

新疆西天山智博铁矿床磁铁矿成分 对其成矿机制的指示*

武 阳^{1,2,3}, 申 萍^{1,2,3**}, 潘鸿迪⁴, 李昌昊^{1,2,3}, 冯浩轩^{1,2,3}, 李文广^{1,2}, 谢日实⁵

(1 中国科学院矿产资源研究重点实验室 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 3 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029; 4. 长安大学地质科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 5 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 智博铁矿床位于新疆西天山阿吾拉勒成矿带东段, 主要赋矿围岩为石炭系大哈拉军山组安山岩、玄武质安山岩和火山碎屑岩。该矿床主要有东、中、西 3 个矿区, 其中以东矿区为主矿区。矿体主要呈层状、似层状、厚板状和透镜状。金属矿物以磁铁矿为主, 含有少量黄铁矿、赤铁矿和黄铜矿。矿石构造以块状和浸染状构造为主, 此外还有角砾状构造、条带状构造、流纹状构造和脉状构造等。矿石结构有他形-半自形结构、板条状结构和海绵陨铁结构等。智博铁矿床蚀变矿物主要有透辉石、钠长石、阳起石、绿帘石、钾长石等, 含有少量方解石、石英和绿泥石等。根据矿石和矿物共生关系, 将智博铁矿床划分为岩浆期和热液期 2 个成矿期次。岩浆期可划分为钠长石-透辉石阶段和磁铁矿-阳起石阶段, 热液期可划分为钾长石-绿帘石阶段和石英-硫化物阶段。根据智博磁铁矿的电子探针数据, 各类磁铁矿矿石中除热液期含黄铁矿致密块状矿石 $w(\text{FeO}_T)$ 变化较大外, 其他类型磁铁矿的 $w(\text{FeO}_T)$ 多集中在 90%~95%, 又以岩浆期块状矿石中 $w(\text{FeO}_T)$ 最高。对其氧化物进行相应的图解, 电子探针数据中 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{MnO})$ 、 $w(\text{K}_2\text{O})$ 、 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{SiO}_2)$ 都和 $w(\text{FeO}_T)$ 有良好的负相关性, 而 NiO 和 TiO_2 则具有一定的正相关性, V_2O_5 则在岩浆期块状和含磁铁矿脉矿石中含量明显高于其他类型矿石。根据磁铁矿 TiO_2 - Al_2O_3 - MgO 成因图解和 $w(\text{Ca}+\text{Al}+\text{Mn})$ - $w(\text{Ti}+\text{V})$ 成因图解显示, 智博铁矿床矿石兼具岩浆型成因特征和热液型成因特征, 表明智博铁矿床的形成与岩浆作用和火山热液交代作用有关。

关键词 地球化学; 磁铁矿; 电子探针; 智博铁矿床

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Magnetite composition of Zhibo iron deposit in western Tianshan mountains of Xinjiang and its mineralization mechanism significance

WU Yang^{1,2,3}, SHEN Ping^{1,2,3}, PAN HongDi⁴, LI ChangHao^{1,2,3}, FENG HaoXuan^{1,2,3}, LI WenGuang^{1,2} and XIE RiShi⁵

(1 Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2 College of Earth and Planetary Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4 College of Earth Sciences, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5 No. 3 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract

Located in the eastern section of the eastern Awulale metallogenic belt in the Western Tianshan Mountains, the Zhibo iron ore deposit is hosted in andesite, basaltic andesite and pyroclastic rocks of the Lower Carboniferous.

* 本文得到国家重点研发计划项目(编号:2018YFC0604004)资助

第一作者简介 武 阳,男,1993 年生,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:wuyangcz@163.com

** 通讯作者 申 萍,女,1964 年生,研究员,主要从事金属矿床成矿作用研究。Email:pshen@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期 2020-03-09;改回日期 2021-05-11。秦思婷编辑。

rous Dahalajunshan Formation. The western, middle and eastern ore districts make up the Zhibo iron deposit, among which the eastern ore district is the main ore district, in which the orebodies occur in layered, plate-like or lenticular forms. In addition to the magnetite as the mainly metallic mineral, there exists a little pyrite, hematite and chalcopyrite. The ore structure can be divided mainly into six types, i. e., massive, disseminated, brecciform, banded, striated and vein ores, of which massive and disseminated ores are in the majority, meanwhile, the ore textures include anhedral-subhedral, plate and sideronitic forms. The altered minerals in the Zhibo iron deposit mainly include diopside, albite, actinote, epidote and potassium feldspar, with a small amount of calcite, quartz and chlorite. According to the association relationship between ores and minerals, the Zhibo iron deposit can be divided into two metallogenic periods, namely magmatic period and hydrothermal period. There are sodium feldspar-diopside stage and magnetite-actinote stage of the magmatic period, while K-feldspar-epidote stage and quartz-sulfide stage comprise the hydrothermal period. Based on the electron microprobe analyses of Zhibo magnetite, it is shown that, except for the late pyrite containing massive block ore (FeO_T), the other kinds of magnetite ores have the concentration of FeO_T of other types of magnetite ores in the range of 90%~95%, with the early massive ore (FeO_T) being the highest. In the light of the corresponding diagram of its oxides, all the data on the whole show that the values of CaO , Al_2O_3 , MnO , K_2O , MgO and SiO_2 have a good negative correlation with FeO_T , while NiO and TiO_2 show the opposite, and it is obvious that the values of V_2O_5 in the initial block and magnetite-bearing vein ores are significantly higher than those in other types of ores. In terms of the genetic diagram of magnetite $w(\text{TiO}_2)$ - $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ - $w(\text{MgO})$ and the genetic diagram of $w(\text{Ca}+\text{Al}+\text{Mn})$ - $w(\text{Ti}+\text{V})$, the early ore of the Zhibo iron deposit has magmatic genetic characteristics, while the later ore has hydrothermal genetic characteristics, indicating that the formation of the Zhibo iron deposit is related to magmatism and volcanic hydrothermal metasomatism.

Key words: geochemistry, magnetite, EMPA, Zhibo iron deposit

近年来在新疆西天山东段阿吾拉勒成矿带陆续发现了以智博、查岗诺尔、备战和敦德等为代表的大型铁矿床和以式可布台、松湖和尼新塔格为代表中型铁矿床,累计探求铁矿石资源量约10亿t,并且该成矿带富铁矿储量巨大,大大提高了中国富铁矿资源量(董连慧等,2010)。因此,阿吾拉勒成矿带已然成为新疆铁矿床勘查和研究的重点地区,引起国内外学者的广泛关注。同时,该成矿带内铁矿多与晚古生代海相火山岩-次火山岩有成因联系,并受后期热液改造的影响,前人对于区域内含矿火山岩的地球化学研究结果显示此类矿床多形成于大陆弧边缘(Duan et al., 2014; Wang et al., 2018),又将阿吾拉勒铁矿带中产于石炭纪火山岩中的铁矿床统称为海相火山岩型铁矿,但对于铁矿床成因存在较大分歧。以本文研究的智博铁矿床为例,前人通过对该矿床的地质特征、矿石结构构造、岩石地球化学、年代学和S、O、Pb、Fe同位素等研究,认为智博铁矿床主要为火山热液型(田敬全等,2009;李凤鸣,2013)和岩浆-热液型(冯金星等,2010;蒋宗胜等,2012;王志华等,2018a; 2018b; Jiang et al., 2014; Zhang et al., 2012; Günther et al., 2017)2类矿床成因类型。本文

基于前人研究基础,针对智博铁矿床存在的成因争议,通过开展矿床地质研究、系统的矿相学研究以及矿石矿物磁铁矿电子探针分析等,初步探讨智博铁矿床的矿床成因。

1 区域地质背景

西天山属于中亚成矿域的重要组成部分(图1a),北部与准噶尔板块以依连哈比尕断裂为界,南部与塔里木板块以长阿吾子-乌瓦门断裂为界(Allen et al., 1993; Windley et al., 1990; Gao et al. 2009; 高俊等, 2009),自前寒武纪到中生代历经多期次复杂的增生造山过程(高俊等,2009; Windley et al., 2007),近年来研究发现,西天山的形成与早古生代贴尔斯克依洋、北天山洋和南天山洋的演化相关,认为该增生造山结束时间为晚二叠世—中三叠世(Xiao et al., 2009; Wang et al., 2007; Shu et al., 2004; Qian et al., 2009)。

阿吾拉勒成矿带位于伊犁地块东北部(图1b),自西向东依次分布雾岭、查岗诺尔、智博、敦德、备战等铁矿床。区域内构造活动强烈,具有多条总体方向为北西向的断裂构造。区内火山活动强烈,

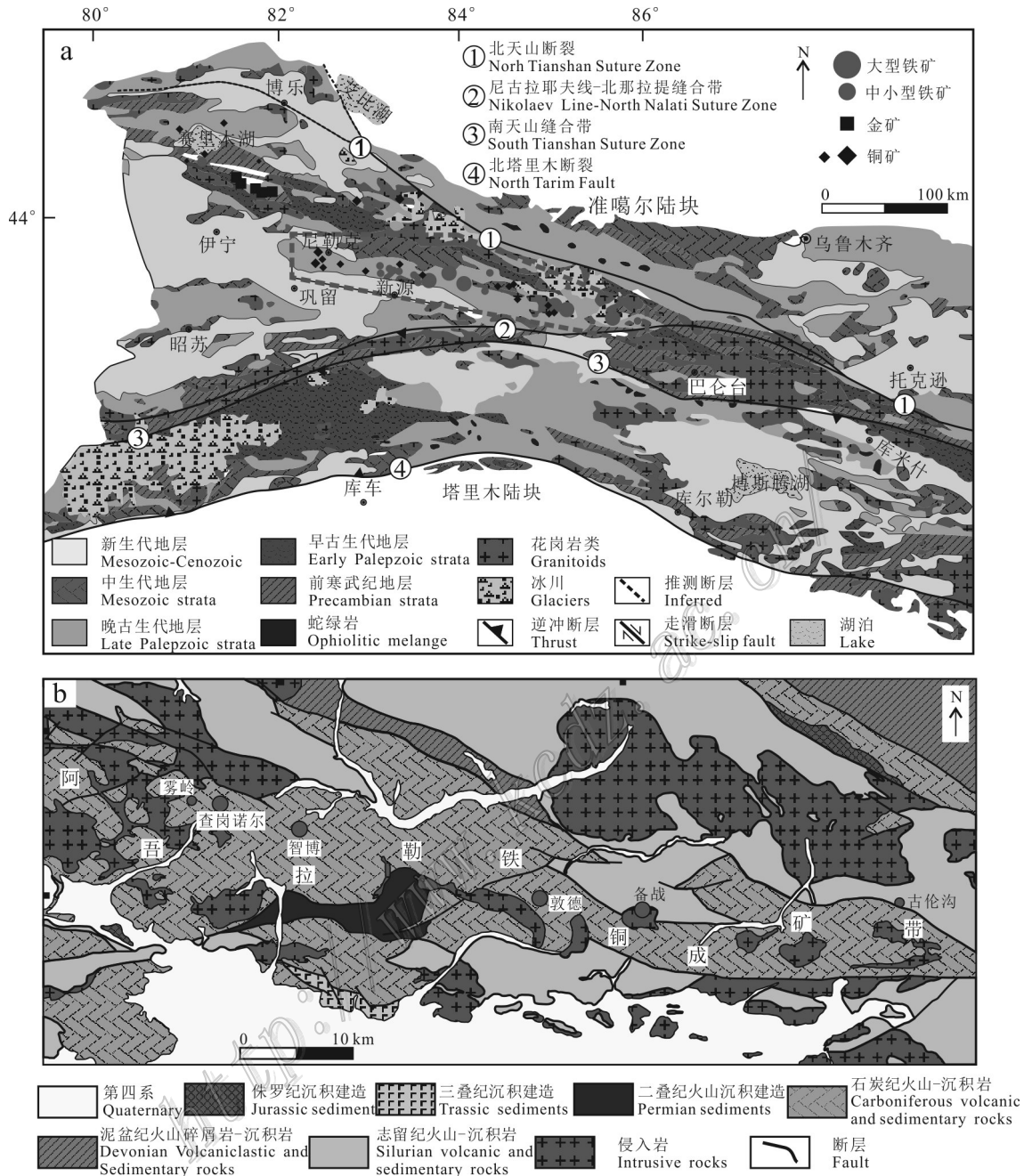


图1 西天山区域地质图(a,据董连慧等,2010)和阿吾拉勒成矿带区域地质(b,据冯金星等,2010)

Fig. 1 Geological map of western Tianshan Mountain (a, after Dong et al., 2010) and geological map of the eastern segment of the Awulale iron metallogenic belt, showing the location of iron deposits (b, after Feng et al., 2010)

少量发生于早古生代,大多发生于晚古生代,自西向东发育有诸多火山机构并对该带铁矿床有一定的控制作用(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993;张喜,2013),其中,自西向东由裂隙式喷发→中心式喷发→侵入岩过渡(李小军,1994)。区内出露的地层齐全,除前寒武纪之外,还有志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系和第四系,其中,以石炭系大

哈拉军山组和伊什基里克组分布最为广泛,是区内主要的赋矿地层(田敬全等,2009)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

智博铁矿床位于阿吾拉勒山东部,在遥感影像

中矿区周围显示明显的环形构造,指示矿区发育环形构造(图2a),遥感影像中可见4个明显圆环,指示火山口至少经历了4次塌陷。区内断裂构造十分发育,东西向断裂带分布于矿区中部,总体走向NW 300°~330°,倾角63°~82°。申萍等(2020)基于此断裂构造特点,结合矿区岩性构建了矿区火山岩岩相图,认为在矿区的东北部存在破火山口。在矿区中发现有火山角砾岩和层状凝灰岩等指示火山作用的岩石(图2b~d)。出露地层主要为石炭纪大哈拉军山组,多被大面积冰川堆积物覆盖。大哈拉军山组底部出露不完全,可分为2个亚组,第二亚组(C₁d^b)早

期为中性含细角砾凝灰岩、晶屑凝灰岩夹中-基性熔岩;晚期以碳酸盐岩沉积为主夹少量火山灰沉积,厚度约11 m;第三亚组(C₁d^c)早期以安山质角砾晶屑凝灰岩、安山质火山凝灰岩、安山岩、凝灰质火山角砾岩夹辉绿玢岩、大理岩为主,晚期以流纹质熔岩、层状流纹质熔结凝灰岩、流纹岩、英安质晶屑凝灰岩为主。

智博矿区东西长4.5 km,包括东、中、西3个矿区,以东矿区为主矿区(图3a、b)。矿体主要赋存于石炭纪大哈拉军山组火山岩和火山碎屑岩中,火山岩岩性可从玄武岩到英安岩,但以安山岩最为发育。

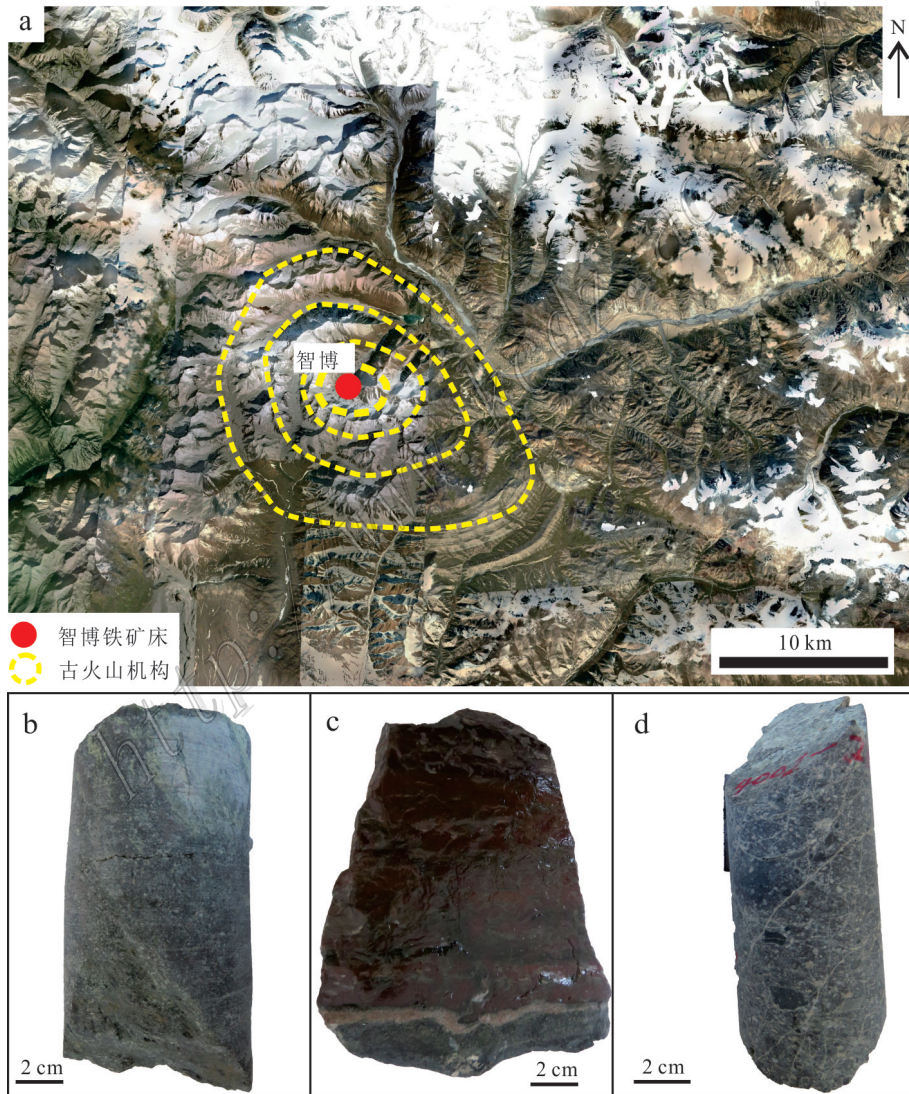


图2 火山机构及火山岩
a. 智博遥感图; b. 火山角砾岩; c. 层状凝灰岩; d. 角砾凝灰岩

Fig. 2 Volcanic structures and volcanic rocks

a. Remote sensing image of the Zhibo iron deposit; b. Volcanic breccia; c. Layered tuffite; d. Tuff breccia

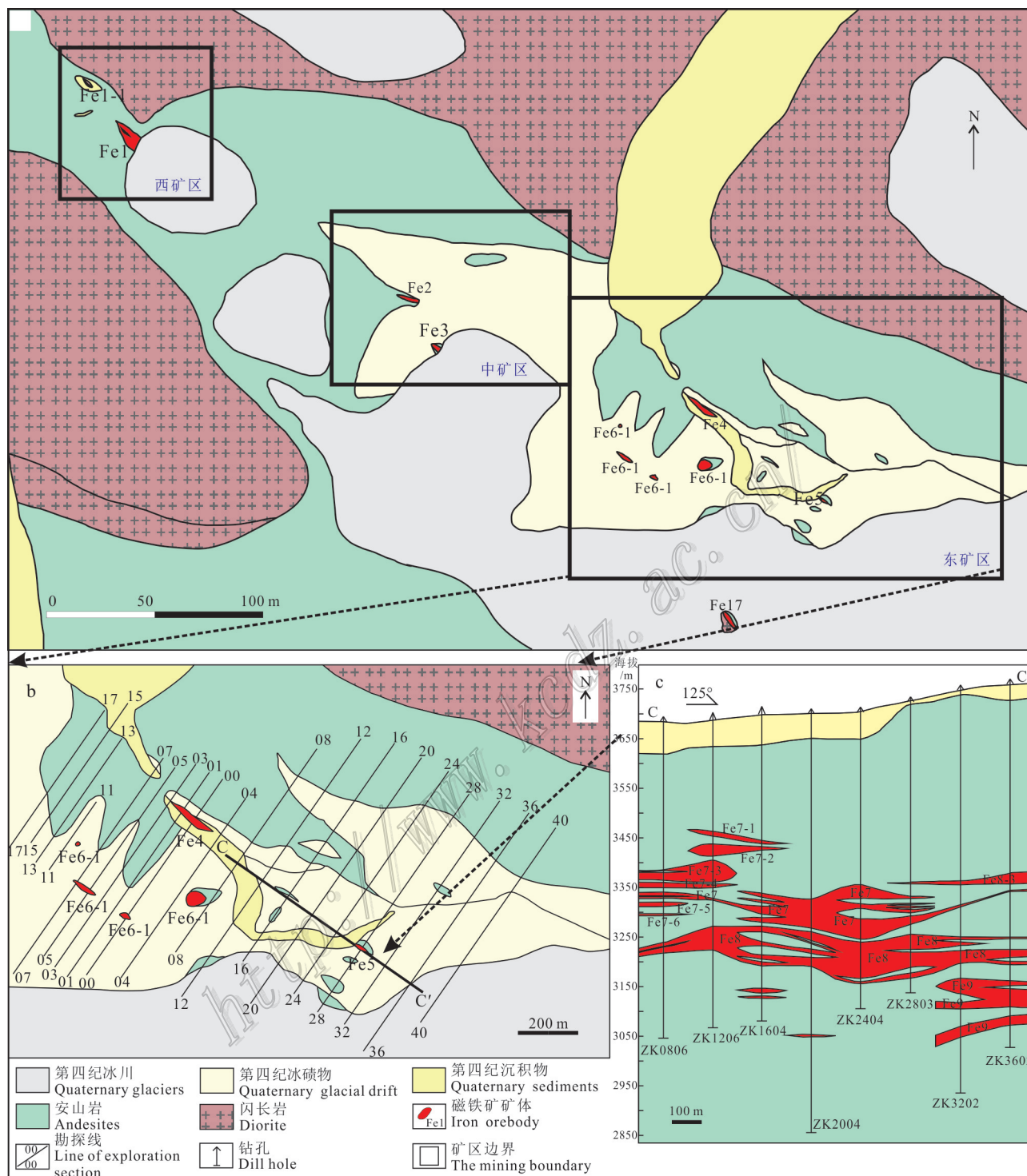


图3 智博矿区地质图(a)、智博矿区东矿段地质图(b)和C-C'线剖面图(c,据新疆地质矿产勘查开发局第三地质大队,2013修改)

Fig. 3 Geological map of the Zhibo iron deposit (a), east ore block of the Zhibo iron deposit (b) and simplified geological sections along C-C' line of the Zhibo iron ore district (c, modified after No. 3 Geological Party of Xinjiang, 2013)

矿体顶底板围岩均为玄武质安山岩,矿体形态多为似层状、厚板状或透镜状(图3c),与围岩呈不整合接触关系。Fe7矿体位于东矿段08~28勘探线,呈似层

状、厚板状,倾角为0°~14°。Fe7矿体最小厚度为2.00 m,最大厚度为85.10 m,矿体平均厚度35.88 m,矿石最高品位68.01%,最低品位20.07%,平均品位

为49.53%。Fe8矿体位于东矿段08~40勘查线,为隐伏矿体,呈似层状、厚板状,倾角0°~16.5°。Fe8矿体最小厚度为2.17 m,最大厚度为182.24 m,矿体平均厚度57.83 m。矿石最高品位68.20%,最低品位20.07%,平均品位为51.65%。

2.2 矿石特征

智博铁矿床矿石矿物以磁铁矿为主,含有黄铁矿、黄铜矿和赤铁矿,脉石矿物有透辉石、钠长石、角闪石、斜长石、钾长石、绿帘石、阳起石、方解石和石英等。

智博铁矿床成因较为复杂,按照矿石构造分类,可分为致密块状、浸染状、角砾状、流纹状以及条带状矿石等。根据其成矿期次又可分为岩浆期矿石和热液期矿石,岩浆期矿石以致密块状、浸染状和角砾状矿石为主,热液期矿石则以浸染状、纹层状和块状矿石为主。下面按照类型对矿石进行描述:

致密块状磁铁矿矿石:主要产于矿体下部,矿石为黑色,密度较大,部分矿石可见与围岩的截然界限(图4a、d),平均品位较高;镜下磁铁矿为钢灰色,呈他形-半自形结构,含量约85%,可见少量他形-半自

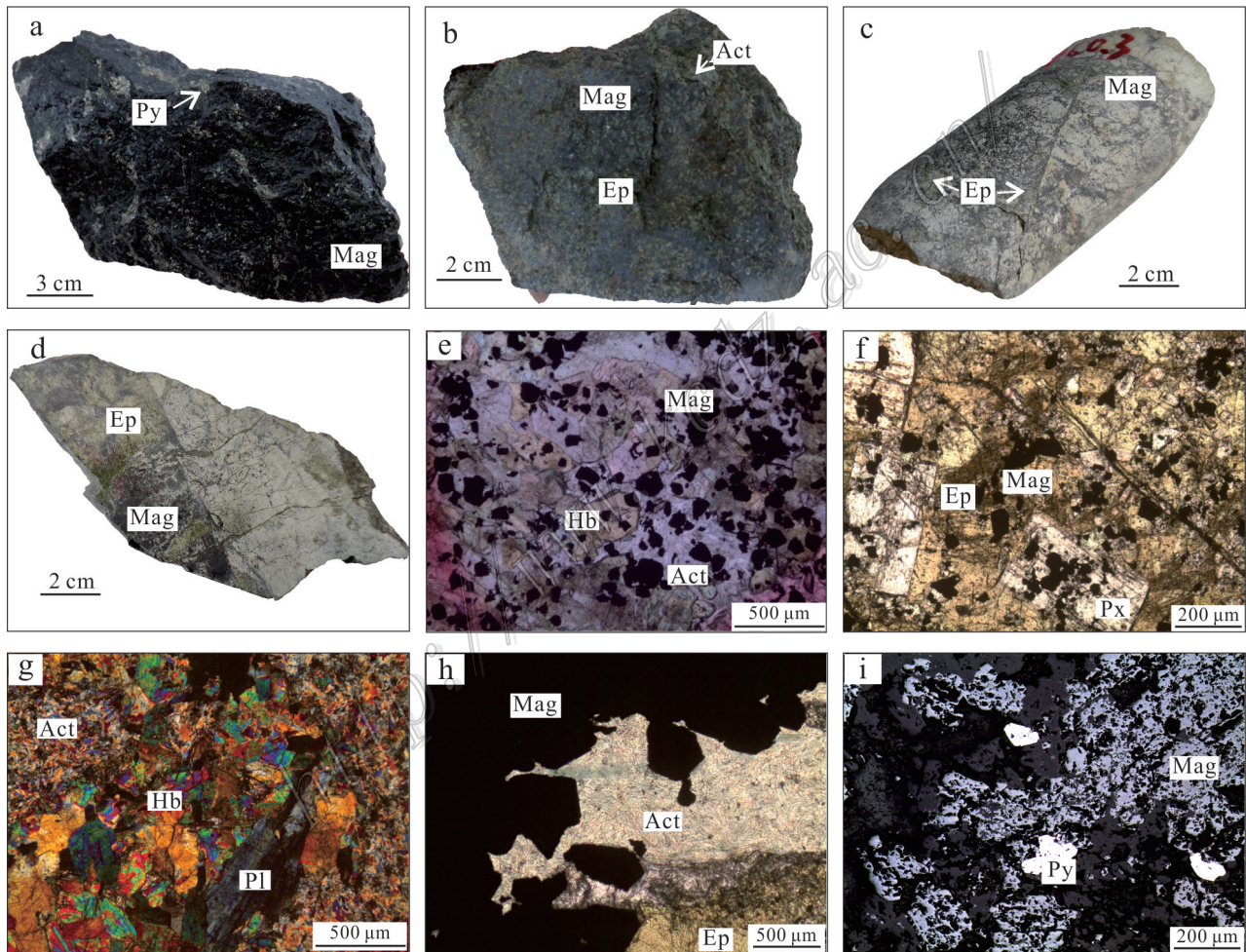


图4 智博铁矿岩浆期矿石特征

- a. 块状矿石; b. 浸染状矿石; c. 角砾状矿石; d. 块状磁铁矿与围岩界线截然; e. 柱状角闪石和放射状阳起石(单偏光); f. 磁铁矿与辉石共生(单偏光); g. 围岩中角闪石、长石和阳起石(单偏光); h. 磁铁矿与阳起石、绿帘石共生(单偏光); i. 磁铁矿与黄铁矿共生(反射光)
- Mag—磁铁矿; Py—黄铁矿; Act—阳起石; Ep—绿帘石; Pl—斜长石; Px—辉石; Qz—石英; Hb—角闪石

Fig. 4 Characteristics of magmatic ores from the Zhibo iron deposit

- a. Massive ores; b. Disseminated ores; c. Brecciated ores; d. Clear boundary between massive ores and wall rock; e. Columnar hornblende and radiant actinolite (plainlight); f. Magnetite associated with pyroxene (plainlight); g. Hornblende and plagioclase and actinolite in wall rock (plainlight); h. Magnetite associated with actinolite and epidote (plainlight); i. Magnetite associated with pyrite (reflective light)
- Mag—Magnetite; Py—Pyrite; Act—Actinolite; Ep—Epidote; Pl—Plagioclase; Px—Pyroxene; Qz—Quartz; Hb—Hornblende

形黄铁矿(图4i),同时在其晶隙中有零星分布黄铜矿,并可见少量硅酸盐矿物或绿帘石。

浸染状磁铁矿石:矿区内以此类矿石类型为主,根据其磁铁矿含量的变化可将其分稠密浸染状矿石和稀疏浸染状矿石(图4b)。磁铁矿呈钢灰色,呈他形-半自形结构,磁铁矿含量变化较大,可见部分呈柱状的单斜辉石以及斜长石分布于磁铁矿之间(图4f、g),并可见少量石英。矿石多具有阳起石化和轻微绿帘石化(图4e、h)。

角砾状磁铁矿石:此类型矿石多位于矿体上部,矿石含有大量火山角砾(图4c),火山角砾呈灰绿色,磁铁矿为胶结物充填于火山角砾空隙中,角砾粒径不均匀,粒径变化由毫米级到厘米级不等。磁铁矿多为他形-半自形结构。同时含有少量黄铁矿和零星分布的黄铜矿。

热液期矿石较岩浆期矿石具有更为完好和粗大的矿物晶形,除岩浆期矿石结构外还具有纹层状、条带状等结构特征。

致密块状磁铁矿石(图5a、b、e):磁铁矿呈钢灰色,颗粒较岩浆期块状矿石具有更好晶形和更为粗大的粒径,同时,此类型发育有团块状和脉状黄铁矿。黄铁矿含量明显上升,多为半自形-自形结构,在其晶体内部黄铜矿与其共生(图5i)。可见绿帘石脉穿插矿石。

条带(流纹)状磁铁矿石:手标本中磁铁矿与绿帘石和钾长石成互层产出(图5c),镜下也可见与黄铁矿成互层产出(图5k)。流纹状磁铁矿具有明显的流动状构造(图5d)。

树枝状磁铁矿:磁铁矿为半自形-自形板条状,并穿切早期黄铁矿(图5g)。

2.3 围岩蚀变

矿区遭受强烈的蚀变,主要蚀变类型有阳起石化、绿帘石化、钾长石化、绿泥石化、碳酸盐化等。

阳起石化(图4g、h):阳起石呈放射状分布,多见于岩浆期矿石和围岩中。

绿帘石化(图4d、5e):矿区广泛发育的蚀变类型,具有多阶段,多期的特点,并与磁铁矿具有密切的接触关系,绿帘石多为团块状、浸染状、条带状,与矿石具有密切的接触关系。

钾长石化(图5e、f):稍晚于绿帘石化,呈浸染状、条带状、团块状分布,多与绿帘石共同分布于矿体与围岩接触带中。

绿泥石化(图5j、l):属于晚阶段蚀变,在矿石与

围岩接触带夹石中均有分布,且形态不规则。

碳酸盐化(图5f、l):碳酸盐脉穿插早期形成的绿帘石脉以及钾长石脉,多沿裂隙发育,在此蚀变中磁铁矿发育较少。

综上所述,根据矿石结构构造、矿石组成成分以及矿物穿插关系,可将其分为2个成矿期,3个成矿阶段(图6),即岩浆成矿期和热液成矿期。其中,① 岩浆成矿期:岩浆期前期为磁铁矿-辉石-钠长石阶段,磁铁矿多以块状、角砾状(磁铁矿为胶结物)和浸染状为主,此阶段形成的辉石、钠长石等矿物被后期蚀变所覆盖因而范围较小,磁铁矿以他形-半自形结构为主,可见部分海绵陨铁结构,并伴有少量的黄铁矿、黄铜矿等,此阶段形成的黄铁矿以他形-半自形为主,并且矿物颗粒较小,黄铜矿则以他形为主;在岩浆期后期出现阳起石(-黄铁矿-黄铜矿)等组合;② 热液成矿期:热液期前期以绿帘石-钾长石-黄铁矿等矿物组合为主,广泛发育绿帘石化和钾长石化蚀变,此阶段以角砾状、条带状和浸染状矿石为主,黄铁矿含量明显升高。角砾状矿石中角砾为磁铁矿,被绿帘石化和钾长石化蚀变围岩所胶结,磁铁矿多为他形-半自形产出,并可见半自形-自形黄铁矿;条带状则出现磁铁矿-绿帘石化-钾长石化-(绿帘石)互层产出,在此类矿石中磁铁矿出现半自形-自形板状特征,并且在此类型中黄铁矿多出现在条带交界处;浸染状矿石中,磁铁矿以他形-半自形构造为主,同时存在零星黄铜矿。热液期后期以石英-碳酸盐矿物组合为主,手标本可见方解石脉和石英脉穿插早期矿物和岩石,在石英脉中可见少量黄铁矿,镜下观察可见少量磁黄铁矿,和交代磁铁矿的粗粒黄铁矿及方解石和绿泥石等脉石矿物。

3 样品及测试结果

本次实验样品选取7种不同的矿石类型,分别为岩浆期块状(不含黄铁矿团块)磁铁矿和位于矿体中部浸染状矿石(矿体中部),热液成矿阶段的细脉磁铁矿矿石、流纹状矿石、树枝状矿石、含团矿状黄铁矿的块状矿石和在矿体边部与围岩接触的浸染状矿石。

本次电子探针实验在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针与电镜实验室完成,使用仪器为JXA8100和CAMECA SX51,工作电压为15 kV,电

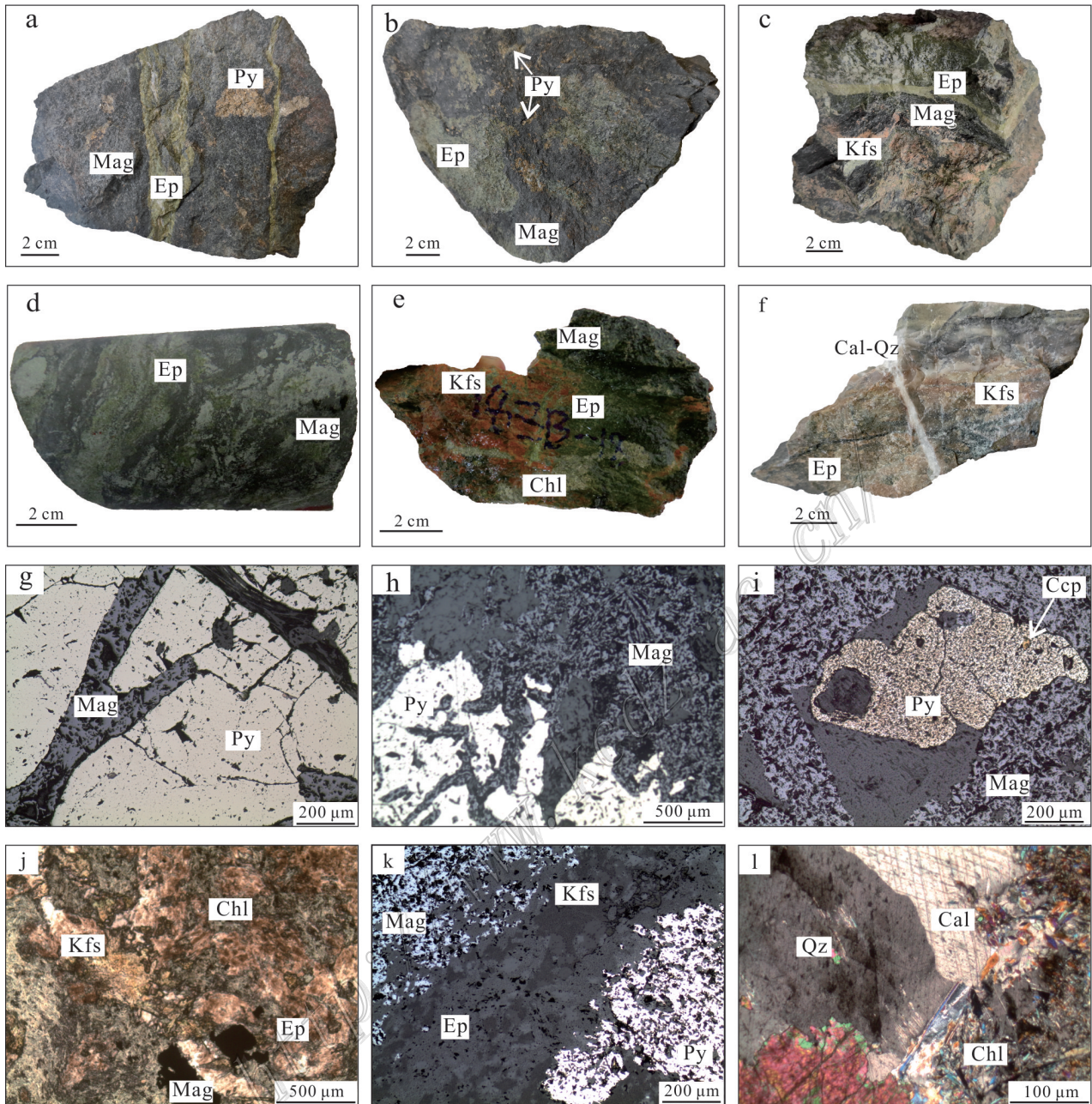


图5 智博铁矿热液期矿石特征

a. 含黄铁矿团块致密块状矿石; b. 绿帘石化角砾状矿石; c. 条带状矿石, 钾长石、绿帘石和磁铁矿呈条带分布; d. 流纹状磁铁矿矿石; e. 钾长石化和绿帘石化矿石; f. 后期碳酸盐和石英脉穿切早期钾长石、绿帘石蚀变; g. 板条状磁铁矿穿切黄铁矿(反射光); h. 细粒他形磁铁矿与粗粒黄铁矿共生(反射光); i. 磁铁矿与黄铁矿共生(反射光), 黄铁矿中含他形黄铜矿(反射光); j. 磁铁矿与绿帘石、钾长石、绿泥石共生(单偏光); k. 条带状矿石中, 磁铁矿、钾长石、绿帘石和黄铁矿呈条带分布; l. 后期碳酸盐矿物、石英和绿泥石共生(正交偏光)

Mag—磁铁矿; Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Act—阳起石; Ep—绿帘石; Chl—绿泥石; Qz—石英; Cal—方解石

Fig. 5 Characteristics of hydrothermal ores from the Zhibo iron deposit

a. Lumpy pyrite in dense massive ores; b. Brecciated ores associated with epidotization; c. Banded magnetite ores with veins filled with mainly K-feldspar and epidote; d. Magnetite ore with flow structure; e. Ores with potash feldspathization and epidotization; f. Later carbonate and quartz veins penetrating early K-feldspar and epidote; g. Plate magnetite penetrate pyrite (reflective light); h. Fine-grained magnetite associated with coarse-grained pyrite (reflective light); i. Magnetite associated with pyrite containing anhedral chalcopyrite (reflective light); j. Magnetite associated with epidote and K-feldspar and chlorite (under plainlight); k. Banded magnetite ore with veins filled with K-feldspar, epidote and pyrite; l. Later carbonate associated with quartz and chlorite (crossed nicols)

Mag—Magnetite; Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite; Act—Actinolite; Ep—Epidote; Chl—Chlorite; Qz—Quartz; Cal—Calcite

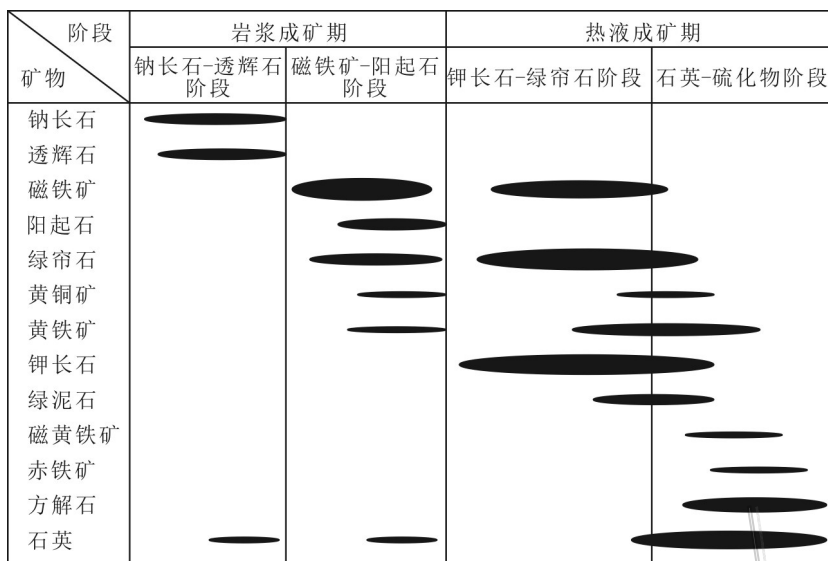


图6 智博铁矿床成矿期次及矿物生成顺序表(据 Jiang et al., 2014; 张喜, 2013 修改)

Fig. 6 Paragenetic sequence of mineralization and ore-forming stages of the Zhibo iron deposit (modified after Jiang et al., 2014; Zhang, 2013)

流 20 nA, 束斑大小为 2~5 μm , 以天然样品和人工合成氧化物为标准样品, 分析精确度优于 2.0%。选取 ZK3602、ZK0203 和 3580 平台的样品, 共计电子探针点位 81 个。具体样品编号、类型及各元素实验数据见于表 1。智博铁矿床样品中 $w(\text{FeO}_T)$ 为 86.739%~94.529%, 平均 92.228%; $w(\text{SiO}_2)$ 为 0.001%~3.997%, 平均 0.713%; $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 0~0.177%, 平均 0.035%, 中位数为 0.014%, 样品含量多低于检测下限; $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 0~0.265%, 平均 0.031%, 中位数为 0.008%, 样品含量多低于检测下限; $w(\text{MgO})$ 为 0~0.873%, 平均 0.116%, 中位数为 0.056%; $w(\text{MnO})$ 为 0.012%~0.173%, 平均 0.074%, 中位数为 0.074%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 0~1.291%, 平均 0.136%, 中位数为 0.052%; $w(\text{CaO})$ 为 0.007%~1.236%, 平均 0.205%, 中位数为 0.094%; $w(\text{TiO}_2)$ 为 0~0.362%, 平均 0.039%, 中位数为 0.021%; $w(\text{V}_2\text{O}_5)$ 为 0~0.721%, 平均 0.237%, 中位数为 0.091%; $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 为 0~0.226%, 平均 0.059%, 中位数为 0.055%; $w(\text{NiO})$ 为 0~0.192%, 平均 0.028%, 中位数为 0.013%, 样品含量多低于检测下限。

根据智博磁铁矿的电子探针数据, 各类磁铁矿矿石中除后期含黄铁矿致密块状矿石 $w(\text{FeO}_T)$ 变化较大外, 其他类型磁铁矿中的 $w(\text{FeO}_T)$ 多集中于 90%~95%, 其中, 又以岩浆期块状矿石中 $w(\text{FeO}_T)$ 最高。对其氧化物进行相应的图解, 所有数据整体显示, CaO 、 Al_2O_3 、 MnO 、 K_2O 、 MgO 、 SiO_2 的含量均与

$w(\text{FeO}_T)$ 有良好的负相关性, 而 NiO 和 TiO_2 则具有一定的正相关性, V_2O_5 则在岩浆期块状和含磁铁矿脉矿石中含量明显高于其他类型矿石(图 8)。

4 讨论

4.1 磁铁矿成因

磁铁矿具有反尖晶石型结构, 化学通式为 AB_2O_4 , A 代表二价阳离子, 如 Fe^{2+} 、 Ni 、 Mn 、 Co 或 Zn , B 代表三价阳离子, 如 Fe^{3+} 、 Al 、 Cr 、 V 、 Mn 或 Ga 。因此不同的生成环境, 可与不同的元素发生类质同象替换, 进而可以指示磁铁矿的成矿环境。如温度和压力的变化会使磁铁矿中 Ti 含量变化(Turner et al., 2008)。较低的氧逸度条件下易发生金属元素的类质同象替换, 如 Mg 、 Mn 、 Zn 、 Ni 可与 Fe^{2+} 发生替换(Andersen, 1988), 而 Al 、 V 、 Cr 则与 Fe^{3+} 发生替换(Barnes et al., 2001; Righter et al., 2006)。因此, 前人总结岩浆成因磁铁矿成分主要受以下条件控制, ① 全岩、岩浆或流体成分; ② 温度; ③ 压力; ④ 冷却速率; ⑤ 氧逸度; ⑥ 硫逸度; ⑦ SiO_2 活性(Dare et al., 2012; Whalen et al., 1988; Frost, 1991; Ghiorso et al., 1991)。 $w(\text{FeO}_T)$ 与 $w(\text{SiO}_2)$ 具有明显的负相关关系, 指示酸性环境不利于磁铁矿的形成。碱性-超基型岩中的岩浆磁铁矿富集 V 、 Co 、 Mn 等元素, 酸性岩中的岩浆磁铁矿相对富集 Al 、 Cr (Nadoll et al.,

表1 智博铁矿床磁铁矿电子探针成分分析(w(B)/%)

Table 1 Electron probe composition analysis of magnetite of Zhibo iron deposit (w(B)/%)

样号	类型	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	FeO _T	K ₂ O	SiO ₂	NiO	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₃	总和
18ZB53-2-1-1	岩浆期块状矿石	0.057	0.069	0	0.075	0.032	92.95	0.01	0.396	0.05	0.036	0.008	0.721	94.404
18ZB53-2-1-2	岩浆期块状矿石	0.047	0.06	0	0.017	0.066	92.479	0	0.355	0.022	0.005	0.002	0.706	93.759
18ZB53-2-2-1	岩浆期块状矿石	0.01	0	0	0.067	0.04	93.879	0	0.037	0.099	0.057	0.007	0.704	94.9
18ZB53-2-2-2	岩浆期块状矿石	0	0.035	0	0.082	0.008	93.558	0.003	0.148	0.057	0.072	0.021	0.665	94.649
18ZB53-2-3-1	岩浆期块状矿石	0	0.087	0.049	0.094	0.022	93.164	0	0.251	0.004	0.026	0.028	0.691	94.416
18ZB53-2-3-2	岩浆期块状矿石	0.011	0.034	0	0.12	0.038	92.931	0	0.596	0.019	0.087	0.008	0.677	94.521
18ZB-45-1-1	岩浆期块状矿石	0.028	0.08	0.038	0.051	0.006	93.965	0.008	0.017	0.071	0.017	0	0.46	94.741
18ZB-45-1-2	岩浆期块状矿石	0.102	0.042	0.022	0.064	0	93.049	0	0.471	0	0.026	0.054	0.384	94.214
18ZB-45-2-1	岩浆期块状矿石	0	0.061	0	0.074	0.02	93.301	0	0.041	0.073	0.043	0.021	0.395	94.029
18ZB-45-2-2	岩浆期块状矿石	0	0.022	0.042	0.111	0.022	93.212	0.001	0.341	0.034	0.055	0.061	0.498	94.399
18ZB-45-3-1	岩浆期块状矿石	0.061	0.04	0.001	0.066	0.061	92.832	0	0.07	0.007	0.032	0.118	0.338	93.626
18ZB-45-3-2	岩浆期块状矿石	0.045	0.052	0.084	0.064	0.067	92.197	0.01	0.676	0.051	0.061	0.014	0.385	93.706
ZK0203-87.5-1	含磁铁矿细脉矿石	0	0.057	0.245	0.059	0.198	91.452	0	0.635	0.113	0.264	0	0.249	93.272
ZK0203-87.5-2	含磁铁矿细脉矿石	0.048	0.055	0.127	0.055	0.004	91.761	0.006	0.488	0.06	0.258	0.007	0.277	93.146
ZK0203-87.5-3-2	含磁铁矿细脉矿石	0	0.052	0.067	0.13	0.014	92.708	0.008	0.746	0.111	0.328	0	0.238	94.402
18ZB-53-1-1-1	含磁铁矿细脉矿石	0	0.064	0.087	0.05	0.083	92.206	0.004	0.595	0.031	0.101	0.044	0.627	93.892
18ZB-53-1-1-2	含磁铁矿细脉矿石	0	0.038	0.089	0.088	0.037	92.97	0	0.303	0.013	0.105	0.004	0.601	94.248
18ZB-53-1-1-3	含磁铁矿细脉矿石	0	0.004	0.089	0.06	0.086	91.597	0.002	0.795	0.013	0.376	0	0.611	93.633
18ZB-53-1-2-1	含磁铁矿细脉矿石	0	0.027	0.045	0.019	0.056	92.531	0	0.21	0	0.093	0.011	0.474	93.466
18ZB-53-1-2-2	含磁铁矿细脉矿石	0	0.032	0.031	0.023	0.032	91.977	0.018	0.323	0.002	0.094	0	0.535	93.067
18ZB-53-1-3-1	含磁铁矿细脉矿石	0.092	0.052	0.09	0.043	0.1	91.009	0.013	0.775	0	0.499	0	0.531	93.204
18ZB-53-1-3-2	含磁铁矿细脉矿石	0.075	0.032	0.086	0.092	0.022	92.514	0.015	0.446	0.017	0.198	0.031	0.624	94.152
18ZB-53-1-3-8	含磁铁矿细脉矿石	0	0.059	0.056	0.063	0.197	90.985	0	0.912	0	0.444	0.058	0.6	93.374
18ZB-53-1-4-5	含磁铁矿细脉矿石	0	0.019	0.022	0.013	0.089	92.888	0	0.097	0	0.085	0	0.647	93.86
18ZB-53-1-4-6	含磁铁矿细脉矿石	0	0.051	0.085	0.058	0.06	92.016	0	0.351	0.039	0.282	0.009	0.626	93.577
18ZB40-1-1	浸染状矿石(中部)	0	0.068	0.101	0.039	0.096	92.895	0.004	0.768	0.009	0.084	0.078	0.461	94.603
18ZB40-1-2	浸染状矿石(中部)	0.054	0.091	0.226	0.015	0.098	91.713	0.017	1.277	0.068	0.33	0	0.494	94.383
18ZB40-1-3	浸染状矿石(中部)	0.027	0.027	0.088	0.12	0.126	91.18	0	0.863	0.081	0.192	0.054	0.46	93.218
18ZB40-2-1	浸染状矿石(中部)	0.023	0.034	0.064	0.051	0.042	92.527	0.003	0.526	0.091	0.063	0.02	0.443	93.887
18ZB40-2-2	浸染状矿石(中部)	0.031	0.105	0	0.084	0.052	93.169	0.026	0.313	0.139	0	0	0.424	94.343
18ZB40-2-3	浸染状矿石(中部)	0	0.059	0.11	0.073	0	92.395	0	0.577	0.08	0.259	0	0.422	93.975
18ZB40-2-4	浸染状矿石(中部)	0.086	0.092	0.028	0.081	0.075	93.417	0.002	0.331	0	0.083	0.025	0.405	94.625
18ZB40-3-1	浸染状矿石(中部)	0.029	0.013	0.166	0.025	0	92.108	0.014	0.587	0.047	0.254	0.027	0.295	93.565
18ZB40-3-2	浸染状矿石(中部)	0	0.034	0.071	0.04	0.053	92.518	0.036	0.638	0.06	0.176	0.017	0.309	93.952
18ZB40-3-3	浸染状矿石(中部)	0.032	0.005	0.016	0.048	0.069	92.83	0.016	0.387	0.192	0.14	0.054	0.408	94.197
ZK3602-631-1-1	浸染状矿石(中部)	0.043	0.059	0.042	0.12	0.029	93.355	0.032	0.022	0.076	0.063	0.054	0	93.895
ZK3602-631-1-2	浸染状矿石(中部)	0.039	0.03	0.054	0.077	0.08	93.029	0.018	0.157	0	0.277	0	0	93.761
ZK3602-631-2-1	浸染状矿石(中部)	0	0.027	0	0.066	0.032	94.529	0.005	0.01	0	0.017	0	0.002	94.688
ZK3602-631-2-2	浸染状矿石(中部)	0.177	0.068	0.677	0.173	0.86	87.118	0.213	3.997	0	1.236	0.362	0	94.881
ZK3602-631-3-1	浸染状矿石(中部)	0.057	0.055	0	0.1	0.042	93.479	0	0.067	0	0.07	0.087	0.002	93.959

续表 1

Continued Table 1

样号	类型	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	FeO _T	K ₂ O	SiO ₂	NiO	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₃	总和
ZK3602-631-3-2	浸染状矿石(中部)	0.142	0.047	0.314	0.083	0.258	90.463	0.057	2.074	0.008	0.553	0.08	0.03	94.109
ZK3602-394-11-1	流纹状矿石	0.043	0.093	0	0.086	0.012	92.664	0.007	0.461	0	0.085	0	0.038	93.489
ZK3602-394-11-2	流纹状矿石	0	0.082	0.116	0.07	0.017	92.393	0	0.527	0.003	0.221	0	0.039	93.468
ZK3602-394-11-3	流纹状矿石	0	0.036	0.064	0.046	0.002	93.599	0	0.146	0.038	0.059	0.021	0.055	94.066
ZK3602-394-11-4	流纹状矿石	0	0.107	0.02	0.048	0.024	93.391	0.023	0.211	0	0.027	0	0.044	93.895
ZK3602-394-11-5	流纹状矿石	0	0.06	0.016	0.134	0.047	92.898	0	0.151	0.031	0.083	0.008	0.019	93.447
ZK3602-394-11-6	流纹状矿石	0.007	0.106	0.207	0.086	0.23	90.924	0	0.52	0.02	0.156	0.039	0.039	92.334
ZK3602-394-11-7	流纹状矿石	0.014	0.047	0.437	0.078	0.05	90.494	0	1.159	0.014	0.633	0	0.025	92.951
ZK3602-394-11-8	流纹状矿石	0	0.226	0.144	0.091	0.022	91.8	0	0.354	0.004	0.23	0	0.002	92.873
ZK3602-394-2-1	流纹状矿石	0.054	0.094	0.117	0.073	0.101	92.317	0.03	0.432	0	0.23	0.022	0.009	93.479
ZK3602-394-2-2	流纹状矿石	0.007	0.08	0.047	0.082	0.025	92.891	0	0.318	0	0.135	0	0.053	93.638
ZK3602-394-3-1	流纹状矿石	0	0.047	0	0.012	0.072	92.905	0.038	0.253	0	0.048	0.016	0.032	93.423
ZK3602-394-3-2	流纹状矿石	0	0.084	0.004	0.083	0.059	93.175	0	0.238	0	0.035	0.04	0.062	93.78
ZK3602-394-3-3	流纹状矿石	0.006	0.088	0.072	0.032	0	92.989	0.008	0.156	0	0.091	0	0.036	93.478
ZK3602-394-4-1	流纹状矿石	0.005	0.147	0	0.075	0	92.648	0.01	0.073	0	0.296	0.021	0.04	93.315
ZK3602-394-4-2	流纹状矿石	0.065	0.107	0.093	0.041	0.119	91.16	0	1.257	0.01	0.463	0.33	0.032	93.677
ZK3602-394-4-3	流纹状矿石	0.078	0.085	0.025	0.026	0.086	93.368	0.012	0.358	0	0.085	0.052	0.048	94.223
ZK3602-379.5-1-1	浸染状矿石(边部)	0.138	0.046	0.124	0.132	0.511	91.514	0.071	1.107	0.019	0.205	0.206	0.093	94.166
ZK3602-379.5-1-2	浸染状矿石(边部)	0.066	0.054	0.115	0.118	0.174	91.314	0.022	0.787	0.01	0.213	0.073	0.087	93.033
ZK3602-379.5-1-3	浸染状矿石(边部)	0.011	0.044	0	0.104	0.036	93.596	0.011	0.374	0.038	0	0	0.1	94.314
ZK3602-379.5-2-1	浸染状矿石(边部)	0.002	0.06	0.084	0.092	0.044	94.02	0	0.216	0.046	0.042	0	0.056	94.662
ZK3602-379.5-2-2	浸染状矿石(边部)	0	0.042	0	0.074	0.01	92.932	0.025	0.099	0	0.028	0.101	0.091	93.402
ZK3602-379.5-3-1	浸染状矿石(边部)	0	0.082	0	0.067	0.029	93.124	0	0.237	0.051	0.027	0.008	0.116	93.741
ZK3602-379.5-3-2	浸染状矿石(边部)	0	0.101	0.008	0.078	0.043	93.09	0	0.165	0.037	0.005	0.057	0.099	93.683
ZK3602-379.5-4-1	浸染状矿石(边部)	0	0.072	0.054	0.084	0.014	94.117	0	0.188	0.037	0.125	0	0.096	94.787
ZK3602-379.5-4-2	浸染状矿石(边部)	0	0.048	0.166	0.082	0.408	91.555	0.057	1.504	0.056	0.401	0.05	0.083	94.41
ZK3602-513-1-1	浸染状矿石(边部)	0.03	0.033	0.001	0.074	0.034	93.46	0.087	0.165	0.007	0	0.022	0.036	93.949
ZK3602-513-1-3	浸染状矿石(边部)	0.105	0.09	0.051	0.108	0.311	91.569	0.213	0.855	0	0.007	0.023	0.033	93.365
ZK3602-381-1-1-1	树枝状矿石	0	0.018	0	0.021	0.02	93.556	0	0.065	0.012	0	0.027	0.072	93.791
ZK3602-381-1-1-2	树枝状矿石	0.071	0.028	0.052	0.059	0.077	93.316	0.025	0.078	0.012	0	0.087	0.07	93.875
ZK3602-381-1-3-1	树枝状矿石	0.063	0.016	0.236	0.158	0.212	92.089	0.02	1.744	0.022	0.409	0.052	0.086	95.107
ZK3602-626-1	含团块黄铁矿致密块状矿石	0	0.091	0	0.056	0.035	93.731	0.015	0.354	0	0.064	0	0.002	94.348
ZK3602-626-2	含团块黄铁矿致密块状矿石	0.026	0.117	0.202	0.052	0.184	92.742	0.067	0.792	0.033	0.197	0.011	0	94.423
ZK3602-626-3	含团块黄铁矿致密块状矿石	0.019	0.085	0.189	0.083	0.107	92.717	0.031	0.807	0	0.27	0.026	0	94.334
ZK3602-626-4	含团块黄铁矿致密块状矿石	0.095	0.031	0.408	0.087	0.345	89.912	0.144	2.24	0	0.569	0.058	0.033	93.922
ZK3602-636-1-1	含团块黄铁矿致密块状矿石	0.083	0.013	0.497	0.076	0.914	88.173	0.197	2.682	0.006	0.553	0.051	0	93.245
ZK3602-636-1-2	含团块黄铁矿致密块状矿石	0.154	0.037	0.429	0.121	1.291	87.407	0.265	3.283	0.006	0.714	0.151	0	93.858
ZK3602-636-2-1	含团块黄铁矿致密块状矿石	0.068	0.063	0.873	0.141	0.418	86.739	0.248	3.962	0.014	0.933	0.01	0.031	93.5
ZK3602-636-2-2	含团块黄铁矿致密块状矿石	0.016	0.026	0.049	0.029	0	93.391	0.008	0.154	0.019	0.025	0	0.002	93.719
ZK3602-636-3-1	含团块黄铁矿致密块状矿石	0.168	0.062	0.594	0.096	0.75	88.177	0.103	2.959	0.001	0.738	0.129	0.01	93.787
ZK3602-636-3-2	含团块黄铁矿致密块状矿石	0.148	0.089	0.621	0.141	0.912	87.724	0.234	3.681	0	0.768	0.07	0.028	94.416

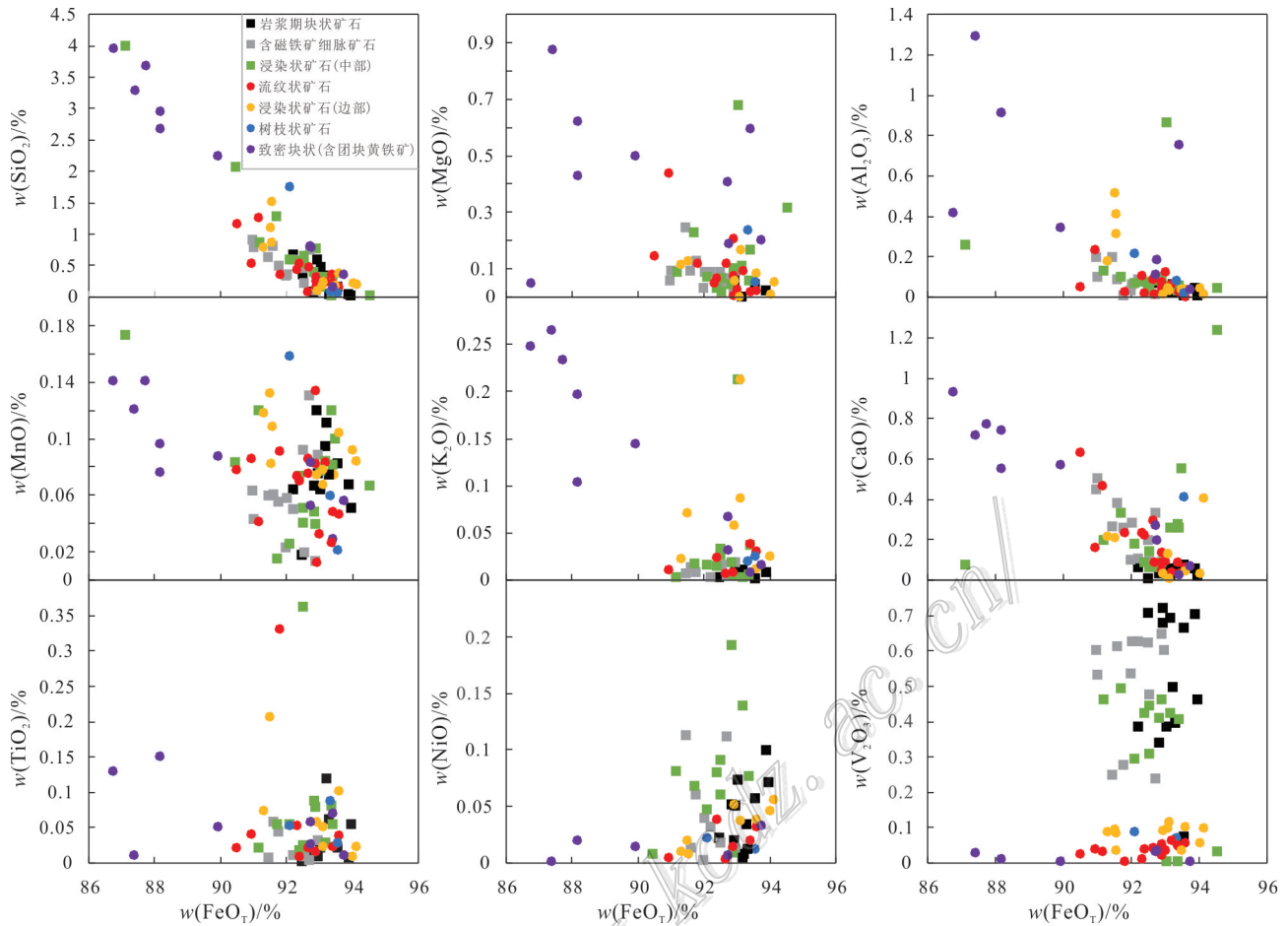


图7 智博铁矿床磁铁矿中氧化物图解

Fig. 7 Oxides relationship diagram of magnetite from the Zhibo iron deposit

2012)。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与 $w(\text{FeO}_T)$ 呈负相关,也指示磁铁矿的形成环境逐渐向酸性环境过渡。 $w(\text{MgO})$ 的增加表明磁铁矿成因逐渐向热液型转变(徐国风等,1979)。磁铁矿中的 $w(\text{FeO}_T)$ 随着矿石类型的变化而变化,具体表现为岩浆期块状矿石→流纹状矿石→含磁铁矿细脉矿石→浸染状矿石→含团块黄铁矿矿石, $w(\text{FeO}_T)$ 有逐渐降低的趋势。岩浆期块状矿石、含磁铁矿细脉矿石和岩浆期浸染状矿石具有较高 V_2O_5 含量,而含团块黄铁矿的致密块状矿石则显示具有较高的 K_2O 、 MnO 、 Al_2O_3 、 CaO 。

陈光远等(1988)对中国多个磁铁矿床中磁铁矿开展了详细的矿物化学统计分析,提出了磁铁矿的 TiO_2 - Al_2O_3 - MgO 成因图解(图8),并将矿床中的磁铁矿分为沉积变质-接触交代磁铁矿、超基性-基性-中性岩浆磁铁矿和酸性碱性岩浆磁铁矿3种类型。根据其 TiO_2 - Al_2O_3 - MgO 成因分类图解(图8),可对磁铁矿成因类型进行初步判断。岩浆期块状矿石在

各类型中均有分布,随着 $w(\text{TiO}_2)$ 降低,磁铁矿逐渐由岩浆成因向热液交代成因过渡。浸染状矿石则主要集中于过渡阶段,后期含团块黄铁矿的磁铁矿以及与围岩接触的浸染状磁铁矿则主要位于沉积变质-热液交代成因区域。前人对智博矿区火山岩的研究表明,该区火山岩为基性-中性-酸性序列(蒋宗胜等,2012;Zhang et al.,2012),因此,少量位于图8酸性-碱性岩浆型区域的样品与位于超基性-基性-中性岩浆岩的样品共同反映早期矿石类型具有岩浆成因特征。后期形成的磁铁矿类型具有更高的 MgO 含量,表明磁铁矿具有向热液交代型磁铁矿过渡的趋势,同时,部分具有早期矿石样品数据位于沉积变质-热液交代型区可能是由于早期矿石受到热液作用影响而失去部分岩浆型磁铁矿特征。因此,整个磁铁矿有从岩浆成因向热液成因逐渐过渡的趋势。

近年来通过对不同类型的典型铁矿床研究,在磁铁矿的成因分类中,铁氧化物中的元素($\text{Ca}+\text{Al}+$

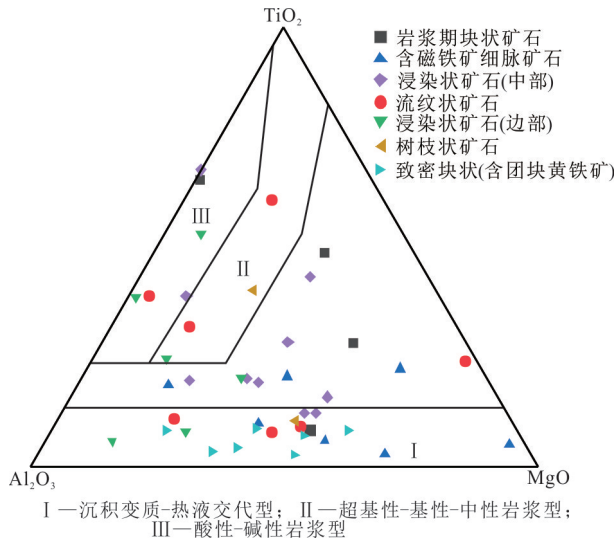


图 8 智博铁矿磁铁矿 $TiO_2-Al_2O_3-MgO$ 成因图解(底图据陈光远, 1987)

Fig. 8 Triangular diagram of $TiO_2-Al_2O_3-MgO$ of magnetite from the Zhibo iron deposit (base map after Chen et al., 1987)

Mn)- $(Ti+V)$ 图解可以判别不同类型的矿床成因(Dupuis et al., 2011)。因此,在根据磁铁矿中氧化物 $(Ca+Al+Mn)-(Ti+V)$ 判别图解(图 9)可知,岩浆期块状矿石多位于基鲁纳型区域,矿体中部浸染状矿石和含细脉磁铁矿矿石位于基鲁纳型与斑岩型部分,而流纹状与含黄铁矿团块的矿石大部分位于矽卡岩型。基鲁纳型铁矿床又称 IOA 铁矿床,以磁铁矿-磷灰石广泛发育为特征,成因主要有岩浆成因和热液成因 2 种认识(Dare et al., 2015; Velasco et al., 2016; Tornos et al., 2016)。岩浆成因的主要特征为铁矿体界线清晰,矿石矿物组成简单;围岩蚀变简单;矿体为脉状、层状或透镜状;矿石多为致密块状等特征(沈保丰等, 1982; 丁俊等, 2012; Henriquez et al., 2003)。智博铁矿床磷灰石发育较弱,但岩浆期块状磁铁矿具有矿物成分简单,蚀变简单以及矿体呈层状、似层状等岩浆型特点,因此,不含团块状黄铁矿的块状矿石可能为岩浆成因,随着矿床的演化逐渐以热液成因为主。

4.2 矿床成因

目前,对于智博铁矿床的成因主要有 2 种认识,即岩浆(主要)-热液(次要)复合型矿床(冯金星等, 2010; 张喜, 2012), 和与火山活动和岩浆热液交代作用有关的矿床(王志华等, 2012; 2018; 蒋宗胜等, 2012)。

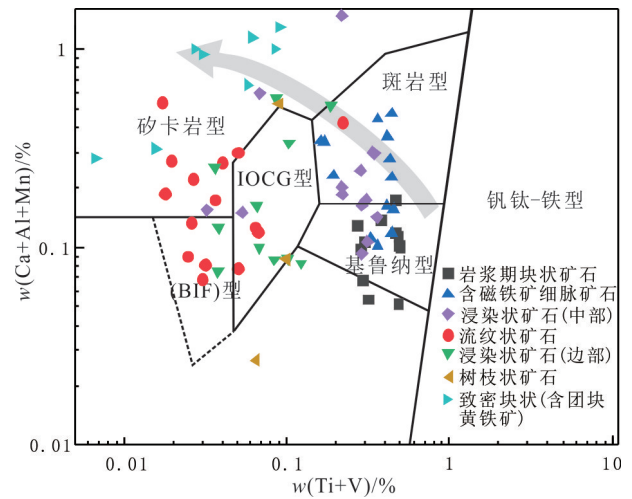


图 9 智博铁矿磁铁矿 $w(Ca+Al+Mn)-w(Ti+V)$ 成因图解(底图据 Dupuis et al., 2011)

Fig. 9 $w(Ca+Al+Mn)-w(Ti+V)$ discriminant diagram showing analyses of magnetite from the Zhibo iron deposit (base map after Dupuis et al., 2011)

智博铁矿床早期矿石类型具有矿物组成简单,矿石品位较高且变化较小,磁铁矿晶形较差和粒径较小的特点,反映了早期含矿岩浆具有结晶速度快,结晶分异不完全的特点。岩浆期矿石围岩蚀变主要为绿帘石化和阳起石化等简单蚀变,并含有透辉石等指示高温环境的伴生矿物,岩浆期块状矿石具有最高的 $w(V_2O_3)$, 岩浆成因磁铁矿具有较高的 $w(V)$ (Nadoll et al., 2014), 指示岩浆期块状矿石具有岩浆成因。同时,矿体也具有层状、似层状、透镜状,赋矿岩体主要为中基性火山岩,与岩浆成因矿床具有相似特征(翟裕生等, 1982)。智博铁矿床受构造控制作用明显,并在矿区周围发现火山角砾岩,矿石中也发育有角砾状矿石(角砾为安山岩),指示智博铁矿床形成环境受火山机构控制明显。晚期矿石构造复杂,发育有条带状、纹层状和树枝状构造。蚀变类型有绿帘石化、钾长石化、绿泥石化和碳酸盐化等高中低温蚀变,具有典型的热液成因特征。热液期磁铁矿和黄铁矿颗粒较早期矿石,明显粒径更为粗大,晶形更为完好。对于其他类型铁矿床而言,前人开展了诸多磁铁矿精细矿物学工作,认为其中元素的变化与相应的成矿过程相关(Hu et al., 2014; 2020)。在智博浸染状磁铁矿中,磁铁矿 $w(FeO_T)$ 自内向外含量有明显的提高,可能与磁铁矿由热液活动导致改造去杂相关(张招崇等, 2021), 也反映了后期热液过

程有利于成矿元素的富集(Duran et al., 2020; Hu et al., 2019)。因此,智博铁矿床成因与前文所划分成矿期一致,即早期矿石具有岩浆型成因特征,后期矿石则具有热液型成因特征并对早期矿石进行叠加改造,并提高了矿石品位,同时受火山机构控制作用明显。

5 结论

(1) 智博铁矿床矿体主要为层状、似层状和透镜状;主要金属矿物为磁铁矿,含少量黄铁矿和黄铜矿;矿石构造以块状构造和浸染状构造为主,还具有角砾状构造(包括角砾为磁铁矿和胶结物为磁铁矿2类)、条带状构造、流纹状构造以及网脉状构造等。

(2) 根据矿石和矿物共生关系,将智博铁矿床划分为岩浆期和热液期2个成矿期次。岩浆期可划分为钠长石-透辉石阶段和磁铁矿-阳起石阶段,热液期可划分为钾长石-绿帘石阶段和石英-硫化物阶段。

(3) 根据智博铁矿床磁铁矿电子探针,不同期次磁铁矿中元素含量具有明显差异,岩浆期块状矿石具有高Ti、低Mg的特征,表现岩浆成矿作用;而含团块黄铁矿的致密块状矿石和位于边部与围岩接触的浸染状矿石具有低Ti、高Mg的特征,倾向于热液成矿作用。因此,智博铁矿床既具有岩浆作用的成矿,也有火山热液交代作用的成矿。

References

- Allen M B, Windley B F and Zhang C. 1993. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia[J]. *Tectonophysics*, 220(1-4): 89-115.
- Andersen D J and Lindsley D H. 1988. Internally consistent solution models for Fe-Mg-Mn-Ti oxides; Fe-Ti oxides[J]. *American Mineralogist*, 73(7-8): 714-726.
- Barnes S J and Roeder P L. 2001. The range of spinel composition in terrestrial mafic and ultramafic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42: 2279-2302.
- Chen G Y, Sun D S and Yin H A. 1988. Genetic and prospecting mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House. 1-874(in Chinese with English abstract).
- Dare S A S, Barnes S J and Beaudoin G. 2012. Variation in trace element content of magnetite crystallized from a fractionating sulfide liquid, Sudbury, Canada: Implications for provenance discrimination[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 88: 27-50.
- Dare S A S, Barnes S J and Beaudoin G. 2015. Did the massive magnetite "lava flows" of El Laco (Chile) form by magmatic or hydrothermal processes? New constraints from magnetite composition by LA-ICP-MS[J]. *Mineralium Deposita*, 50(5): 607-617.
- Ding J, Zhang S G, Xu Z F and Qin X L. 2012. The mineralogical characteristics and mechanism discuss of ore-magma type magnetite from Taliabu Sn-Fe polymetallic deposit, Indonesia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2): 259-268(in Chinese with English abstract).
- Dong L H, Feng J, Liu D, Tang Y L, Qu X and Wang K Z. 2010. Research for classification of metallogenic unit of Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 28(1): 1-15(in Chinese with English abstract).
- Dupuis and Beaudoin G. 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types[J]. *Mineralium Deposita*, 46(4): 319-335.
- Feng J X, Shi F P, Wang B Y, Hu J M, Wang J T and Tian J Q. 2010. Volcanic-type iron ore deposit in Awulale metallogenic belt, West Tianshan[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-132(in Chinese with English abstract).
- Frost B R and Lindsley D H. 1991. Occurrence of iron-titanium oxides in igneous rocks[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 25(1): 433-468.
- Gao J, Long L and Klemd R I. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1221-1238.
- Gao J, Qian Q, Long L L, Zhang X, Li J L and Su W. 2009. Accretionary-orogenic process of western Tianshan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1804-1816(in Chinese with English abstract).
- Ghiorso M S and Sack O. 1991. Fe-Ti oxide geothermometry: Thermodynamic formulation and the estimation of intensive variables in silicic magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 108(4): 485-510.
- Günther T, Klemd R, Zhang X, Horn I and Weyer S. 2017. In-situ trace element and Fe-isotope studies on magnetite of the volcanic-hosted Zhibo and Chagangnuoer iron ore deposits in the western Tianshan, NW China[J]. *Chemical Geology*, 453: 111-127.
- Henríquez F, Naslund H R, Nyström 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.
- Jiang Z S, Zhang Z H, Wang Z H, Duan S G, Li F M and Tian J Q. 2014. Geology, geochemistry, and geochronology of the Zhibo iron deposit in the Western Tianshan, NW China: Constraints on metallogenesis and tectonic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 406-424.
- Jiang Z S, Zhang Z H, Wang Z H, Li F M and Tian J Q. 2012. Alteration mineralogy, mineral chemistry and genesis of Zhibo iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 31(5): 1051-1066(in Chinese with English abstract).
- Li F M. 2013. Metallogenic regularity and prospecting direction of Fe-Mn ore in the carboniferous volcanic-sedimentary basin in western Tianshan(Ph.D thesis)[D]. Tutor: Wang X L. Beijing: China

- University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Li X J. 1994. Distribution regularity and metallogenic prospect of main minerals in Awulale Mountain[J]. *Mineral Resources and Geology*, (5): 344-347(in Chinese with English abstract).
- Lin S Z. 1983. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (3): 166-174(in Chinese with English abstract).
- Nadoll P, Mauk J L, Hayes T S, Koenig A E and Box S E. 2012. Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic belt Supergroup, United States[J]. *Econ. Geol.*, 107(6): 1275-1292.
- Nadoll P, Angerer T, Mauk J L, French D and Walshe J. 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 61: 1-32.
- No. 3 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. 2013. Verification report of iron ore reserves in Nuerhu, Hejing County, Xinjiang[R]. Korla: No.3 Geological Brigade of Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, 2013.
- Qian Q, Gao J, Xiong X M, Long L L and Huang D Z. 2006. Petrogenesis and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from north Zhaosu, western Tianshan Mountains: Constraints from petrology and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1307-1323(in Chinese with English abstract).
- Qian Q, Gao J, Klemd R, He G Q, Song B, Liu D Y and Xu R H. 2009. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiata, NW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(3): 551-569.
- Righter K, Leeman W P and Hervig R L. 2006. Partitioning of Ni, Co and V between spinel-structured oxides and silicate melts: Importance of spinel composition[J]. *Chemical Geology*, 227(1-2): 1-25.
- Shen B F and Luo H. 1982. Geological characteristics of metamorphic Marine volcanic eruption type iron ore in baorihan, Ximeng Province, Inner Mongolia[C]. *Essays of Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*. Beijing: Geological Publishing House. 33-51(in Chinese with English abstract).
- Shen P, Pan H D, Li C H, Feng H X, Wu Y, Shi F P, Guo X C and Li W G. 2020. Carboniferous ore-controlling volcanic apparatus and metallogenic models for the large-scale iron deposits in the western Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(9): 2845-2868(in Chinese with English abstract).
- Shu L, Yu J, Charvet J, Laurent-Charvet S, Sang H and Zhang R. 2004. Geological, geochronological and geochemical features of granulites in the eastern Tianshan, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(1): 25-41.
- Tian J Q, Hu J T, Yi X Z, Li M, Dong H Q and Liu X Z. 2009. Metallogenic conditions and prospecting analysis of iron ore in Chagangnuoer-Biaozhan area of West Tianshan Mountains[J]. *West-China Exploration Engineering*, (8): 88-92(in Chinese with English abstract).
- Tornos F, Velasco F and Hanchar J M. 2016. Iron-rich melts, magmatic magnetite, and superheated hydrothermal systems: The El Laco deposit, Chile[J]. *Geology*, 44(6): 427-430.
- Turner M B, Cronin S J, Smith I E, Stewart R B and Neall V E. 2008. Eruption episodes and magma recharge events in andesitic systems: Mt Taranaki, New Zealand[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(4): 1063-1076.
- Velasco F, Tornos F and Hanchar J M. 2016. Immiscible iron- and silica-rich melts and magnetite geochemistry at the El Laco volcano (northern Chile): Evidence for a magmatic origin for the magnetite deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 79: 346-366.
- 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.
- Wang Z H, Zhang Z H, Jiang Z S, Hong W and Tian J Q. 2012. Magnetite composition of Zhibo iron deposit in western Tianshan Mountains and its genetic significance[J]. *Mineral Deposits*, 31(5): 983-998(in Chinese with English abstract).
- Wang Z H, Hou L, Gao Y W, Zhang Z L, Jiang Z S and Zhang Z H. 2018a. Geochemical characteristics and oxygen isotopes of magnetites in Zhibo iron deposit, western Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(8): 2312-2326(in Chinese with English abstract).
- Wang Z H, Hou L, Gao Y W, Zhang Z L, Jiang Z S and Zhang Z H. 2018b. Chemical composition and sulfur isotope of pyrite from Zhibo iron ore deposit in western Tianshan Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 37(6): 1319-1336(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B and Chappel B W. 1988. Opaque mineralogy and mafic mineral chemistry of I- and S-type granites of the Lachlan fold belt, southeast Australia[J]. *American Mineralogist*, 73(3-4): 281-296.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, Zhao Z Y and Wang G. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tianshan Range, Central Asia[J]. *Geology*, 18(2): 128-131.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, Kröner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31-47.
- Xiao W J, Windley B F, Huang B, Han C M, Yuan C and Chen H 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.
- Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development. 1993. Regional geology of Xinjiang uygur autonomous region[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-841(in Chinese with English abstract).
- Xu G F and Shao J L. 1979. Typomorphic characteristics of magnetite and its practical significance[J]. *Geology and Prospecting*, (3): 30-

37(in Chinese with English abstract).

- Zhai Y S, Shi Z L, Lin X D, Xiong P F, Wang D Y, Yao S Z and Jin Z M. 1982. Genesis of "Daye Type" iron ore deposits in eastern Hubei, China[J]. *Earth Science*, (3): 239-251.
- Zhang X, Tian J, Gao J, Klemd R, Dong L, Fan J, Jiang T, Hu C 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.
- Zhang X. 2013. The Metallogenic Tectonic setting and metallogenesis of the Zhibo and Chaganguoer iron ore deposits, western Tianshan mountains(Ph.D thesis)[D]. Tutor: Dong L H and Gao J. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract). 1-26[2021-05-14].
- Zhang Z C, Li H M, Li J W, Song X Y, Hu H, Li L X, Chai F M, Hou T and Xu D R. 2021. Mineralization background and mineralization mechanism of iron ore in China[J/OL]. *Scientia Sinica(Terrae)*: doi:10.1360/SSTe-2020-0184(in Chinese).
- Zhu Z X, Li J T, Dong L H, Wang K Z, Zhang X F and Xu S Q. 2011. Geological characteristics and tectonic significance of Paleozoic intrusive rocks in western Tianshan of Xinjiang Province[J]. *Earth Science Frontiers*, (2):170-179(in Chinese with English abstract).
- 李小军. 1994. 阿吾拉勒山主要矿产分布规律及成矿远景浅析[J]. *矿产与地质*, (5): 344-347.
- 林师整. 1982. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨[J]. *矿物学报*, (3): 166-174.
- 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.
- 申萍, 潘鸿迪, 李昌昊, 冯浩轩, 武阳, 石福品, 郭新成, 李文广. 2020. 新疆西天山大型铁矿床石炭纪控矿火山机构及成矿模式[J]. *岩石学报*, 36(9): 2845-2868.
- 沈保丰, 骆辉. 1982. 内蒙古锡盟包日汗等地变质海相火山喷溢型铁矿的地质特征[A]. 中国地质科学院天津地质矿产研究所文集[C]. 北京:地质出版社. 33-51.
- 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.
- 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(5): 983-998.
- 王志华, 侯岚, 高永伟, 张振亮, 蒋宗胜, 张作衡. 2018a. 西天山智博铁矿床磁铁矿地球化学及氧同位素特征[J]. *岩石学报*, 34(8): 2312-2326.
- 王志华, 侯岚, 高永伟, 张振亮, 蒋宗胜, 张作衡. 2018b. 西天山智博铁矿床黄铁矿成分特征及硫同位素研究[J]. *矿床地质*, 37(6): 1319-1336.
- 新疆地质矿产勘查开发局第三地质大队. 2013. 新疆和静县诺尔湖铁矿资源储量核实报告[R]. 库尔勒: 新疆地质矿产勘查开发局第三地质大队.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产开发局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社. 1-841.
- 徐国凤, 邵洁涟. 1979. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. *地质与勘探*, (3): 30-37.
- 翟裕生, 石准立, 林新多, 熊鹏飞, 王定域, 姚书振, 金振民. 1982. 鄂东大冶式铁矿成因的若干问题[J]. *地球科学*, (3):239-251.
- 张喜. 2013. 西天山智博和查岗诺尔铁矿成矿背景与成矿作用研究(博士学位论文)[D]. 导师: 董连慧, 高俊. 北京: 中国科学院大学.
- 张招崇, 李厚民, 李建威, 宋谢炎, 胡浩, 李立兴, 柴凤梅, 侯通, 许德如. 2021. 我国铁矿成矿背景与富铁矿成矿机制[J/OL]. *中国科学: 地球科学*:1-26. doi:10.1360/SSTe-2020-0184.
- 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*, (2):170-179.

附中文参考文献

- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1988. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社. 1-874.
- 丁俊, 张术根, 徐忠发, 秦新龙. 2012. 印尼塔里亚布锡铁多金属矿床岩浆型磁铁矿的矿物学特征与形成机理探讨[J]. *矿物学报*, (2): 259-268.
- 董连慧, 冯京, 刘德权, 唐延龄, 屈迅, 王克卓. 2010. 新疆成矿单元划分方案研究[J]. *新疆地质*, (1): 1-15.
- 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.
- 蒋宗胜, 张作衡, 王志华, 李凤鸣, 田敬全. 2012. 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[J]. *矿床地质*, 31(5): 1051-1066.
- 李凤鸣. 2013. 西天山石炭纪火山-沉积盆地铁锰矿成矿规律和找矿方向(博士学位论文)[D]. 导师: 王训练. 北京: 中国地质大学.