

文章编号: 0258-7106(2012)05-0983-16

西天山智博铁矿床磁铁矿成分特征 及其矿床成因意义*

王志华¹, 张作衡², 蒋宗胜², 洪 为², 田敬全³

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 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三地质大队, 新疆 库尔勒 841000)

摘 要 智博大型磁铁矿床位于新疆西天山阿吾拉勒成矿带东段, 赋存于石炭系大哈拉军山组玄武质安山岩、安山岩及火山碎屑岩中。智博铁矿床包括东、中、西以及 13 号矿体 4 个矿段。矿体主要呈层状、似层状、透镜状。金属矿物以磁铁矿为主, 含少量浸染状黄铁矿, 局部可见细脉赤铁矿及零星状黄铜矿。矿石构造以块状和浸染状构造为主, 角砾状次之, 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、板条状结构。智博矿区的蚀变矿物组合以透辉石、钠长石、钾长石、绿帘石、阳起石为主, 含有少量方解石、石英、绿泥石及榍石。根据矿物共生组合、矿石结构的观察以及矿物化学分析, 识别出岩浆期和热液期 2 个成矿期, 进一步细分为 3 个成矿阶段: 磁铁矿-透辉石-绿帘石阶段(a1)、磁铁矿-钾长石-绿帘石阶段(b1)、石英-硫化物阶段(b2)。磁铁矿的电子探针成分分析显示, 岩浆期矿石中 FeO_T 含量较高, 而 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 SiO_2 等氧化物含量较低, 热液期矿石则相反。角砾状和部分浸染状磁铁矿中 V_2O_5 含量相对较高, 与火山岩中含量类似, 暗示该矿化阶段的铁质部分来源于围岩。块状以及浸染状磁铁矿 FeO_T 含量大部分在 90% 以上, 角砾状、网脉状、树枝状矿石中磁铁矿的 $w(\text{FeO}_T)$ 分布相对比较集中, 多数在 90%~92% 之间, 纹层状矿石的 $w(\text{FeO}_T)$ 则变化于 88%~92% 之间, 其 CaO 、 SiO_2 等氧化物平均含量相对增加。 TiO_2 - Al_2O_3 - MgO 图解和 $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$ vs $\text{Ti} + \text{V}$ 图解均表明智博铁矿床的形成与火山活动和岩浆热液的交代作用有关。

关键词 地质学 地质特征 磁铁矿 电子探针 智博铁矿 西天山

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Magnetite composition of Zhibo iron deposit in Western Tianshan Mountains and its genetic significance

WANG ZhiHua¹, ZHANG ZuoHeng², JIANG ZongSheng², HONG Wei² and TIAN JingQuan³

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

Abstract

Located in the eastern Awulale metallogenic belt of Western Tianshan Mountains, the large-size Zhibo iron deposit is hosted in basaltic andesite, andesite and pyroclastic rocks of the Lower Carboniferous Dahalajunshan Formation. The Zhibo iron deposit consists of four main areas: the eastern zone, the middle zone, the western

* 本文受到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(1212011085060)联合资助

第一作者简介 王志华, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: wzhh.163@163.com

收稿日期 2012-07-10; 改回日期 2012-08-10。张绮玲编辑。

zone, and No. 13 ore body, in which the ore bodies occur as layers, stratoid bodies or lenses. Mineralization consists of massive magnetite associated with minor disseminations of pyrite and veinlets of hematite and trace chalcopyrite. The ore structures include mainly massive and disseminated, subordinately brecciated, and occasionally banded or vein-stockwork forms, whereas the ore textures consist of euhedral - anhedral grainular, metasomatic relict, and platy forms. The principal alteration mineral assemblages in Zhibo include diopside, albite, K-feldspar, epidote, and actinolite, together with calcite, quartz, chlorite and titanite. On the basis of observed mineral assemblages and ore textures as well as mineral analyses, two periods of ore deposition have been recognized: magmatic period and hydrothermal ore-forming period, which could be further subdivided into three metallogenic stages, i. e., magnetite-diopside-epidote stage (a1), magnetite-K-feldspar-epidote stage (b1) and quartz-sulfide stage (b2). Electron microprobe analyses show that the magnetite with magmatic features has higher content of FeO_T and lower content of Al_2O_3 , CaO , MgO , SiO_2 in comparison with the magnetite with hydrothermal features. The content of V_2O_5 in brecciated and disseminated ore is relatively high, similar to the content of volcanic rocks, suggesting that part of iron of the ore-forming stage came from the wall rock. Massive and disseminated magnetite has varied FeO_T values, mostly above 90%; FeO_T content of magnetite from brecciated, veined and dendritic ores varies between 90% and 92%; the FeO_T content of magnetite from laminated ore varies between 88% and 92%, with higher average content of other oxides such as CaO and SiO_2 . Both ternary plot of $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ and $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$ versus $\text{Ti} + \text{V}$ discriminant diagram suggest that the formation of the Zhibo iron deposit was associated with volcanic activity and hydrothermal metasomatism of magmatic-hydrothermal fluid.

Key words: geology, geological features, magnetite, EMPA, Zhibo iron deposit, Western Tianshan Mountains

近年来在新疆西天山东段的阿吾拉勒铁成矿带发现了一系列与石炭系大哈拉军山组火山岩有关的铁矿床(李凤鸣等 2011; 冯金星等 2010), 自西往东依次分布有式可布台、松湖、尼新塔格、查岗诺尔、智博、敦德、备战等铁矿床。其中, 智博铁矿(又名诺尔湖铁矿)由新疆地矿局第三地质大队于 2006 年发现, 近年的详查工作查明该矿的资源量(332 + 333) 已达到 2.3 亿吨^①。矿体赋存于大哈拉军山组玄武质安山岩、安山岩、粗面安山岩及火山碎屑岩之中, 呈层状、似层状、透镜状产出, 赋矿围岩广泛发育透辉石化、钠长石化、绿帘石化、钾长石化、阳起石化等蚀变。前人对该矿床的地质特征、矿石组构(田敬全等 2009; 李凤鸣等 2011) 及火山岩地球化学和年代学开展了初步研究, 认为智博矿区火山岩为基性-中性-酸性连续序列, 与大陆岛弧火山岩的地球化学特征相符, 获得智博矿区英安岩的年龄为(300.3 ± 1.1) Ma, 闪长岩的年龄为(305.0 ± 1.1) Ma(蒋宗胜等 2012), 花岗岩岩体、岩脉的年龄分别为(304.1 ± 1.8) Ma 和(294.5 ± 1.6) Ma(Zhang X et al.,

2012)。矿石的稀土元素和 Pb 同位素研究都指示矿石与玄武质火山岩有密切的关系, 矿床成因上属于以玄武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)。本文在前人研究基础之上, 对智博铁矿床进行详细的矿床地质特征解剖, 对主要的矿石矿物磁铁矿开展矿相学和电子探针等研究, 并初步探讨了矿床成因。

1 区域成矿背景

西天山造山带属于晚古生代碰撞造山带(高俊等 2009), 是一个经历了复杂变形改造(Windley et al., 1990), 多期次俯冲、碰撞和陆-陆叠覆造山而形成的复合造山带(Allen et al., 1992; 左国朝等, 2008; Xiao et al., 2009), 北以依连哈比尔尕断裂带为界, 南以长阿吾子-乌瓦门缝合带为界, 东起托克逊-库米什北东, 向西延入哈萨克斯坦, 整体呈楔形夹持于准噶尔板块和塔里木板块之间(图 1)。西天山也是中亚成矿域的一个重要组成部分(朱永峰等,

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.

2007 朱永峰 2009) 阿吾拉勒成矿带自西向东分布发育阔拉萨依铁矿、式可布台铁矿、松湖铁矿、尼新塔格-阿克萨依铁矿、查岗诺尔铁矿、智博铁矿、敦德铁矿、备战铁矿、莫托萨拉铁锰矿等几个大中型铁矿床(图 1), 是国家十大重要金属矿产资源接替基地之一^①。

智博铁矿位于西天山东部, 构造位置属于伊犁石炭纪—二叠纪裂谷(何国琦等, 2004)。区域内出露的地层主要有元古界、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系及第四系, 其中以石炭系分布最广泛, 分为大哈拉军山组和伊什基里克组。阿吾拉勒山一带大哈拉军山组, 是一套基性-中性-酸性系列的火山-沉积岩系。关于该组火山岩形成的沉积-构造环境目前仍存在不同观点, 有学者认为是大陆裂谷环境(车自成等, 1996), 或者是陆相喷发环境

(杨金中等, 2003), 或者是与地幔柱有关的大火成岩省(夏林圻等, 2002) 还有学者认为是海相岛弧钙碱性火山岩建造等(姜常义等, 1993; 1995; 朱永峰等, 2005; 李注仓等, 2006; 邵铁全等, 2006; 刘静等, 2006; 龙灵利等, 2008; 李永军等, 2009; 李继磊等, 2010)。该区大哈拉军山组(底部出露不全) 细分为 2 个亚组(第二亚组和第三亚组) 5 个岩性段。第二亚组(C_1d^b) 早期以中性含细角砾凝灰岩、晶屑凝灰岩夹中-基性熔岩为主, 晚期以碳酸盐岩沉积为主夹少量火山碎屑岩, 出露厚度约为 1 127 m。第三亚组(C_1d^c) 出露厚度约为 450 m, 早期以安山质(含)角砾晶屑凝灰岩、安山质火山灰凝灰岩、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(角砾)熔岩、层状流纹质熔结凝灰岩、流纹岩、

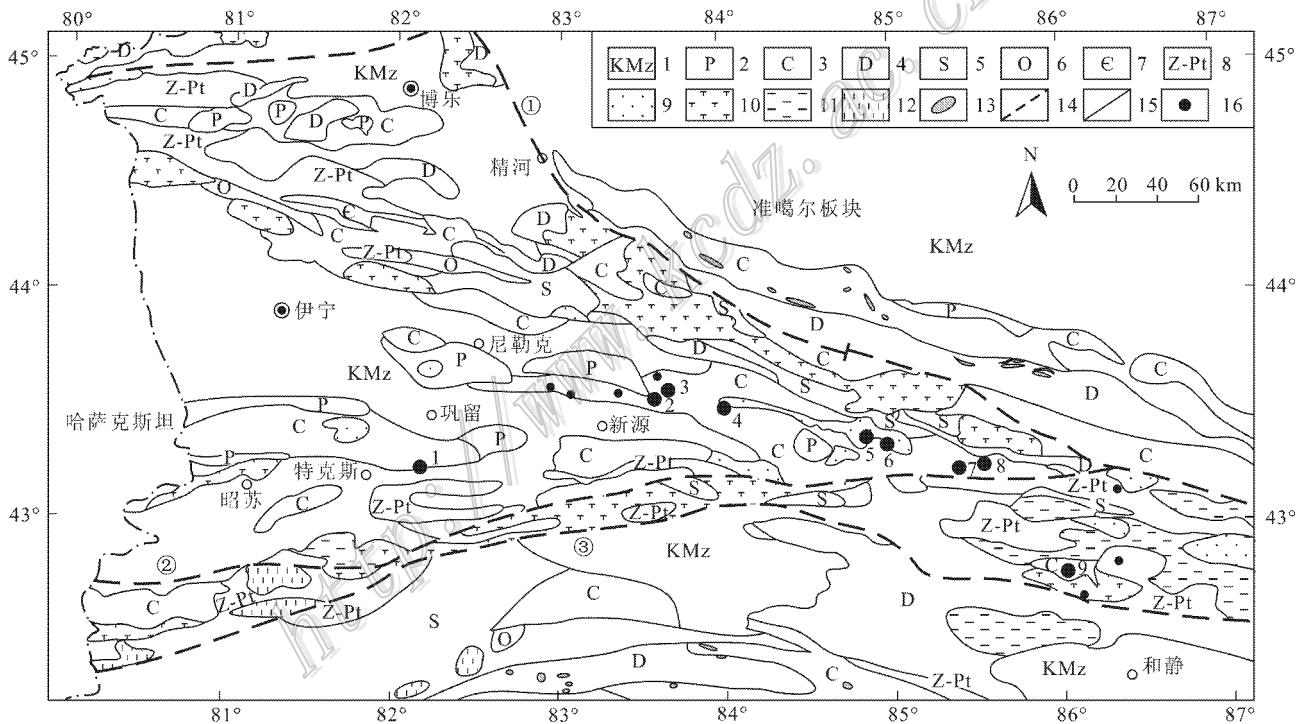


图 1 西天山区域地质及铁矿(点)分布图(据洪为等, 2012a)

1—中-新生界; 2—二叠系; 3—石炭系; 4—泥盆系; 5—志留系; 6—奥陶系; 7—寒武系; 8—前寒武系; 9—二叠纪花岗岩; 10—石炭纪花岗岩; 11—泥盆纪花岗岩; 12—志留纪花岗岩; 13—镁铁质-超镁铁质岩; 14—主要断裂; 15—地质界线; 16—铁矿。图中铁矿床代号:

1. 阔拉萨依铁矿; 2. 式可布台铁矿; 3. 松湖铁矿; 4. 尼新塔格-阿克萨依铁矿; 5. 查岗诺尔铁矿; 6. 智博铁矿; 7. 敦德铁矿;
8. 备战铁矿; 9. 莫托萨拉铁锰矿。断裂编号: ①—依连哈比尕断裂; ②—尼古拉耶夫线-那拉提北坡断裂; ③—长阿吾子-乌瓦门断裂

Fig. 1 Geological map of Western Tianshan Mountain and iron deposits (ore spots) (after Hong et al., 2012a)

1—Cenozoic-Mesozoic; 2—Permian; 3—Carboniferous; 4—Devonian; 5—Silurian; 6—Ordovician; 7—Cambrian; 8—Precambrian; 9—Permian granitoids; 10—Carboniferous granitoids; 11—Devonian granitoids; 12—Silurian granitoids; 13—Mafic-ultramafic rocks; 14—Fault; 15—Geological boundary; 16—Fe deposit/ore spot. **Fe deposits:** 1. Kuolasayi; 2. Shikebutai; 3. Songhu; 4. Nixintage-Aakesayi; 5. Chaganguoer; 6. Zhibo; 7. Dunde; 8. Beizhan; 9. Motuosala. Faults: ①—Yilianhabierga fault; ②—Nikolaev-North Nalati fault; ③—Awuchangzi-Wuwamen fault

① 李凤鸣. 2010. 新疆阿吾拉勒铁矿带找矿突破 (ppt).

英安质晶屑凝灰岩为主。蒋宗胜等(2012)测得该区内查岗诺尔铁矿区流纹岩和闪长岩的年龄分别为 (301.8 ± 0.9) Ma 和 (303.8 ± 1.3) Ma, 智博铁矿区的英安岩和闪长岩年龄分别为 (300.3 ± 1.1) Ma 和 (305.0 ± 1.1) Ma, Zhang 等(2012)获得备战铁矿区的流纹岩和英安岩的年龄分别为 (301.3 ± 0.8) Ma 和 (303.7 ± 0.9) Ma。伊什基里克组为一套火山角砾岩、凝灰岩及熔岩(冯金星等, 2010)。

西天山地区海西晚期中酸性岩体非常发育, 侵入岩主要为一套与洋盆收敛俯冲有关的钙碱性侵入岩、与同碰撞有关的富铝花岗岩以及后造山的富钾花岗岩等(朱志新等, 2011; 蒋宗胜等, 2012)。区内断裂构造和火山机构广泛发育, 断裂线总体走向 $255^{\circ} \sim 270^{\circ}$, 倾向北, 倾角 $63^{\circ} \sim 82^{\circ}$, 断层破碎带宽数厘米至数十米, 构造角砾发育, 蚀变较强, 成矿地质条件十分有利(冯金星等, 2010)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

智博铁矿区出露的地层为石炭系大哈拉军山组第二亚组的一套火山岩地层, 地层总体呈单斜产出, 倾向 $NE30^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 倾角 65° 左右, 构造形迹较为复杂, 断裂裂隙比较发育。矿区内磁铁矿主要产在该套地层中, 矿体产状倾向北东。矿区出露的主要岩石有:

安山岩: 灰色、浅灰色, 斑状结构, 块状构造。斑晶多为斜长石或少量辉石、角闪石等暗色矿物, 斑晶最大约 3 mm 左右, 基质多为玻璃质, 长石多为半自形, 含量约为 70% 以上, 石英含量为 10% ~ 15% 左右, 辉石含量小于 5%, 角闪石含量 5% ~ 10%, 轻微蚀变为绿帘石、绿泥石。

磁铁矿化安山岩: 灰色、灰黑色, 磁性越强, 颜色越深, 斑状结构、玻基交织结构, 块状构造。斑晶多为斜长石, 基质由斜长石微晶、辉石、角闪石和磁铁矿组成, 部分斜长石微晶半定向排列, 微晶之间有较多玻璃质或隐晶质充填。磁铁矿镜下为他形细粒结构, 含量小于 30%。岩石多发育绿帘石化, 偶见钾长石化。

蚀变安山岩: 灰绿色、灰红色, 板状结构, 块状构造。斑晶为轻微蚀变的斜长石、辉石、角闪石, 斜长石为半自形-自形板柱状, 暗色矿物多为他形-半自

形。基质一般为隐晶质。岩石蚀变较强, 绿帘石化和钾长石化一般呈团块状、条带状不均匀分布, 偶见后期碳酸盐网脉和石英。

粗面安山岩: 灰绿色、紫红色, 斑状结构, 块状构造。斑晶为斜长石、钾长石、辉石等, 斜长石多为半自形板柱状, 含量 10% ~ 15%, 钾长石斑晶呈他形-半自形分布, 含量 15% ~ 20%。基质为斜长石、钾长石、辉石和少量磁铁矿, 偶见玻璃质和隐晶质。岩石发育绿帘石化、钾长石化等。

矿区石炭系火山岩和中酸性岩体非常发育, 西南部出露花岗闪长岩岩体, 呈北西向条带状侵入, 花岗岩岩体、岩脉的年龄分别为 (304.1 ± 1.8) Ma 和 (294.5 ± 1.6) Ma (Zhang X et al., 2012)。矿区北部和西部出露石英闪长岩体, 与中部的火山岩地层之间为侵入接触关系(图 2a)。

2.2 矿体特征

智博铁矿区东西长 4.5 km, 分东、中、西和 Fe13 号 4 个含矿段, 共圈定 24 条磁铁矿体, 平均品位约为 38%。本文重点研究区域为东矿段(图 2b), 经地表工程揭露和钻探工程显示, 矿体形态主要为块状、层状、似层状和透镜状, 主矿体东西长 800 m, 南北宽 600 m, 埋深约 200 m, 向南东方向倾斜, 累积厚度可达 82 m(图 2c、2d), 品位 35% ~ 60%。

从智博铁矿 24—24' 线勘探线剖面图(图 2c)可知, 磁铁矿矿体 Fe18 和 Fe19 分别呈厚层状、透镜状近水平产出, 平均累积厚度约在 80 m 以上。磁铁矿一般为中细粒结构, 致密块状和稠密浸染状, 平均品位可达 50%。主矿体周边的矿体一般为贫矿体, 也呈薄层状、透镜状产出, 矿石一般为稀疏浸染状, 磁铁矿颗粒相对较粗, 品位在 30% ~ 45% 之间。矿体顶底板均为蚀变安山岩, 普遍发育绿帘石化和阳起石化, 局部可见钾化。

垂直于 24—24' 线的 C—C' 剖面(图 2d)揭露了 Fe7、Fe8、Fe9 三个矿体的赋存状况, 这 3 个矿体均呈似层状、网脉状或透镜状产出, 单层厚度变化较大, 最薄处为 4 m, 最厚为 60 m, 平均每个钻孔中矿体累积厚度为 70 m, ZK1604 最多可见 10 层矿体。矿石粒度由顶部矿石的中粗粒结构、稠密浸染状构造, 变至中部矿石的中细粒结构、致密块状或稠密浸染状, 直至底部矿石的中细粒结构、致密块状和角砾状。赋矿围岩为绿帘石化、钾长石化安山岩。

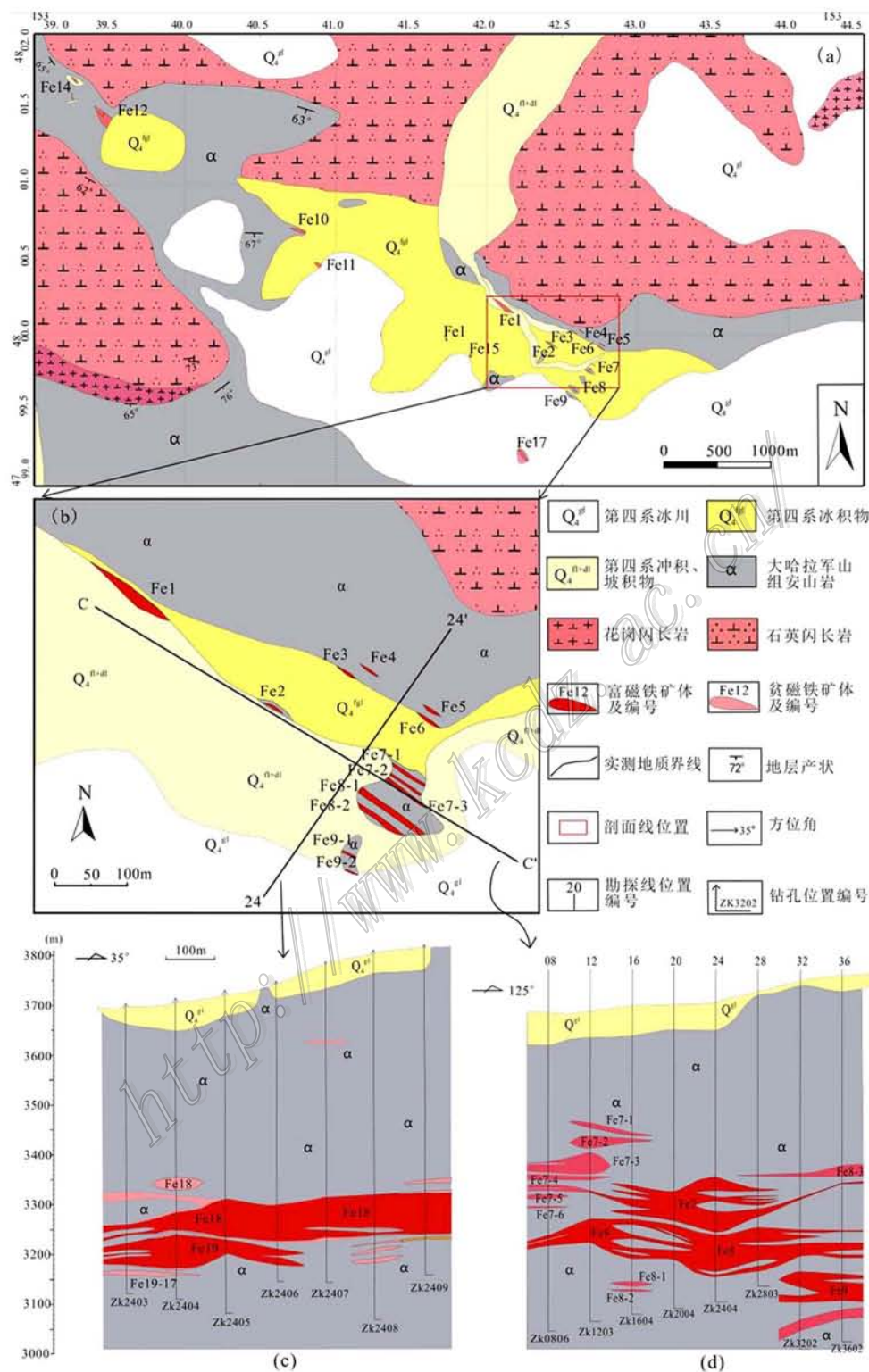


图2 智博矿区地质图(a)、智博铁矿东矿段地质图(b)及24—24'线剖面图(c)和C—C'线剖面图(d)
(据新疆地质矿产局勘查开发第三地质大队, 2011^①修改)

Fig. 2 Geological map (a, b) and simplified geological sections along 24—24' line (c) and C—C' line (d) of the Zhibo iron ore district (modified after No. 3 Geological Party of Xinjiang, 2011^①)

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.

2.3 矿石特征

2.3.1 矿物组成

矿石矿物主要为磁铁矿,脉石矿物有黄铁矿、黄铜矿、赤铁矿、褐铁矿、单斜辉石、透辉石、钠长石、角闪石、斜长石和电气石,蚀变矿物主要有绿帘石、钾长石,其次为阳起石、绿泥石等(图3)。

2.3.2 结构构造

智博矿区的矿石类型分为岩浆型和热液型两种,矿石构造种类比较多,有致密块状、浸染状、角砾状、树枝状和纹层条带状等。现按成因分述如下:

岩浆型矿石:含矿岩浆溢出后处于开放空间,结晶速度快、时间短,结晶分异、交代作用不完全,因

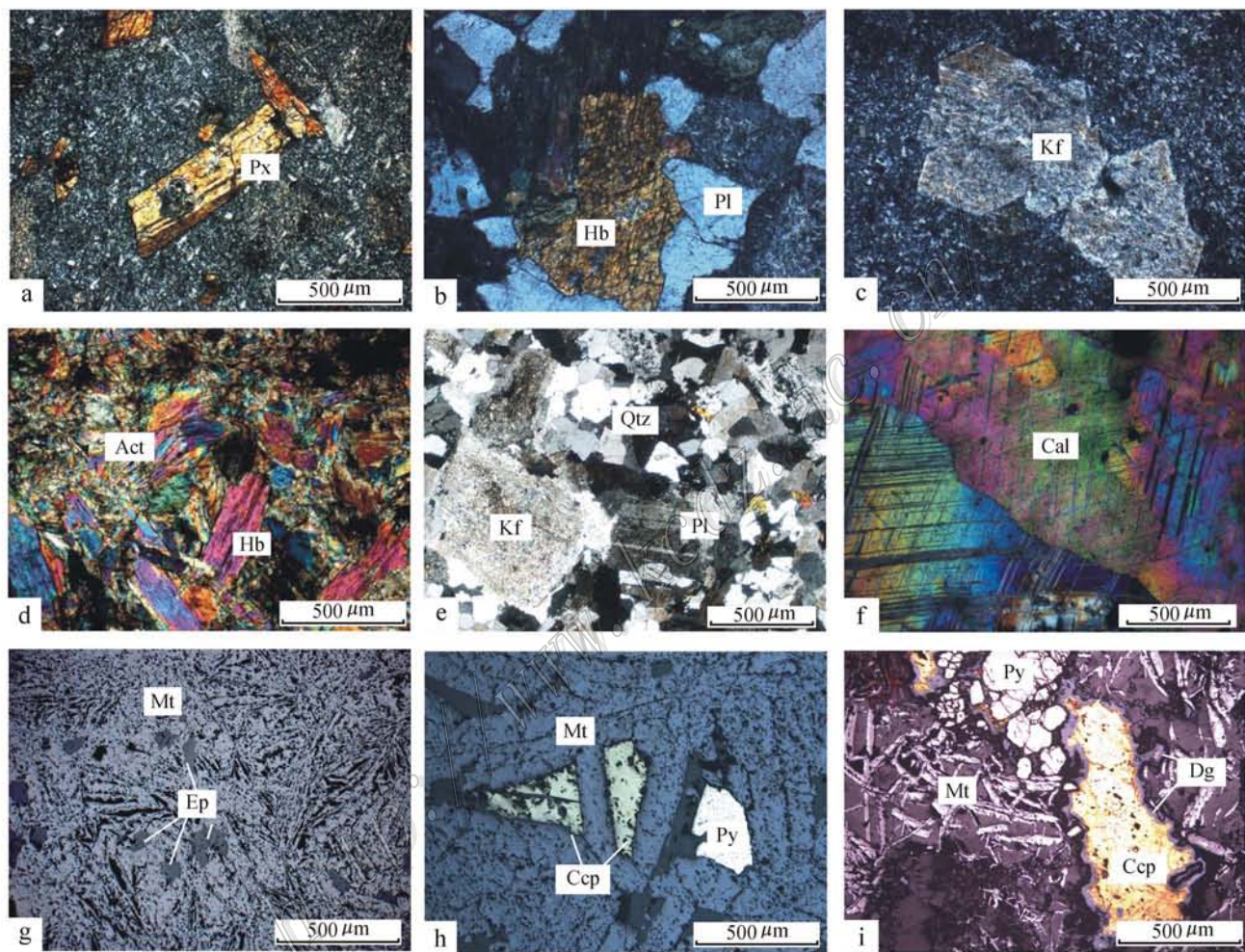


图3 智博矿区的主要矿物组成及其结构特征

a. 围岩(安山岩)中的柱状单斜辉石,正交偏光下; b. 安山岩中的角闪石和斜长石,正交偏光下; c. 围岩中钾长石,表面轻微蚀变,正交偏光下; d. 蚀变安山岩中的板状角闪石和放射状阳起石,正交偏光下; e. 英安岩里石英、斜长石和钾长石共生,正交偏光下; f. 围岩中的碳酸盐化,正交偏光下; g. 反射光下,细粒针状磁铁矿与绿帘石共生; h. 反射光下,黄铁矿和黄铜矿充填于磁铁矿的晶隙中; i. 反射光下,板状磁铁矿与他形黄铁矿共生,方辉铜矿环绕黄铜矿
Mt—磁铁矿, Py—黄铁矿, Ep—绿帘石, Kf—钾长石, Qtz—石英, Pl—斜长石, Act—阳起石, Hb—角闪石, Ccp—黄铜矿, Dg—方辉铜矿, Cal—方解石, Px—辉石

Fig. 3 Composition and structural characteristics of main minerals in the Zhibo ore district

a. Columnar clinopyroxene in wall rock (andesite) (crossed nicols); b. Hornblende and plagioclase in andesite (crossed nicols); c. Slightly altered K-feldspar in wall rock (crossed nicols); d. Platy hornblende and radiant actinolite in altered andesite (crossed nicols); e. Quartz, plagioclase and potassium feldspars in dacite (crossed nicols); f. Carbonatization in wall rock (crossed nicols); g. Fine-grained acicular magnetite associated with epidote (under reflective light); h. Pyrite and chalcopyrite filling lattice voids of magnetite (under reflective light); i. Platy magnetite associated with allomorphic pyrite, chalcopyrite surrounded by digenite (under reflective light)

Mt—Magnetite, Py—Pyrite, Ep—Epidote, Kf—K-feldspar, Qtz—Quartz, Pl—Plagioclase, Act—Actinolite, Hb—Hornblende, Ccp—Chalcopyrite, Dg—Digenite, Cal—Calcite, Px—Pyroxene

此这个时期的矿石特征为磁铁矿颗粒细、晶形差(图3g、4h),一般呈致密块状(图4a、b)、稠密浸染状(图4c)、角砾状(图4d、e)等产出。黄铁矿颗粒小,呈星点状分布在磁铁矿中。

致密块状磁铁矿矿石: 此类矿石位于主矿体的中下部,以致密块状构造为特征。磁铁矿含量80%左右甚至更高,黄铁矿含量约5%左右,镜下磁铁矿多为他形-半自形结构,晶形较细,晶隙中常见少量黄铁矿、硅酸盐矿物或绿帘石(图3g)。

浸染状磁铁矿矿石: 这类矿石在矿区普遍分布,常见于主矿体的边缘或磁铁矿脉中,磁铁矿含量变化范围大,约在10%~80%之间,根据含量的不同又分为稀疏浸染状和稠密浸染状。该类矿石一般与其他构造类型矿石或围岩呈过渡关系,围岩一般发育绿帘石化(图4c)、绿泥石化和阳起石化,局部矿石出现气孔状和杏仁状构造(图4f),由于靠近地表,部分被后期降水淋滤氧化。

角砾状磁铁矿矿石: 这类矿石一般位于矿体底

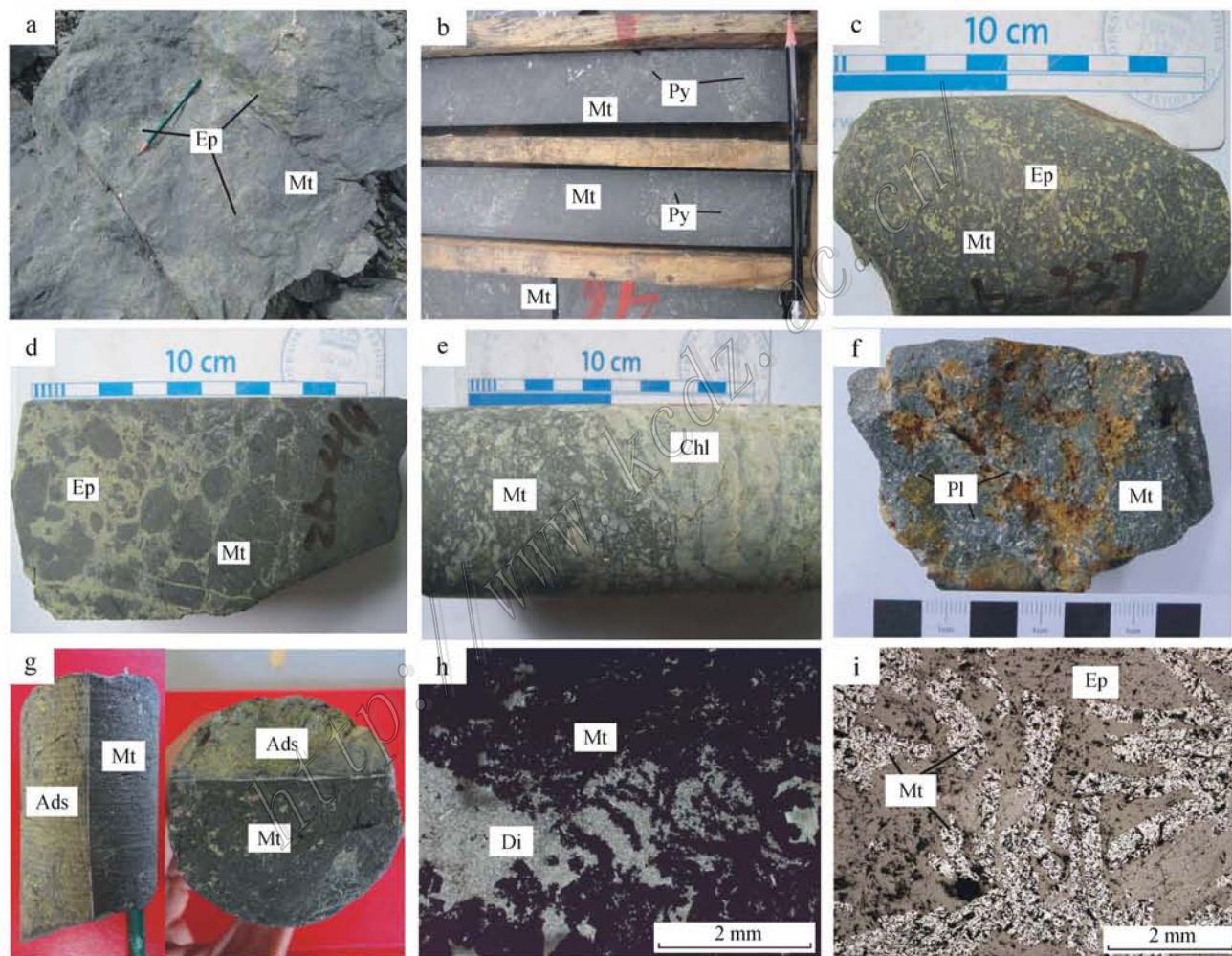


图4 智博铁矿岩浆型矿石特征

a. 致密块状矿石,伴随绿帘石化;b. 致密块状矿石,黄铁矿呈星点状分布;c. 稠密浸染状矿石,伴随星点状绿帘石化;d. 磁铁矿为角砾状的矿石,被绿帘石化安山岩胶结;e. 角砾状矿石,磁铁矿胶结安山质角砾,伴随绿泥石化;f. 块状矿石的杏仁、气孔构造;g. 块状磁铁矿与安山岩的界线清晰截然,轻微绿帘石化;h. 单偏光下,磁铁矿与透辉石共生;i. 反射光下,磁铁矿呈他形-半自形,与绿帘石共生

Mt—磁铁矿, Py—黄铁矿, Ep—绿帘石, Ads—安山岩, Chl—绿泥石, Pl—斜长石, Di—透辉石

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

a. Dense massive ore associated with epidotization; b. Dense massive ore associated with scattered pyrite; c. Densely disseminated ore associated with scattered epidotization; d. Brecciated magnetite ore cemented by epidotized andesite; e. Brecciated ores associated with epidotization, magnetite cementing andesitic breccia; f. Stomata and amygdaloidal structure in massive ore; g. Clear boundary between massive ore and andesite associated with slight epidotization; h. Magnetite associated with diopside (under reflective light); i. Magnetite associated with epidote, assuming anhedral-subhedral texture (under reflective light)

Mt—Magnetite, Py—Pyrite, Ep—Epidote, Ads—Andesite, Chl—Chlorite, Pl—Plagioclase, Di—Diopside

部,角砾按成分可分为 2 种:一种是磁铁矿为角砾状被围岩胶结(图 4d),另外一种为围岩呈角砾状被磁铁矿胶结(图 4e)。磁铁矿含量一般在 40%~70% 之间,角砾形状不规则,大小 2~20 mm 之间。

热液期矿石:矿区小型断层和裂隙十分发育,热液沿裂隙运移、充填、交代围岩并改造矿体,使部分磁铁矿重结晶,形成颗粒较粗、晶形较好的矿石,这类矿石一般位于矿体的边缘部位,或者沿断裂裂隙分布呈纹层条带状(图 5c)、浸染状(图 5b、h)等产出。黄铁矿颗粒大,晶形好,含量有所增加,一般呈团块状(图 5a、j)、脉状(图 5l)或条带状分布于矿石内部或者与围岩的接触带上。矿体与围岩的界线有磁铁矿-黄铁矿-安山岩(图 5f)、磁铁矿-绿帘石-钾长石-安山岩(图 5d)等几种接触过渡。

块状矿石:这类矿石是后期热液作用对早期矿石的交代叠加形成的,典型的特征是磁铁矿颗粒为中-粗粒,黄铁矿的粒度变大,晶形更好,呈团块状、条带状或脉状充填于磁铁矿中(图 5a)。

浸染状矿石:该类矿石一般与其他构造类型矿石或围岩呈过渡关系,沿裂隙分布,矿石常伴生石英、黄铁矿(图 5g)、绿帘石和钾长石等矿物(图 5h)。

纹层(条带)状矿石:磁铁矿和绿帘(泥)石化、钾长石化或黄铁矿呈互层状分布(图 5c),单层厚度不大,一般为 2~30 mm 之间,为典型的热液交代作用的产物。

树枝状矿石:一般认为是后期热液交代早期的矿石,使磁铁矿发生重结晶作用,生成中-粗粒、半自形-自形板状磁铁矿,切穿早期的黄铁矿或者其他脉石矿物(图 5e)。

2.4 围岩蚀变与成矿期次

矿区岩石普遍遭受强烈的蚀变,离矿体越近,蚀变越强烈,主要的围岩蚀变有:

绿帘石化:矿区内玄武质安山岩、安山岩等矿体围岩普遍发生绿帘石化,局部蚀变强烈形成绿帘石岩,矿体夹层绿帘石化较强。绿帘石多呈浸染状(图 4c、d)、网脉状、团块状(图 4a)分布于矿石中,磁铁矿与绿帘石化有密切的接触关系。

钾长石化:从岩芯和手标本上看,钾长石化的发育比绿帘石晚一些,仅在晚期的矿石或围岩中发现。钾长石化一般呈团块状、浸染状及条带状不均匀分布于矿体和围岩以及接触带中(图 5b、h),局部出现钾长石与磁铁矿互层。

绿泥石化:多发育于矿体与围岩的接触部位或

者夹石中(图 5c),多呈团块状、条带状、不规则状分布。

阳起石化:在矿体的夹石或围岩中发现阳起石化,多呈放射状和短柱状(图 3d),与绿帘石共生,是常见的中低温蚀变阶段的产物,周围少见磁铁矿。

硅化:矿体和围岩局部发育硅化,出现石英团块或石英细脉。可以从手标本上看出石英脉穿切早期的绿帘石和钾长石。

碳酸盐化:许多岩芯样中发育裂隙,被碳酸盐脉充填,脉宽一般在 1~40 mm 之间,碳酸盐化对成矿没有太大意义,可能对矿体进行破坏改造。

根据矿石组构、矿物共生和产出特征,可以划分为 2 个成矿期,即岩浆成矿期、热液成矿期,进一步可以划分为 3 个成矿阶段(a1、b1、b2)(表 1),前两个阶段为主要成矿阶段。

(1) 岩浆成矿期 即磁铁矿-透辉石-绿帘石阶段(a1)(表 1)。这个阶段的早期以出现磁铁矿+透辉石为特征(图 4h),磁铁矿多呈致密块状、角砾状、浸染状,颗粒较细,一般为他形-半自形结构,其中有的块状磁铁矿石与安山岩之间的接触界线清楚,呈截然关系(图 4g),蚀变较弱,可能是铁矿浆直接贯入安山岩中形成的,角砾状矿石中,磁铁矿胶结呈角砾状的蚀变安山岩,角砾大小不一、无规则,可能是围岩角砾随比重大的矿浆中悬浮流动形成的(图 4e)。手标本上,角砾状矿石中发育透辉石,两者可能同时形成,块状矿石也发育晶形稍好的磁铁矿,其间隙充填后期的黄铁矿。后期则以绿帘石(黄铁矿)-阳起石(黄铜矿-绿泥石)等矿物组合为特征,可能是随着矿浆温度的降低,磁铁矿的结晶沉淀,围岩发生蚀变,逐渐生成绿帘石、阳起石、绿泥石等矿物,并析出少量他形粒状黄铁矿(图 4b)。

(2) 热液成矿期 可以进一步划分为 2 个成矿阶段(表 1)。

① 磁铁矿-钾长石-绿帘石阶段(b1):以发育角砾状矿石、浸染状矿石及条带状矿石为特征。角砾状矿石中(图 4h),磁铁矿被强烈绿帘石化和钾长石化的围岩破裂成较小的角砾并胶结,后期还发育石英和黄铁矿,显微镜下,磁铁矿多呈半自形-他形的充填-交代结构(图 5i、j),后期热液交代原来的磁铁矿和黄铁矿形成少量的赤铁矿(图 5k)。浸染状矿石中,磁铁矿一般晶形较好,粒度在 0.3~2.5 mm 之间,半自形-自形板柱状结构(图 5l),相对矿浆期(a1),黄铁矿晶形更好,为半自形-自形结构,含量更多,一般呈团块状(图 5a)和条带状或脉状

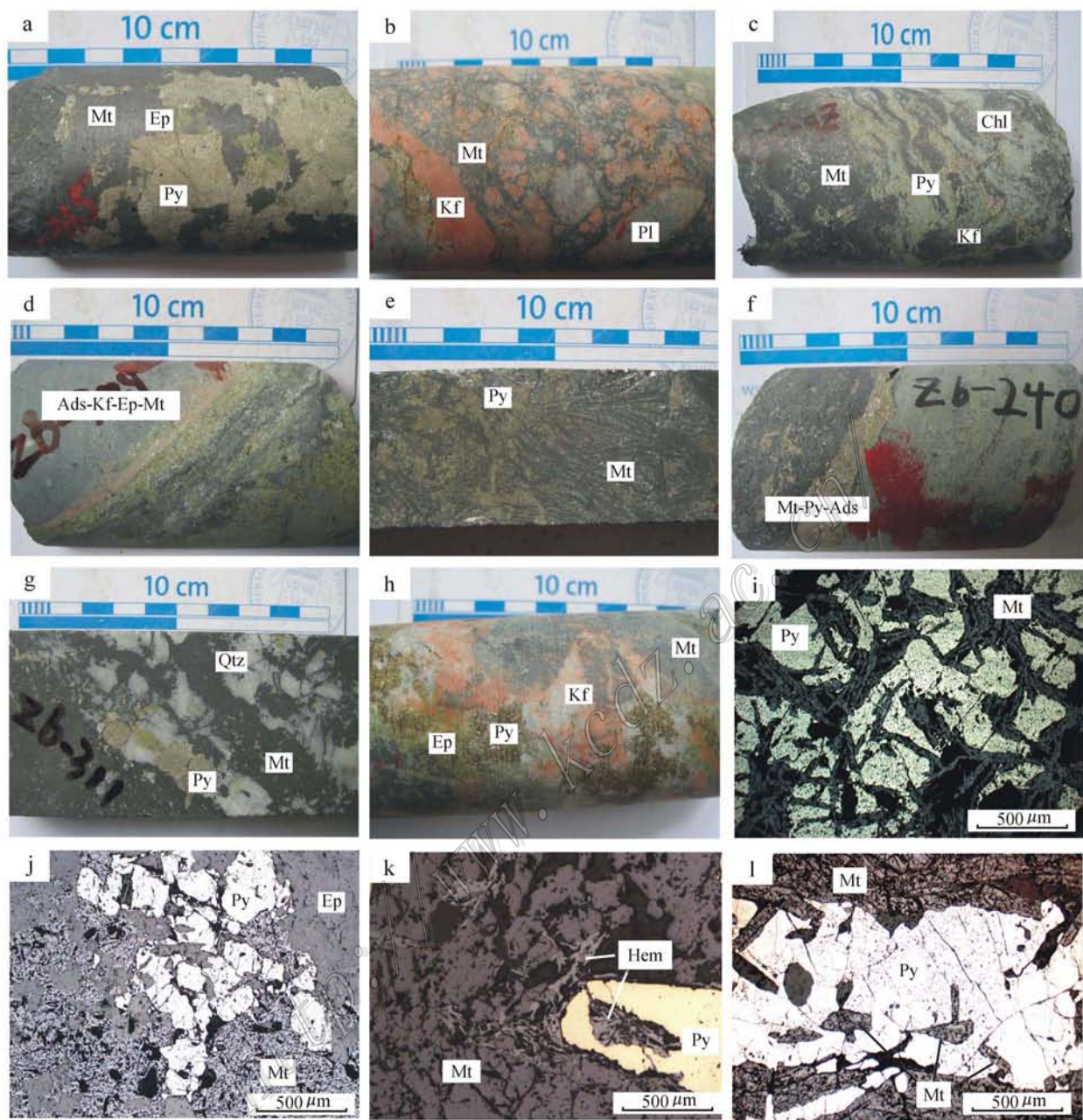


图5 智博铁矿热液型矿石特征

a. 块状磁铁矿石伴生团状黄铁矿; b. 浸染状磁铁矿石, 发育钾长石化; c. 纹层状磁铁矿石, 发育绿帘石化、绿帘石化; d. 围岩与脉状磁铁矿石的 Ads-Kf-Ep-Mt 过渡关系; e. 树枝状磁铁矿切穿早期的黄铁矿; f. 粗粒磁铁矿与安山岩的 Ads-Py-Mt 过渡关系; g. 浸染状磁铁矿, 与黄铁矿、石英共生; h. 稀疏浸染状磁铁矿石, 发育绿帘石化、钾长石化、碳酸盐化, 磁铁矿角砾被破碎; i. 反射光下, 细粒半自形板状磁铁矿与粗粒黄铁矿共生; j. 反射光下, 细粒他形磁铁矿与粗粒黄铁矿共生; k. 反射光下, 赤铁矿呈不规则状充填于磁铁矿和黄铁矿的晶隙间; l. 反射光下, 包含磁铁矿颗粒的脉状黄铁矿充填于半自形磁铁矿裂隙间

Mt—磁铁矿, Py—黄铁矿, Ep—绿帘石, Hem—赤铁矿, Ads—安山岩, Kf—钾长石, Qtz—石英, Pl—斜长石, Chl—绿帘石

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

a. Massive ore associated with massive pyrite; b. Disseminated ore associated with potash feldspathization; c. Laminated magnetite ore with chloritization and epidotization; d. Ads-Kf-Ep-Mt contact relationship between wall rock and veined ore; e. Dendritic magnetite cutting across early pyrite; f. Ads-Py-Mt contact relationship between andesite and coarse-grained magnetite; g. Disseminated magnetite ore associated with pyrite and quartz; h. Sparse disseminated magnetite ore associated with epidotization, potash feldspathization, carbonation, magnetite breccia broken; i. Fine-grained and subhedral magnetite associated with coarse-grained pyrite (under reflective light); j. Fine-grained and anhedral magnetite associated with coarse-grained pyrite (under reflective light); k. Hematite irregularly filling lattice voids of magnetite and pyrite (under reflective light); l. Veined pyrite containing magnetite particles filling gaps of subhedral magnetite (under reflective light)

Mt—Magnetite, Py—Pyrite, Ep—Epidote, Hem—Hematite, Ads—Andesite, Kf—K-feldspar, Qtz—Quartz, Pl—Plagioclase, Chl—Chlorite

表 1 智博铁矿床成矿期次划分及矿物生成顺序表

Table 1 Mineral-forming sequence and ore-forming stages of the Zhibo iron deposit

阶段 矿物	岩浆成矿期	热液成矿期	
	磁铁矿-透辉石-绿帘石阶段	磁铁矿-钾长石-绿帘石阶段	石英-硫化物阶段
透辉石 Di	●	●	
钠长石 Ab	●	●	
磁铁矿 Mag	●	●	
绿帘石 Ep	●	●	
阳起石 Act	●	●	
黄铁矿 Py	●	●	
黄铜矿 Ccp	●	●	
绿泥石 Chl	●	●	
电气石 Tur		●	
钾长石 Kfs		●	
赤铁矿 Hem		●	
方辉铜矿 Dg			●
石英 Qtz			●
方解石 Cal			●

分布,如黄铁矿充填早期磁铁矿的裂隙(图 5l),或者呈条带状分布于磁铁矿中或磁铁矿与围岩的接触过渡带(图 5f)。条带状矿石中(图 5c),磁铁矿一般呈纹层状或条带状产出,在手标本和露头上可见磁铁矿与钾长石化、绿帘石化互层产出,镜下磁铁矿多数呈半自形-自形板状产出,有一定定向排列(图 5i、l),大小 0.3~3 mm,磁铁矿裂隙或晶隙中常被黄铁矿充填,黄铁矿一般为他形团块状或脉状,颗粒较大。脉石矿物主要为绿帘石、绿泥石以及钾长石、阳起石、黄铁矿、黄铜矿等。② 石英-硫化物阶段(b2):出现石英-黄铁矿(黄铜矿)-碳酸盐的矿物组合,形成时间一般晚于磁铁矿,多形成浸染状的矿石(图 5g、h),绿帘石、绿泥石、钾长石、石英等矿物则比较常见,局部见碳酸盐矿物,磁铁矿多呈半自形粒状,颗粒一般不大,黄铁矿一般和石英一起出现在磁铁矿石的裂隙中或矿石与围岩的接触带上,围岩中偶见黄铁矿、黄铜矿及方辉铜矿颗粒(图 3h、i),局部可见少量石英脉和碳酸盐脉穿插、错断早期的矿物和岩石,脉宽 1~40 mm。

此外,在矿区发现的褐铁矿是在主体矿床形成之后,抬升至地表剥露,或者雨水沿裂隙渗入,使部分磁铁矿发生氧化,对整个矿床影响不大。局部黄铜矿氧化成孔雀石。

3 磁铁矿成分特征

3.1 样品采集及分析方法

笔者以东矿段见矿率较好的 24 勘探线为中心,沿着和垂直勘探线进行网格式采样,对个别钻孔(ZK2006、ZK4003)进行系统采样,此外,在中矿段部分钻孔进行选择性的采样,在室内观察薄片的基础上对其中 50 块样品中的磁铁矿进行了电子探针分析。电子探针测试分析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,氧化物分析条件为加速电压 5 kV、电流 20 nA、束斑直径 5 μm,标样采用天然矿物或合成金属国家标准,分析精度为 0.01%。

3.2 分析结果

60 点磁铁矿电子探针分析结果见表 2。矿石中全铁含量 $w(\text{FeO}_T)$ 86.32%~94.78%,平均 91.43%; $w(\text{SiO}_2)$ 0~3.61%,平均 1.00%; $w(\text{Na}_2\text{O})$ 0~0.28%,平均 0.04%; $w(\text{TiO}_2)$ 0~0.15%,个别样品达 3.24%,平均 0.08%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 0~0.71%,平均 0.14%; $w(\text{MgO})$ 0~0.53%,平均 0.12%; $w(\text{MnO})$ 0~0.14%,平均 0.04%; $w(\text{CaO})$ 0~0.99%,平均 0.18%; $w(\text{V}_2\text{O}_5)$ 0~0.35%,平均

表 2 智博铁磁铁矿电子探针分析结果
Table 2 Electron microprobe analyses of representative magnetite from the Zhibo iron deposit

样号	wt(B) %														总和
	CaO	Cr ₂ O ₃	FeO _T	K ₂ O	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Na ₂ O	NiO	P ₂ O ₅	SiO ₂	V ₂ O ₃		
ZB005-7	0.00	0.01	92.46	0.00	0.10	0.07	0.04	0.09	0.01	0.00	0.00	0.27	0.00	93.05	
ZB018-1	0.10	0.07	91.70	0.00	0.01	0.22	0.22	0.00	0.01	0.00	0.00	1.36	0.00	93.68	
ZB018-2	0.00	0.01	93.69	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	93.91	
ZB020-2	0.01	0.04	93.80	0.06	0.08	0.11	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	1.01	0.02	95.19	
ZB022-1	0.35	0.09	89.66	0.03	0.01	0.22	0.19	0.11	0.11	0.00	0.00	2.49	0.01	93.27	
ZB023-2	0.00	0.04	93.52	0.00	0.05	0.07	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	0.22	0.01	93.99	
ZB024-1	0.18	0.02	90.70	0.00	0.05	0.17	0.18	0.03	0.03	0.02	0.03	1.71	0.02	93.13	
ZB025-2	0.00	0.06	93.93	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	94.10	
ZB029-1	0.00	0.00	91.91	0.02	0.05	0.01	0.00	0.09	0.08	0.01	0.00	0.05	0.00	92.23	
ZB037-1	0.84	0.98	86.60	0.28	0.07	0.71	0.53	0.01	0.28	0.00	0.00	3.27	0.19	93.76	
ZB037-2	0.71	0.04	87.57	0.19	0.06	0.56	0.48	0.06	0.15	0.00	0.01	2.88	0.19	92.90	
ZB077-1	0.00	0.05	94.78	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.07	0.00	94.97	
ZB078-1	0.03	0.08	91.83	0.00	0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.51	0.01	92.56	
ZB083-2	0.93	0.01	88.54	0.28	0.00	0.35	0.51	0.03	0.08	0.00	0.02	3.61	0.06	94.43	
ZB098-2	0.01	0.09	92.31	0.00	0.15	0.01	0.00	0.00	0.17	0.00	0.02	0.30	0.17	93.21	
ZB122-1	0.01	0.06	94.51	0.02	0.01	0.06	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.33	0.08	95.12	
ZB160-1	0.99	0.00	88.32	0.06	0.09	0.53	0.52	0.04	0.16	0.00	0.00	3.25	0.00	93.97	
ZB160-2	0.42	0.03	91.26	0.02	0.05	0.21	0.29	0.09	0.03	0.02	0.00	1.82	0.00	94.23	
ZB171-1-1	0.35	0.01	89.62	0.03	0.00	0.25	0.17	0.02	0.08	0.00	0.00	2.03	0.03	92.58	
ZB171-1-2	0.00	0.03	92.70	0.03	0.00	0.00	0.00	0.10	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00	92.91	
ZB172-1	0.00	0.02	92.88	0.00	0.03	0.13	0.06	0.07	0.06	0.00	0.00	0.29	0.00	93.53	
ZB172-2	0.33	0.05	90.76	0.05	0.02	0.06	0.24	0.09	0.06	0.01	0.01	1.70	0.04	93.40	
ZB190-2	0.10	0.03	93.28	0.03	0.00	0.19	0.12	0.12	0.02	0.00	0.00	1.29	0.04	95.22	
ZB192-2	0.00	0.04	93.78	0.00	0.04	0.08	0.01	0.07	0.02	0.00	0.03	0.07	0.00	94.13	
ZB203-1-1	0.00	0.04	92.27	0.00	0.03	0.02	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.10	0.25	92.76	
ZB203-2-1	0.20	0.03	90.45	0.00	0.00	0.39	0.13	0.01	0.06	0.00	0.00	1.16	0.23	92.67	
ZB221-1	0.00	0.02	92.70	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.44	0.12	93.38	
ZB224-1-2	0.00	0.05	92.88	0.01	0.00	0.01	0.00	0.09	0.02	0.05	0.00	0.28	0.06	93.46	
ZB224-2-3	0.00	0.07	92.83	0.01	0.00	0.00	0.01	0.14	0.00	0.00	0.00	0.23	0.06	93.35	
ZB248-1	0.02	0.05	93.90	0.00	0.00	0.11	0.01	0.08	0.01	0.02	0.00	1.31	0.02	95.52	
ZB254-1	0.00	0.01	93.88	0.00	0.03	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.36	0.05	94.41	
ZB255-1-1	0.00	0.02	92.14	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.04	0.00	0.03	0.14	0.05	92.45	
ZB255-1-2	0.00	0.07	92.42	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.09	0.08	92.73	
ZB262-2-2	0.85	0.09	87.59	0.19	0.00	0.31	0.51	0.05	0.00	0.02	0.02	3.46	0.04	93.11	
ZB265-1-1	0.00	0.03	91.10	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.58	0.00	91.78	
ZB265-2-1	0.10	0.03	92.89	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.35	0.10	93.53	
ZB276-2-1	0.00	0.06	86.32	0.01	3.24	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.23	89.92	
ZB277-1-1	0.13	0.02	88.47	0.00	0.01	0.28	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	89.05	
ZB277-2-1	0.00	0.00	90.02	0.00	0.05	0.29	0.00	0.02	0.00	0.00	0.05	0.09	0.06	90.57	
ZB294-2	0.16	0.13	89.74	0.00	0.03	0.12	0.00	0.00	0.08	0.04	0.01	0.46	0.01	90.76	
ZB299-2-2	0.57	0.03	89.87	0.16	0.03	0.18	0.34	0.03	0.00	0.00	0.00	3.13	0.04	94.38	
ZB302-1-1	0.86	0.04	90.27	0.05	0.06	0.20	0.53	0.09	0.09	0.00	0.00	2.72	0.02	94.94	
ZB318-2	0.53	0.05	89.06	0.13	0.06	0.25	0.33	0.04	0.08	0.01	0.00	2.33	0.00	92.86	
ZB318-3	0.00	0.05	86.71	0.02	0.06	0.14	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.24	0.05	87.44	
ZB319-2-1	0.00	0.04	89.31	0.01	0.06	0.03	0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	0.04	0.04	89.57	
ZB319-2-2	0.30	0.04	89.06	0.24	0.06	0.46	0.28	0.04	0.09	0.00	0.00	2.83	0.01	93.40	
ZB340-1	0.00	0.04	93.98	0.00	0.05	0.06	0.04	0.07	0.00	0.00	0.00	0.55	0.08	94.88	
ZB384-1	0.00	0.02	92.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.43	0.06	93.36	
ZB392-1-1	0.48	0.09	87.89	0.02	0.00	0.25	0.38	0.04	0.08	0.00	0.00	2.05	0.02	91.30	
ZB399-2	0.00	0.00	93.70	0.00	0.05	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00	0.03	0.01	0.05	93.90	
ZB409-1-2	0.00	0.03	93.01	0.00	0.00	0.06	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	0.29	0.33	93.79	
ZB417-1-1	0.45	0.06	91.20	0.00	0.01	0.26	0.34	0.06	0.16	0.04	0.00	1.95	0.00	94.52	
ZB417-2-1	0.37	0.03	91.10	0.00	0.00	0.10	0.22	0.04	0.03	0.13	0.01	1.60	0.00	93.61	
ZB4202-1	0.00	0.07	92.61	0.01	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00	0.07	0.01	0.26	0.35	93.44	
ZB427-1	0.24	0.03	92.81	0.03	0.08	0.55	0.15	0.05	0.00	0.00	0.04	1.20	0.08	95.26	
ZB435-1	0.19	0.06	90.65	0.01	0.00	0.18	0.22	0.05	0.07	0.00	0.01	1.47	0.03	92.94	
ZB468-1-2	0.00	0.04	92.72	0.00	0.03	0.01	0.01	0.08	0.01	0.00	0.02	0.05	0.07	93.05	
ZB491-1-1	0.10	0.04	92.51	0.02	0.00	0.11	0.09	0.02	0.04	0.00	0.00	0.79	0.01	93.72	
ZB491-1-2	0.00	0.05	93.56	0.00	0.01	0.04	0.00	0.06	0.01	0.06	0.01	0.00	0.00	93.80	
ZB491-2-1	0.00	0.07	93.47	0.00	0.00	0.02	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	93.65	

表中 FeO_T 表示全铁 ,总和为表中氧化物含量之和 ,SO₃ 等氧化物未列入。

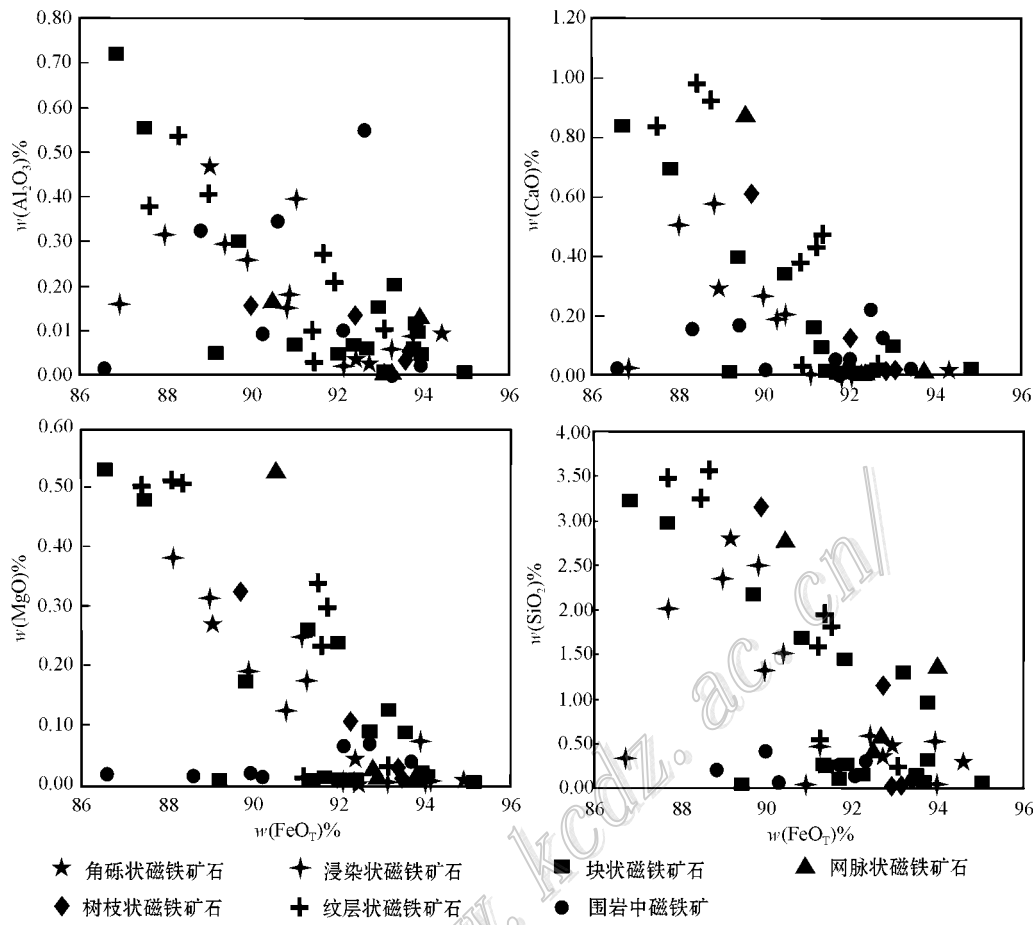


图 6 智博铁矿床磁铁矿中氧化物相关图解

Fig. 6 Correlogram of oxides in magnetite from the Zhibo iron deposit

0.06 % ; $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 0~0.98 % ,平均 0.06 % ;K、P、Ni 含量很低 ,大多处于检测限以下。

智博铁矿的磁铁矿石中全铁 $w(\text{FeO}_T)$ 与 $w(\text{SiO}_2)$ $w(\text{CaO})$ $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ $w(\text{MgO})$ 整体上均呈负相关 (图 6) ,块状、浸染状、纹层状矿石以及围岩或夹石中的磁铁矿 $w(\text{FeO}_T)$ 分布范围较大 ,大部分含量在 90 % 以上 ,角砾状、网脉状、树枝状矿石的 $w(\text{FeO}_T)$ 分布相对比较集中 ,多数在 90 % ~ 92 % 之间。

目前国内学者常利用陈光远 (1987) 的 TiO_2 - Al_2O_3 - MgO 成因图解 (图 7) 对矿石中磁铁矿成分组成进行分析来判别磁铁矿的成因类型。但电子探针分析对磁铁矿来讲 ,除 Fe 之外的元素均为微量元素 ,精度有限 ,其电子探针分析结果仅可以作为参考。智博矿区的网脉状、树枝状和纹层状矿石都落在图中的沉积变质-接触交代 (矽卡岩) 区 ,而块状、浸染状、角砾状矿石及围岩或夹石中的磁铁矿在沉积变质-接触交代区、超基性-基性-中性岩浆区、酸性-碱性岩浆区

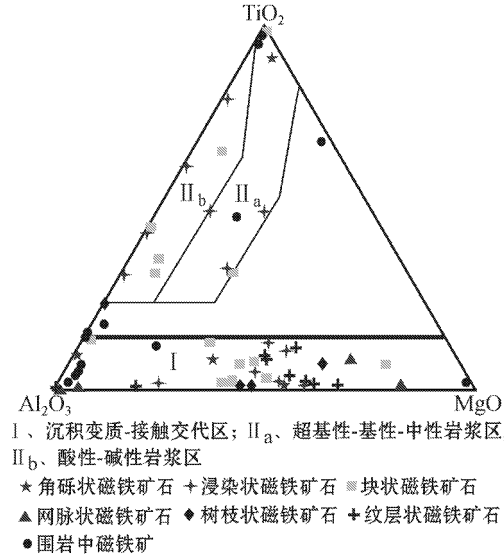


图 7 智博铁矿磁铁矿 TiO_2 - Al_2O_3 - MgO 成因图解 (据陈光远 ,1987)

Fig. 7 Ternary plots of TiO_2 - Al_2O_3 - MgO of magnetite from the Zhibo iron deposit (modified after Chen , 1987)

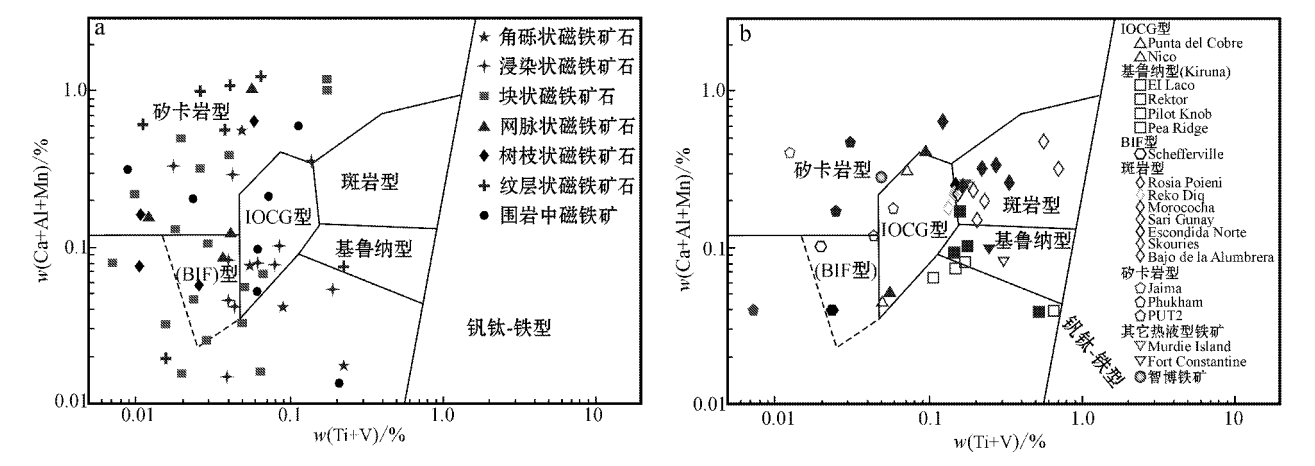


图 8 铁氧化物 $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$ 与 $\text{Ti} + \text{V}$ 判别图解

图 8a 为智博铁矿的铁氧化物成分的 $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$ 与 $\text{Ti} + \text{V}$ 图解, 图 8b 为世界不同成因类型铁矿的铁氧化物成分的平均组成 $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$ 与 $\text{Ti} + \text{V}$ 图解, 实心符号代表磁铁矿(底图和除智博以外的数据均引自 Dupuis et al., 2011)

Fig. 8 $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$ versus $\text{Ti} + \text{V}$ discriminant diagram showing spot analyses of magnetite

Fig. 8a showing Fe-oxide from Zhibo iron ore, and Fig. 8b showing average compositions of Fe-oxide in various deposit types, solid symbol represents Zhibo (base map and other data after Dupuis et al., 2011)

性-碱性岩浆区均有分布。

国外学者 Dupuis 等(2011)对不同成因类型的典型铁矿床的铁氧化物中微量元素进行了对比研究, 提出用铁氧化物中微量元素 $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$ 与 $\text{Ti} + \text{V}$ 判别图解(图 8)可以判断一些矿床的成矿类型。智博矿区的大多数样品落入矽卡岩(接触交代)型, 角砾状、块状、浸染状矿石以及围岩中的磁铁矿部分落入 BIF 型和 IOCG 型。

4 讨论

4.1 磁铁矿成分特征

不同成因类型的铁矿石中的磁铁矿成分组成具有典型特征(徐国凤等, 1979), 磁铁矿中的 V_2O_5 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Cr_2O_3 、 MnO 、 CaO 等化学组分对判定矿床成因类型有一定的指示意义。智博铁矿床的磁铁矿 $w(\text{TiO}_2)$ 0~0.15%, 多数在 0.01%~0.06% 之间, 接近于徐国凤等(1979)统计的接触交代矿床铁矿石的下限; $w(\text{V}_2\text{O}_5)$ 多数高于 0.01% 的检测限, 最高 0.35%, 一般 0.01%~0.19%, 与接触交代矿床和热液交代矿床相似; $w(\text{MnO})$ 0~0.14%, 平均 0.04%, 与热液交代矿床相似; $w(\text{CaO})$ 0~0.99%, 平均 0.18%, 与热液交代矿床中的细粒块状矿石接近。

智博铁矿的磁铁矿石中全铁(FeO_T)含量与其他次要组分的关系见图 6。由该图可见, 磁铁矿石中 FeO_T 与 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 SiO_2 整体上均呈负相关。围岩或夹石中的磁铁矿的 FeO_T 的变化范围相对较大, SiO_2 、 CaO 、 MgO 的含量较低且变化不大, 与 Al_2O_3 的含量关系整体趋势也是负相关, 角砾状矿石的 $w(\text{FeO}_T)$ 多数在 92% 以上, 其他氧化物含量很低; 浸染状矿石和块状矿石的 $w(\text{FeO}_T)$ 变化范围较大, 前者集中分布在 88%~92%, 后者集中分布在 89%~94% 之间。与其他氧化物呈明显的负相关, 应该是两期矿石中都有这些类型的矿石, 但热液期块状矿石较少; 网脉状和树枝状矿石的分布情况比较类似, 这两种样品的手标本上多见热液活动叠加改造的迹象, 因此 $w(\text{FeO}_T)$ 多集中在 90%~92% 之间, 其他氧化物含量除个别样品外较其他类型的矿物较少; 纹层状矿石的 FeO_T 含量比较有特征, 分布较广但集中在 88% 和 92% 左右, Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 SiO_2 含量较高, 尤其 $w(\text{CaO})$ 和 $w(\text{SiO}_2)$ 平均可达 0.50% 和 2.07%, 远高于平均值, 可能是岩浆热液与大哈拉军山组偏中-酸性的火山岩发生高温热液蚀变反应, 从火山岩中萃取大量的 Al、Ca、Mg、Si、Fe 等元素, 使磁铁矿与绿泥石、绿帘石、钾长石等脉石互成流动纹层状, 而另一部分样品中磁铁矿与黄铁矿互层出现。综上, 早期一些类型的矿石 FeO_T 含量比晚期含量高, 晚期矿石中 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 SiO_2 相对含量较高些, 一般认为 FeO_T 与 SiO_2 、 MgO 这种负

相关性反映了相对酸性的环境不利于磁铁矿的形成,而相对基性的环境则有利于磁铁矿的生成(张志欣等,2011;洪为等,2012a)。

在磁铁矿的 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 成因图解(图7)中,角砾状矿石分布在中基性岩浆趋势区,部分落入沉积变质-接触交代磁铁矿趋势区,可能是由于早期形成的矿体被晚期的热液破碎交代影响所致,块状矿石和浸染状矿石中的磁铁矿较平均的分布在岩浆趋势区和沉积变质-接触交代区,这也与手标本上见到两期成矿现象可以相互印证。网脉状、树枝状和纹层状矿石都落入了沉积变质-接触交代区,说明这部分样品是晚期热液形成的,或者是原来的矿石受热液交代作用叠加改造而成。围岩或者夹石中的磁铁矿分布在两个区域内,说明磁铁矿并非单一成因。

Dupuis 等(2011)对铁氧化物中微量元素进行了深入研究,认为 $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$ 与 $\text{Ti} + \text{V}$ 能很好区分铁氧化物-铜-金型(IOCg)、基鲁纳型、斑岩型、矽卡岩型、BIF 型和钒钛-铁型的铁矿床。而在智博铁矿的 $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$ vs $\text{Ti} + \text{V}$ 图解中(图8),大部分样品落入矽卡岩型铁矿的区域,反映了大多数样品经过了一个热液的接触交代作用,少部分样品落入沉积变质型和 IOCg 型铁矿区域内。铁氧化物-铜-金(IOCg)型矿床是含有大量低 Ti 磁铁矿和(或)赤铁矿的矿床,并伴有黄铜矿±斑铜矿,与一定的构造-岩浆环境有关,IOCg 型矿床与深成侵入岩及同时期活动的断裂有密切的关系(Sillitoe, 2003; 毛景文等, 2008)。智博铁矿的样品落入其中,暗示成矿可能与岩浆活动有关。

4.2 矿床成因讨论

关于智博铁矿床的成因认识目前主要有2种,一是火山热液型(田敬全等,2009),另一种是岩浆矿床(主要)和热液矿床(次要)的复合型矿床(冯金星等,2010),换言之就是岩浆-热液型矿床。笔者搜集了国内几种成因类型的典型铁矿床的地质特征,并与智博铁矿做了对比。智博铁矿与姑山、攀枝花等岩浆型铁矿都产于中基性的岩浆岩中,矿体的形态类似,均为似层状、透镜状,规模较大(顾连兴等,1996;刘佳林等,2011;李文臣,1992),但矿物组合和蚀变特点方面,智博铁矿少磷灰石而多绿帘石、钾长石和阳起石。与长江中下游的矽卡岩类型矿床对比(姚磊等,2012;熊鹏飞等,1984;翟裕生等,1982;段超等,2012),智博铁矿床与大冶、程潮铁矿床区别最大之处就是围岩并非碳酸盐岩,矿物组合中少见石

榴子石、符山石、方柱石、云母等矿物而相对较多发育钾长石化。智博铁矿与凹山铁矿在矿体特征、矿物组合、蚀变类型上有很大的相似性,但赋矿围岩存在差异,脉石矿物少见石榴子石和磷灰石。大红山铁矿矿体受火山构造控制,围岩主要为碳酸盐岩(欧阳沙怀,1983),这点和智博铁矿显著不同,而矿石组合和蚀变特征等方面都具有可比性。

翟裕生等(1982)总结了一些岩浆型(或岩浆型)铁矿的特征:矿体为脉状、层状、透镜状并受断裂和接触带控制,矿体与围岩有明显而截然的界线,矿体边缘有弧形焊接边,矿石多为致密块状,气孔状矿石是岩浆型矿床的重要证据,主要矿石矿物有磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿并伴生有硫化物,含有较高的 V、Ti、Co、Ni 等,矿体中包含有未被蚀变的围岩角砾,也说明成矿流体为比重大而黏稠的矿浆,存在透辉石等高温伴生矿物也属岩浆成矿标志。智博铁矿床的赋矿围岩为石炭系大哈拉军山组一套火山岩,矿体的顶底板基本为发育绿帘石化和钾长石化的安山岩,局部磁铁矿与围岩的界线截然,几乎没有任何过渡(图4g),并且矿体厚度较大,以层状、似层状为主(图2c),矿石成分简单、品位高,比较大的几个矿体品位在50%左右,最高可达65%左右,早期矿石含有少量黄铁矿(图4b),局部矿石发育气孔状和杏仁状构造(图4f),或伴生有透辉石(图4h)等高温矿物,透辉石常与角砾状磁铁矿和浸染状磁铁矿伴生,发育在矿体底部和周边。早期磁铁矿以中-细粒、他形-半自形结构,块状、浸染状构造为主(图4b、c),围岩主要发育绿帘石化、阳起石化等蚀变,矿物组合和蚀变类型相对比较简单,比较符合岩浆成因的特征。冯金星等(2010)获得智博矿石和中基性火山岩之间的稀土元素特征及配分曲线、微量元素特征及配分曲线,均表现出较好的相似性,并且两者的 Pb 同位素亦表现出良好的相关性,因此认为智博矿床为岩浆成因,其成矿母浆为玄武质岩浆。

古生代西天山火山活动频繁(张作衡等,2008),大哈拉军山组的基性-中性-酸性系列的火山-沉积岩反映了火山活动的多期次性和旋回性。早期的中基性火山岩和岩浆型矿石形成之后,后期火山活动仍在继续,使矿区发育大量小型的断裂和裂隙,错断早期的地层和矿体,富 K、偏中-酸性的火山热液沿着裂隙运移、充填、结晶分异形成新的纹层状、网脉状矿石或者交代周围的地层和早期的矿体,生成电气石等矿物并使围岩发育条带状、团块状、脉状钾长石

化及绿帘石化、绿泥石化、阳起石化。早期的矿石受热液交代作用发生重结晶,使磁铁矿和黄铁矿颗粒变粗大,晶形更好,出现树枝状磁铁矿。晚期偏酸性的火山热液活动对矿体进行了破坏和改造,使局部围岩发育团块状硅化和碳酸盐化或形成细脉充填于裂隙中。

5 结 论

(1) 智博铁矿床赋存于石炭系大哈拉军山组玄武质安山岩、安山岩中。矿体主要呈层状、似层状、透镜状,金属矿物以磁铁矿为主,含少量黄铁矿、赤铁矿及零星黄铜矿。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、板条状结构。

(2) 根据矿石组构和矿物共生特征,智博铁矿床可以划分为岩浆期和热液期2个成矿期,进一步可以划分为磁铁矿-透辉石-绿帘石阶段、磁铁矿-钾长石-绿帘石阶段、石英-硫化物阶段3个成矿阶段。

(3) 岩浆期的磁铁矿多以中-细粒、他形-半自形结构,块状、浸染状构造, FeO_T 、 V_2O_5 含量相对较高为特征,矿石构造类型少但含量非常多;热液期的磁铁矿多呈中-粗粒、半自形-自形板状结构,浸染状、纹层状构造, Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 SiO_2 等含量相对较多。通过与国内其他成因类型的典型铁矿床的对比研究,结合矿床地质特征和磁铁矿成分特征,初步认为智博铁矿床与火山热液活动有密切的成因联系,既有岩浆作用的成矿,也有火山热液接触交代作用的成矿,两种作用都对成矿做出重要的贡献。

志 谢 野外工作期间得到了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和帮助,电子探针分析实验得到中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇老师和中国地质大学(北京)王枫硕士、陈晓丹硕士等的指导,审稿专家提出许多宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献/References

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.
陈光远. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社. 1-874.

段 超,李延河,袁顺达,胡明月,赵令浩,陈小丹,张 成,刘佳林. 2012. 宁芜矿集区凹山铁矿床磁铁矿元素地球化学特征及其对成矿作用的制约[J]. 岩石学报, 28(1): 243-257.
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,阮惠础,尹 琳. 1996. 安徽省姑山铁矿床中赤铁矿微晶的聚合[J]. 地质论评, 43(3): 275-277.
何国琦,成守德,徐 新,李锦轶,郝 杰. 2004. 中国新疆及邻区大地构造图(1:250 000)说明书[M]. 北京: 地质出版社. 1-65.
洪 为,张作衡,蒋宗胜,李凤鸣,刘兴忠. 2012a. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床磁铁矿和石榴石微量元素特征对矿床成因的制约[J]. 岩石学报, 28(7): 2089-2102.
洪 为,张作衡,赵 军,王志华,李凤鸣,石福品,刘兴忠. 2012b. 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.
姜常义,吴文奎,谢广成,李伍平. 1993. 西天山北部石炭纪火山岩特征与沟弧盆体系[J]. 岩石矿物学杂志, 12(3): 224-231.
姜常义,吴文奎,张学仁,崔尚森. 1995. 从岛弧向裂谷的变迁——来自阿吾拉勒地区火山岩的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 14(4): 289-300.
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,钱 青,高 俊,苏 文,张 喜,刘 新,江 拓. 2010. 西天山昭苏东南部阿登套地区大哈拉军山组火山岩及花岗岩侵入体的地球化学特征、时代和构造环境[J]. 岩石学报, 26(10): 2913-2924.
李文臣. 1992. 攀枝花钒钛磁铁矿床地质及其成因[J]. 地质与勘探, 10: 18-21.
李永军,李注仓,周继兵,高占华,高永利,佟黎明,刘 静. 2009. 西天山阿吾拉勒一带石炭系岩石地层单位厘定[J]. 岩石学报, 25(6): 1332-1340.
李注仓,李永军,李景宏,栾新东,郭文杰. 2006. 西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造环境分析[J]. 新疆地质, 24(2): 120-124.
刘佳林,毛景文,段 超,张 成,姚 磊,郑佳浩. 2011. 宁芜盆地姑山铁矿床地质特征及其成因研究[J]. 矿物学报, 增刊: 61-62.
刘 静,李永军,王小刚,郭文杰. 2006. 西天山阿吾拉勒一带伊什基里克组火山岩地球化学特征及构造环境[J]. 新疆地质, 24(2): 105-108.
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,余金杰,袁顺达,程彦博,谢桂青,侯可军,向君峰,杨宗喜. 2008. 铁氧化物-铜-金(IOC型)矿床: 基本特征、研究现状与找矿勘查[J]. 矿床地质, 27(3): 267-278.
欧阳少怀. 1983. 云南大红山铜、铁矿床主要地质特征和矿床成因探

- 讨[J]. 大地构造与成矿学, 7(4): 335-344.
- 邵铁全, 石莹, 靳红, 郭文杰. 2006. 新疆西天山大哈拉山组火山岩岩石化学特征及地质意义[J]. 新疆地质, 24(3): 218-222.
- 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: 88-91.
- 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 徐学义, 董云鹏, 李向民. 2002. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据[J]. 地质通报, 21(2): 55-62.
- 熊鹏飞, 王定域, 石准立, 张尊光, 黄克宽, 金振民, 封之龙. 1984. 湖北大冶铁矿矿床控矿地质条件的分析[J]. 地球科学, 4: 81-88.
- 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.
- 杨金中, 赵玉灵, 王永江, 姜晓玮. 2003. 新疆西天山大哈拉山组的沉积环境及其与成矿的关系[J]. 地质与勘探, 39(2): 1-5.
- 姚磊, 谢桂青, 张承帅, 刘佳林, 杨海波, 郑先伟, 刘晓帆. 2012. 鄂东南矿集区程潮大型矽卡岩铁矿的矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(1): 133-146.
- 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.
- 张志欣, 杨富全, 罗五仓, 刘锋, 柴凤梅, 吕书君, 欧阳刘进, 姜丽萍. 2011. 新疆阿尔泰山吐布拉克铁矿床矽卡岩矿物特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(2): 276-280.
- 张作衡, 王志良, 左国朝, 王龙生, 刘敏, 甘甫平, 王见蓓, 张长青. 2008. 新疆西天山地质构造演化及铜金多金属矿床成矿环境[M]. 北京: 地质出版社. 1-251.
- 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, 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.
- 朱永峰. 2009. 中亚成矿域地质矿产研究的若干重要问题[J]. 岩石学报, 25(6): 1297-1302.
- 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]. 地质前缘, 18(2): 170-179.
- 左国朝, 张作衡, 王志良, 刘敏, 王龙生. 2008. 新疆西天山地区构造单元划分、地层系统及其构造演化[J]. 地质论评, 54(6): 748-769.
- Allen M B, Windley B F and Zhang C. 1992. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia[J]. Tectonophysics, 220: 89-115.
- Dupuis C and Beaudoin G. 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types[J]. Mineralium Deposita, 46: 319-335.
- Sillitoe R H. 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view[J]. Mineralium Deposita, 38: 787-812.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, Zhao Z Y and Wang G R. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia[J]. Geology, 18(2): 128-131.
- Xiao W J, Windley B, 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, 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 Z H, Hong W, Jiang Z S, Duan S G, Xu L G, Li F M, Guo X C and Zhao Z G. 2012. Geological characteristics and zircon U-Pb dating of volcanic rocks from the Beizhan iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 86(3): 737-747.