
Di—Diopside; Hd—Hedenbergite; Jo—Johannsenite

钾长石是矿区内分布最广的蚀变矿物之一, 多由钠长石、透辉石蚀变而成(图 3b, e, g), 主要呈他形粒状分布, 伴生有磁铁矿(图 4b, c), 有时与绿帘石呈网脉状侵入磁铁矿体(图 3c)。

3.3 角闪石

角闪石分布较广, 在蚀变火山岩以及磁铁矿体中都有分布。主要呈暗绿色-黄绿色纤维柱状, 部分呈短柱状(图 4d, f), 可能由辉石以及火山岩中普通角闪石蚀变而成, 常被后期绿帘石、绿泥石交代。根

据 Leake 等(1997)的分类计算方法, 智博铁矿角闪石均属钙质角闪石系列, 主要为阳起石(图 6), 其主要成分为: $Si_T=7.71\sim7.89$, $(Na+K)_A=0.02\sim0.13$, $Mg/(Mg+Fe^{2+})=0.64\sim0.72$, $Mg/(Mg+Al)=0.88\sim0.95$, $w(Al_2O_3)$ 为 $1.05\%\sim2.42\%$, $w(TiO_2)$ 很低, 多小于 0.1(见表 4)。

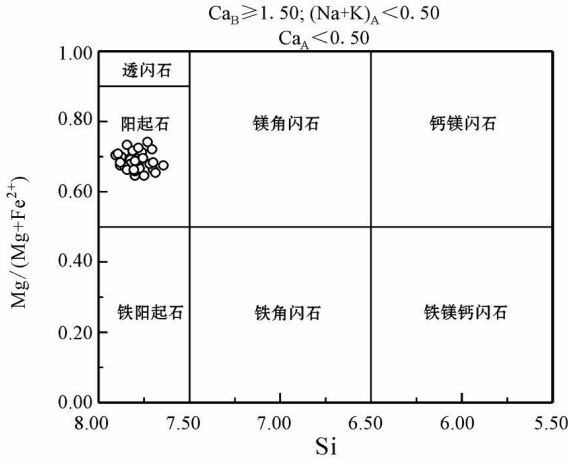


图 6 智博铁矿角闪石分类图解(据 Leake et al., 1997)
Fig. 6 Classification of amphibole from the Zhibo iron deposit, western Tianshan Mountains (after Leake et al., 1997)

Table 4 Representative electron microprobe analyses of amphibole from the Zhibo iron deposit western Tianshan Mountains														
组分	zb255	zb255	zb255	zb300	zb300	zb300	zb336	zb336	zb336	zb348	zb348	zb409	zb409	zb492
	-1.8	-4.1	-6.4	-1.19	-5.3	-7.3	-1.3	-2.3	-3.2	-1.4	-1.5	-5.2	-6.1	-3.7
	-3.8													
	w (B)/ %													
SiO ₂	53.28	52.91	53.33	4.17	53.10	53.64	53.04	53.71	53.54	53.26	53.69	53.18	52.52	54.50
TiO ₂	0.03	0.05	0.03	0.00	0.03	0.04	0.00	0.07	0.04	0.01	0.00	0.05	0.05	0.07
Al ₂ O ₃	1.76	1.91	1.86	1.05	1.76	1.53	2.42	1.56	1.16	1.85	1.06	2.15	2.08	1.75
TFeO	13.67	12.80	12.76	12.36	13.54	13.60	14.44	14.18	13.95	12.53	12.69	13.76	15.06	12.34
MnO	0.17	0.78	0.91	0.32	0.04	0.00	0.05	0.11	0.00	0.60	0.82	0.52	0.11	0.71
MgO	15.33	15.03	15.37	16.08	15.06	14.90	14.54	14.78	15.11	15.34	15.21	15.32	14.55	15.76
CaO	12.06	12.11	11.92	12.25	12.29	12.04	12.04	12.03	12.31	12.21	12.31	12.09	12.14	12.61
Na ₂ O	0.38	0.24	0.25	0.14	0.17	0.32	0.36	0.36	0.25	0.23	0.08	0.33	0.26	0.25
K ₂ O	0.29	0.09	0.11	0.10	0.10	0.10	0.13	0.23	0.13	0.08	0.07	0.06	0.09	0.04
总和	96.97	95.92	96.54	96.47	96.09	96.17	97.02	97.03	96.49	96.11	95.93	97.46	96.86	98.03
	基于 23 个氧原子数计算													
Si	7.71	7.78	7.79	7.88	7.79	7.83	7.75	7.79	7.85	7.80	7.89	7.71	7.69	7.78
Ti	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Al	0.30	0.33	0.32	0.18	0.30	0.26	0.42	0.27	0.20	0.32	0.18	0.37	0.36	0.29
Fe ²⁺	1.28	1.57	1.56	1.50	1.63	1.46	1.77	1.47	1.70	1.54	1.55	1.56	1.68	1.29
Fe ³⁺	0.37	0.00	0.00	0.01	0.03	0.20	0.00	0.25	0.01	0.00	0.01	0.11	0.16	0.19
Mn	0.02	0.10	0.11	0.04	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.07	0.10	0.06	0.01	0.09
Mg	3.31	3.30	3.35	3.49	3.30	3.24	3.17	3.20	3.30	3.35	3.33	3.31	3.18	3.36
Ca	1.87	1.91	1.87	1.91	1.93	1.88	1.89	1.87	1.93	1.92	1.94	1.88	1.90	1.93
Na	0.11	0.07	0.07	0.04	0.05	0.09	0.10	0.10	0.07	0.07	0.02	0.09	0.07	0.07
K	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
总离子数	15.02	15.09	15.09	15.07	15.05	14.98	15.13	15.01	15.09	15.08	15.03	15.11	15.08	15.02
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.72	0.68	0.68	0.70	0.67	0.69	0.64	0.69	0.66	0.69	0.68	0.68	0.65	0.72
Mg/(Mg+Al)	0.92	0.91	0.91	0.95	0.92	0.92	0.88	0.92	0.94	0.91	0.95	0.90	0.90	0.92

注: TFeO 为全铁氧化物。
©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2, 3.1; zb420—1.3, 5.2), 其 $w(\text{V}_2\text{O}_5)$ 较高 ($\geq 0.15\%$, 平均 0.28%), 与火山岩中的磁铁矿 [$w(\text{V}_2\text{O}_5) \geq 0.17\%$, 平均 0.38%] 类似, 暗示该矿化阶段的铁质部分来源于围岩。

晚期赤铁矿沿解理、裂隙及颗粒边缘交代磁铁矿(图 4n), 或者呈网脉状胶结早期磁铁矿(图 3k), 多与黄铁矿、绿帘石以及方解石伴生。电子探针分析(表 6)表明, 赤铁矿成分稳定, 变化较小。

3.6 黄铁矿和黄铜矿

黄铁矿是矿区内最常见的硫化物, 大小不一, 主

要呈两种赋存状态, 稍早期黄铁矿主要呈他形针柱状或粒状充填于磁铁矿晶粒之间或者解理中(图 4l, k); 晚期黄铁矿颗粒粗大, 多与绿帘石以及石英共生呈脉状贯入矿体中胶结磁铁矿角砾(图 3h), 常见黄铁矿交代磁铁矿, 并含有早期磁铁矿+透辉石的残留(图 4m), 形成交代残余结构。电子探针分析结果(表 7)表明, 黄铁矿成分稳定, $w(\text{Ni})$ 小于 0.51% , $w(\text{Co})$ 多小于 0.1% , 个别含量较高, 可达 0.75% , $w(\text{Se})$ 、 $w(\text{As})$ 、 $w(\text{Cu})$ 非常低, 多数低于检测限。

表 6 智博铁矿代表性磁铁矿和赤铁矿电子探针分析数据
Table 6 Representative electron microprobe analyses of magnetite and hematite from the Zhibo iron deposit western Tianshan Mountains

形状	点号	w(B)/ %													
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO	V ₂ O ₃	P ₂ O ₅	总和
板条状	255-1.1	1.60	0.08	0.20	90.11	0.04	0.19	0.26	0.07	0.03	0.08	0.07	0.00	0.00	92.73
	255-1.3	0.01	0.14	0.02	93.31	0.04	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	93.62
	255-1.6	0.72	0.02	0.07	92.81	0.07	0.08	0.08	0.00	0.01	0.01	0.00	0.07	0.00	93.94
	300-1.2	0.71	0.02	0.13	92.35	0.00	0.07	0.04	0.06	0.00	0.01	0.06	0.01	0.02	93.48
	300-6.1	0.66	0.04	0.07	92.51	0.06	0.08	0.04	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	93.52
	300-7.2	2.54	0.23	0.48	87.96	0.06	0.40	0.66	0.04	0.06	0.09	0.00	0.01	0.02	92.55
	300-7.5	0.13	0.04	0.03	92.91	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.01	0.00	93.20
	491-1.5	0.15	0.05	0.03	93.77	0.03	0.01	0.05	0.01	0.00	0.17	0.01	0.01	0.01	94.30
	491-1.6	0.06	0.03	0.00	93.90	0.06	0.00	0.00	0.07	0.05	0.05	0.00	0.01	0.00	94.23
粗粒、脉状	311-2.1	3.65	0.14	0.61	86.87	0.01	0.60	0.83	0.17	0.20	0.04	0.00	0.02	0.00	93.14
	313-1.1	3.99	0.02	0.50	85.48	0.02	0.66	0.96	0.17	0.31	0.08	0.00	0.03	0.00	92.22
	313-3.1	4.22	0.13	0.87	84.97	0.00	0.74	1.13	0.18	0.38	0.13	0.01	0.03	0.00	92.79
	336-3.1	2.72	0.16	0.46	88.53	0.01	0.43	0.71	0.12	0.11	0.02	0.04	0.03	0.02	93.36
	343-7.1	1.88	0.08	0.19	90.20	0.00	0.12	0.21	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	92.73
	448-2.3	1.66	0.04	0.21	91.27	0.00	0.21	0.35	0.00	0.06	0.04	0.00	0.05	0.00	93.89
	492-3.1	2.43	0.13	0.22	89.28	0.00	0.48	0.67	0.05	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	93.32
细粒、浸染状	345-1.1	0.04	0.02	0.01	93.53	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	93.67
	345-2.1	2.12	0.06	0.13	90.75	0.00	0.41	0.47	0.07	0.01	0.04	0.00	0.01	0.00	94.07
	444-2.1	0.45	0.05	0.01	92.49	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.08	0.02	93.20
	448-1.3	1.36	0.03	0.09	92.41	0.05	0.21	0.30	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	94.51
	448-1.5	0.77	0.02	0.05	92.31	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	93.27
	492-3.3	1.00	0.01	0.17	92.02	0.00	0.12	0.19	0.00	0.05	0.07	0.00	0.01	0.00	93.64
492-3.4	0.10	0.01	0.03	91.80	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.05	0.01	92.08	
浸染状、近火山岩围岩、或胶结火山岩角砾	409-2.2	1.13	0.06	0.08	92.26	0.02	0.04	0.13	0.07	0.00	0.04	0.00	0.15	0.00	93.98
	409-3.1	0.92	0.02	0.04	92.44	0.01	0.07	0.13	0.00	0.00	0.06	0.03	0.35	0.03	94.10
	420-1.3	0.40	0.00	0.02	91.74	0.06	0.02	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.31	0.04	92.66
	420-5.2	0.45	0.00	0.02	93.02	0.05	0.03	0.04	0.00	0.00	0.06	0.06	0.38	0.00	94.11
	439-1.2	0.42	0.02	0.01	92.36	0.05	0.00	0.04	0.00	0.00	0.04	0.05	0.22	0.00	93.21
火山岩中副矿物	485-1.1	0.01	13.26	0.00	79.32	0.00	0.03	0.06	0.00	0.00	0.05	0.00	0.57	0.03	93.33
	485-1.2	0.47	6.18	0.08	83.95	0.07	0.02	0.15	0.05	0.04	0.05	0.00	0.27	0.02	91.35
	491-1.2	0.21	11.16	0.00	81.37	0.00	0.05	0.49	0.00	0.00	0.49	0.00	0.51	0.03	94.31
	432-4.1	0.10	3.08	1.01	86.02	0.00	0.01	0.00	0.06	0.00	0.02	0.00	0.17	0.02	90.49
赤铁矿	311-1.1	0.06	0.62	0.03	86.25	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.02	0.09	0.04	87.17
	311-2.1	0.00	0.62	0.01	87.18	0.04	0.00	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.08	0.00	88.00
	311-5.1	0.06	0.53	0.13	89.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	90.21
	313-1.1	0.06	0.52	0.01	89.10	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	89.77

注: TFeO 为全铁氧化物。
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 7 智博铁矿代表性黄铁矿和黄铜矿电子探针分析数据

Table 7 Representative electron microprobe analyses of pyrite and chalcopyrite from the Zhibo iron deposit, western Tianshan Mountains

矿物	点号	w(B)/%											Co/ Ni
		Se	As	S	Pb	Co	Fe	Cu	Zn	Ni	Bi	总和	
黄铁矿	zb276-1.1	0.01	0.03	53.29	0.04	0.03	46.13	0.00	0.00	0.07	0.03	99.63	0.43
	zb300-8.1	0.02	0.02	53.38	0.07	0.04	46.68	0.00	0.00	0.13	0.08	100.42	0.31
	zb308-1.2	0.00	0.00	53.41	0.00	0.06	46.63	0.00	0.00	0.14	0.00	100.24	0.43
	zb311-1.1	0.00	0.02	52.88	0.00	0.05	46.04	0.01	0.00	0.31	0.16	99.47	0.16
	zb311-4.1	0.00	0.00	54.01	0.09	0.24	46.34	0.00	0.02	0.01	0.00	100.71	24.00
	zb319-1.3	0.03	0.00	53.78	0.00	0.03	46.19	0.00	0.08	0.51	0.00	100.62	0.06
	zb319-1.4	0.00	0.04	53.57	0.07	0.75	45.35	0.00	0.00	0.01	0.11	99.90	75.00
	zb319-1.6	0.01	0.00	53.42	0.00	0.05	46.41	0.03	0.00	0.15	0.00	100.07	0.33
	zb448-1.1	0.03	0.00	53.70	0.00	0.74	46.18	0.03	0.00	0.00	0.00	100.68	—
	zb448-1.2	0.00	0.01	53.96	0.07	0.04	46.93	0.01	0.03	0.02	0.07	101.14	2.00
黄铜矿	zb492-1.1	0.00	0.00	53.20	0.04	0.06	46.70	0.06	0.01	0.46	0.00	100.53	0.13
	zb311-4.2	0.00	0.00	34.36	0.06	0.03	30.19	33.86	0.14	0.00	0.04	98.68	—
	zb276-1.2	0.00	0.00	34.80	0.16	0.04	29.97	34.72	0.06	0.00	0.01	99.76	—

矿区内黄铜矿含量非常少,少量黄铜矿呈星点状被磁铁矿或黄铁矿包裹(图 4m),局部可见黄铜矿呈细脉贯入到磁铁矿体以及围岩中,多与黄铁矿及绿泥石伴生,黄铜矿边缘可见方辉铜矿化(图 4o)。

4 讨 论

4.1 围岩蚀变特征

岩相学观察以及电子探针分析表明,智博铁矿早期蚀变以钠钙质蚀变为主,形成钠长石+透辉石的矿物组合,可能为富钠质含矿热液(熔体)作用于火山岩围岩,改造火山岩形成,伴生有铁质的交代,磁铁矿呈他形粒状充填于透辉石颗粒之间,形成浸染状矿体(图 3e;图 4a,b)。钠长石+透辉石的蚀变矿物组合在中国玢岩型铁矿中很常见,该阶段蚀变是造成部分围岩中铁质活化富集的重要机制之一(翟裕生等,1980)。随着成矿流体的演化,温度逐渐降低,钾含量和水分增高,形成钾长石+阳起石+绿帘石为主的钾钙质蚀变矿物组合。一些副矿物(如楣石以及少量磷灰石)的出现,同样表明成矿流体相对富钙。虽然智博铁矿中并未出现石榴子石,但其交代作用与一般含义的矽卡岩仍具有一定的类比性,主要表现在:智博铁矿中的辉石富透辉石,含少量钙铁辉石,锰钙辉石含量很低,Mn/Fe 小于 0.1,与前人总结的矽卡岩铁矿床中辉石特征一致(Nakano et al., 1994;赵一鸣等,1997),在辉石三角图解(图 5)中,均落于矽卡岩铁矿范围内(Meinert et al., 2005);该矿区内大量存在的阳起石也是矽卡岩

铁矿比较常见的矿物(赵一鸣等,2003),在许多铁氧化物矿床中也经常出现,如智利北部白垩纪的铁矿(Bookstrom, 1977)。智博铁矿发育广泛的围岩蚀变,与一些岩浆-热液成因的铁氧化物矿床具有类似的蚀变特征(Pollard, 2001)。阿吾拉勒铁成矿带内许多铁矿都发育有不同程度的围岩蚀变,蚀变类型略有区别,如与智博铁矿相距 10 km 的查岗诺尔矿床发育有石榴子石、透辉石、阳起石、绿帘石等矽卡岩化蚀变(洪为等,2012),而智博铁矿则未见石榴子石化,只发育一定程度的透辉石、钠长石、阳起石化蚀变以及大量的钾长石、绿帘石化蚀变。这些差异可能与查岗诺尔矿区内存在一定厚度的大理岩有关,两大铁矿的原始成矿流体组分也可能存有差异。

智博铁矿中的磁铁矿整体具有较低的 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 以及 $w(\text{V}_2\text{O}_5)$,其 $w(\text{TiO}_2)$ (平均 0.06%) 低于基鲁纳型以及智利型铁矿,二者 $w(\text{TiO}_2)$ 通常分别低于 1% 和 0.5%。部分早期细粒浸染状磁铁矿具有与火山岩中磁铁矿类似的 $w(\text{V}_2\text{O}_5)$,暗示该矿化阶段的铁质部分来源于围岩,钛则可能形成以楣石为主的富钛矿物。蚀变特征以及磁铁矿成因分析表明,矿区内广泛存在的热液蚀变作用与磁铁矿的形成具有非常紧密的联系,该过程可以萃取围岩中部分铁质富集成矿,同时对热液中的铁质沉淀起到一定的促进作用。

4.2 矿床成因探讨

前已述及,西天山地区广泛分布的大哈拉军山组具有复杂的地球化学特征以及形成时代。结合 Sr-Nd 同位素研究,朱永峰等(2006)认为,西天山晚

泥盆世—早石炭世岛弧自西向东逐渐消亡,构造体制从俯冲体制向碰撞后环境转变,在晚石炭世发育有碰撞后富钾岩浆的喷发。智博矿区火山岩具有大陆岛弧火山岩的地球化学特征,锆石 U-Pb 年龄为 300.3 Ma,可能形成于晚石炭世末期俯冲碰撞的后期阶段(蒋宗胜等,2012)。矿区内出露的花岗岩岩体与岩脉具有后碰撞 A 型花岗岩的地球化学特征,形成时代为 304.1 Ma 和 294.5 Ma (Zhang et al., 2012)。因此,智博铁矿可能形成于西天山俯冲碰撞晚期阶段的大陆岛弧环境,与一些显生宙铁氧化物型矿床(如 Candelaria)所处于的活动大陆边缘环境(Groves et al., 2010)类似。

智博铁矿发育广泛的围岩蚀变,显示热液交代作用对成矿作用有重要的贡献,同时还发育一些暗示矿浆成因的结构特征:块状矿体与围岩呈截然接触,没有明显的蚀变(图 3n);围岩中的长石斑晶发生流动排列,表明曾发生过高温熔体对围岩的挤压贯入作用(图 4h, i);磁铁矿与透辉石呈流动条带状分布,显示早期应该存在矿浆的流动作用(图 3l);围岩角砾被磁铁矿胶结,发生不同程度的蚀变(图 3f, g),显示存在贯入成矿作用;板条状或树枝状磁铁矿(图 3m;图 4l),也被认为是矿浆成因的特征结构之一(Nyström et al., 1989)。目前,一些铁矿被认为是铁矿浆沿一定通道上升,在近地表处固结或溢出地表形成的富铁矿体,如瑞典基鲁纳铁矿(Nyström et al., 1994)、智利拉科铁矿(Park, 1961; Henriquez et al., 2003)、中国宁芜地区的姑山铁矿(Hou et al., 2011;毛景文等, 2012)等。这些铁矿多发育磷灰石+磁铁矿的矿物组合,具有一系列指示矿浆成矿作用的野外地质特征与矿石结构:如磁铁矿流动构造、气孔构造、杏仁状构造、囊状构造、淬火构造、角砾构造、熔渣构造、致密块状矿石与围岩截然接触等。尽管这些铁矿的矿浆成因仍然存有疑问(顾连兴等, 1988; Sillitoe et al., 2002),但矿浆成矿作用仍然能够比较合理地解释这些铁矿的地质特征。实验模拟也证明,在高温熔融状态下,经液态不混溶作用,铁矿浆可以由富铁硅酸盐岩浆熔离形成,该过程在磷或其他挥发分(如 F, B)参与下更容易发生(Philpotts, 1967; 苏良赫, 1984)。与上述比较被认可的矿浆型铁矿相比,智博铁矿仍然缺少一些矿浆成因的有力证据,如缺少气孔构造、杏仁状构造、囊状构造、磁铁矿流动构造,同时,智博铁矿中少见磷灰石,仅局部见晚期蚀变成因的磷灰石,这似乎与矿浆

成因模拟实验的结果有些不符。

阿吾拉勒铁成矿带内古火山机构发育,铁矿床的分布主要受展布于带内的火山活动中心控制(陈毓川等, 2008)。遥感影像资料显示,智博铁矿一带环状断裂和放射状断裂十分发育,具有破火山口机构特征,智博铁矿位于破火山口中心,属于以安山质岩浆为母岩浆的岩浆矿床(主要)和热液矿床(次要)的复合型矿床(冯金星等, 2010)。智博铁矿具有一些指示矿浆成因的矿石结构,同时,发育广泛的围岩蚀变,显示热液交代作用对成矿有重要的贡献,本文认为富铁岩浆流体成矿可能是智博铁矿较合理的成因解释。该富铁岩浆流体可能主要以 Na-Fe-Cl 为主的络合物存在(Pollard, 2001),沿火山通道或者裂隙上升,在侵入到火山岩围岩形成大量类似矿浆成因的富矿体时,伴随有一定程度的钠钙质蚀变。矿体整体分布表现为中-下部块状磁铁矿体与围岩的接触界线明显截然,显示贯入成矿作用的特点,而上部矿体与围岩接触带则发育一定的蚀变作用,矿体内有大量蚀变矿物伴生。矿体的成矿特征以及蚀变作用对矿体的贡献程度表明,成矿铁质应该主要来自地壳深部的富铁流体,少量来自流体对围岩的萃取。成矿带内数个大型铁矿的成矿作用与晚石炭世大陆岛弧岩浆活动有密切的成因联系,岛弧岩浆活动形成了区域上相当数量的中-基性火山岩组合,在岩浆演化晚期可能分异出富铁岩浆流体,为区内多个矿床的形成提供了大部分铁质、成矿流体以及热量;而大规模火山活动以及破火山口断裂构造则为成矿流体的上涌循环提供了通道以及有利的成矿空间。限于目前的研究程度,关于富铁岩浆流体的形成机制仍然需要进一步研究。

5 结 论

(1) 智博铁矿发育有类似岩浆-热液成因铁矿床的蚀变类型以及矿物化学成分,其围岩蚀变可划分为 3 个阶段:第一阶段以透辉石+钠长石+磁铁矿为主,透辉石成分类似于矽卡岩铁矿中辉石成分;第二阶段以阳起石+钾长石+绿帘石+磁铁矿+黄铁矿为主,叠加改造第一阶段的钠-钙质蚀变矿物;第三阶段以绿帘石+绿泥石+方解石+石英+黄铁矿+黄铜矿为主。磁铁矿整体以低 $w(\text{TiO}_2)$ 为主,不同结构的磁铁矿略有不同,早期浸染状磁铁矿具有较高的 $w(\text{V}_2\text{O}_5)$,晚期脉状及粗粒磁铁矿 SiO_2 、

Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 等成分则增加明显。

(2) 智博铁矿发育广泛的围岩蚀变, 显示热液交代作用对成矿作用有重要的贡献, 同时具有一些指示矿浆成因的矿石结构, 如块状磁铁矿与围岩呈截然接触, 磁铁矿胶结围岩角砾, 磁铁矿条带呈流动状分布以及板条状磁铁矿等。

(3) 智博铁矿可能主要由岩浆演化晚期的富铁岩浆流体形成, 在形成大量类似矿浆成因富矿体时, 伴随有一定程度的钠钙质围岩蚀变, 铁质主要来自地壳深部的富铁流体, 少量来自流体对围岩的萃取, 成矿与晚石炭世大陆岛弧岩浆活动有密切的成因联系。

志 谢 感谢中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇老师在电子探针分析过程中给予的指导和帮助。杨富全研究员和余金杰研究员提出了宝贵的修改意见, 进一步完善了本文, 在此深表感谢! 野外工作和资料收集得到新疆地矿局第三地质大队领导及智博铁矿项目组成员的大力支持, 作者谨向他们表示衷心感谢!

参考文献/References

- 安 芳, 朱永峰. 2008. 西北天山吐拉苏盆地火山岩 SHRIMP 年代学和微量元素地球化学研究[J]. 岩石学报, 24 (12): 2741-2748.
- 车自成, 刘 良, 刘洪福, 罗金海. 1996. 论伊犁古裂谷[J]. 岩石学报, 12 (3): 478-490.
- 陈义兵, 胡雪琴, 张国新, 张前锋. 1999. 西天山独库公路花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 44 (21): 2328-2332.
- 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 王登红, 董连慧, 徐 新, 王晓地. 2008. 中国天山矿产及成矿体系[M]. 北京: 地质出版社. 246-287.
- 董连慧, 冯 京, 庄道泽, 李凤鸣, 屈 迅, 刘德权, 唐延龄. 2011. 新疆富铁矿成矿特征及主攻类型成矿模式探讨[J]. 新疆地质, 29 (4): 416-422.
- 董连慧, 李基宏, 冯 京, 庄道泽, 刘 斌, 李凤鸣, 屈 迅, 姜云辉. 2012. 新疆地质矿产勘查 2011 年主要成果和进展[J]. 新疆地质, 30 (1): 1-4.
- 冯金星, 石福品, 汪帮耀, 胡建明, 王江涛, 田敬全. 2010. 西天山阿吾拉勒成矿带火山岩型铁矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-132.
- 高 俊, 钱 青, 龙灵利, 张 喜, 李继磊, 苏 文. 2009. 西天山的增生造山过程[J]. 地质通报, 28 (12): 1804-1816.
- 顾连兴, 阮惠融. 1988. 论安徽省姑山铁矿床的热液成矿特征[J]. 矿床地质 7 (2): 21-30.
- 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿

[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. 1-437.

- 洪 为, 张作衡, 赵 军, 王志华, 李凤鸣, 石福品, 刘兴忠. 2012. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31 (2): 191-211.
- 蒋宗胜, 张作衡, 侯可军, 洪 为, 王志华, 李凤鸣, 田敬全. 2012. 西天山查岗诺尔和智博铁矿区火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 28 (7): 2074-2088.
- 李凤鸣, 彭湘萍, 石福品, 周昌平, 陈建中. 2011. 西天山石炭纪火山-沉积盆地铁锰矿成矿规律浅析[J]. 新疆地质, 29 (1): 55-60.
- 李继磊, 苏 文, 张 喜, 刘 新. 2009. 西天山阿吾拉勒西段麻粒岩相片麻岩锆石 Cameca U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 28 (12): 1852-1862.
- 龙灵利, 高 俊, 钱 青, 熊贤明, 王京彬, 王玉往, 高立明. 2008. 西天山伊犁地区石炭纪火山岩地球化学特征及构造环境[J]. 岩石学报, 24 (4): 699-710.
- 毛景文, 段 超, 刘佳林, 张 成. 2012. 陆相火山-侵入岩有关的铁多金属矿成矿作用及矿床模型——以长江中下游为例[J]. 岩石学报, 28 (1): 1-14.
- 钱 青, 高 俊, 熊贤明, 龙灵利, 黄德志. 2006. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的岩石地球化学特征、成因及形成环境[J]. 岩石学报, 22 (5): 1307-1323.
- 苏良赫. 1984. 液相不共溶在岩石学及矿床学中的重要性[J]. 地球科学, (1): 1-12.
- 田敬全, 胡敬涛, 易习正, 李 明, 董全宏, 刘兴忠. 2009. 西天山查岗诺尔-备战一带铁矿成矿条件及找矿分析[J]. 西部探矿工程, (8): 88-92.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平, 王立社. 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 23 (9-10): 903-910.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社. 1-169.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社. 1-841.
- 王志华, 张作衡, 蒋宗胜, 洪 为, 田敬全. 2012. 西天山智博铁矿床磁铁矿成分特征及其矿床成因意义[J]. 矿床地质, 31 (4): 983-998.
- 翟 伟, 孙晓明, 高 俊, 贺小平, 梁金龙, 苗来成, 吴有良. 2006. 新疆阿希金矿床赋矿围岩——大哈拉军山组火山岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 22 (5): 1399-1404.
- 翟裕生, 林新多, 池三川, 姚书振. 1980. 长江中下游内生铁矿床成因类型及成矿系列探讨[J]. 地质与勘探, (3): 9-14.
- 赵一鸣, 张铁男, 林文蔚. 1997. 我国夕卡岩矿床中的辉石和似辉石特征及其与金属矿化的关系[J]. 矿床地质 16 (4): 319-329.
- 赵一鸣, 李大新. 2003. 中国夕卡岩矿床中的角闪石[J]. 矿床地质, 22 (4): 345-359.
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 郭 璇, 周 晶. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究[J]. 科学通报, 50 (18): 2004-2014.
- 朱永峰, 周 晶, 郭 璇. 2006. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22 (5): 1341-1350.

- 朱永峰, 何国琦, 安芳. 2007. 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律[J]. 地质通报, 26 (9): 1167-1177.
- 朱志新, 李锦轶, 董连慧, 王克卓, 张晓帆, 徐仕琪. 2011. 新疆西天山古生代侵入岩的地质特征及构造意义[J]. 地学前缘, 18 (2): 170-179.
- Bookstrom A A. 1977. The magnetite deposits of El Romeral, Chile [J]. Econ. Geol., 72 (6): 1101-1130.
- Gao J, Li M S, Xiao X C, Tang Y Q and He G Q. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. Tectonophysics, 287 (1-4): 213-231.
- Groves D I, Bierlein F P, Meinert L D and Hitzman M W. 2010. Iron Oxide-Copper-Gold (IOCG) Deposits through earth history: Implications for origin, lithospheric setting and distinction from other epigenetic Iron Oxide deposits[J]. Econ. Geol., 105 (3): 641-654.
- Henríquez F, Naslund H R, Nystöm J O, Vivallo W, Aguirre R, Dobbs F M and Lledó H. 2003. New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile—a discussion [J]. Econ. Geol., 98 (7): 1497-1500.
- Hou T, Zhang Z C and Kusky T. 2011. Gushan magnetite-apatite deposit in the Ningwu basin, Lower Yangtze River Valley, SE China: Hydrothermal or Kiruna type? Ore Geology Reviews, 43 (1): 333-346.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, Birch W D, Gilbert M C, Grice J D, Hawthorne F C, Kato A, Kisch H J, Krivovichev V G, Linthout K, Laird J, Mandarino J A, Maresch W V, Nickel E H, Rock N M S, Schumacher J C, Smith D C, Stephenson N C N, Ungaretti L, Whittaker E J W and Guo Y Z. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names[J]. American Mineralogist, 82 (9-10): 1019-1037.
- Meinert L, Dipple G and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits[J]. Econ. Geol., 100: 299-336.
- Morimoto N, Fabries J, Ferguson A K, Ginzburg I V, Ross M, Seifert F A, Zussman J, Aoki K and Gottardi G. 1988. Nomenclature of pyroxenes[J]. American Mineralogist, 73(9-10): 1123-1133.
- Nakano T, Yoshino T, Shimazaki H and Shimizu M. 1994. Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposits[J]. Econ. Geol., 89 (7): 1567-1580.
- Nyström J O and Henriquez F. 1989. Dendritic magnetite and miniature diapir-like concentrations of apatite: Two magmatic features of the Kiirunavaara iron ore[J]. Geologiska Föreningens Stockholm. Föreläsningar, 111 (1): 53-64.
- Nyström J O and Henriquez F. 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: Ore textures and magnetite geochemistry[J]. Econ. Geol., 89 (4): 820-839.
- Park C F. 1961. A magnetite “flow” in northern Chile[J]. Econ. Geol., 56 (2): 431-436.
- Philpotts A R. 1967. Origin of certain iron-titanium oxide and apatite rocks[J]. Econ. Geol., 62 (3): 303-315.
- Pollard P J. 2001. Sodic(-calcic) alteration in Fe-oxide-Cu-Au districts: An origin via unmixing of magmatic $H_2O-CO_2-NaCl \pm CaCl-KCl$ fluids[J]. Mineralium Deposita, 36(1): 93-100.
- Sillitoe R H and Burrows D R. 2002. New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile[J]. Econ. Geol., 97 (5): 1101-1109.
- Wang B, Shu L S, Cluzel D, Faure M and Charvet J. 2007. Geochemical constraints on Carboniferous volcanic rocks of the Yili Block (Xinjiang, NW China): Implication for the tectonic evolution of Western Tianshan[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 29 (1): 148-159.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, Zhao Z Y and Wang G R. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia[J]. Geology, 18 (2): 128-131.
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C, Han C M, Yuan C, Chen H L, Sun M, Sun S and Li J L. 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. International Journal of Earth Sciences, 98 (6): 1189-1217.
- Zhang X, Tian J Q, Gao J, Klemd R, Dong L H, Fan J, Jiang T, Hu C J and Qian Q. 2012. Geochronology and geochemistry of granitoid rocks from the Zhibo syngenetic volcanogenic iron ore deposit in the Western Tianshan Mountains (NW-China): Constraints on the age of mineralization and tectonic setting[J]. Gondwana Research, 22 (2): 585-596.
- Zhu Y F, Guo X, Song B, Zhang L F and Gu L B. 2009. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China[J]. Journal of the Geological Society, 166 (6): 1085-1099.