

# 东天山红云滩铁矿床矿物学、矿物化学特征 及矿床成因探讨

张立成<sup>1,2</sup>, 王义天<sup>2</sup>, 陈雪峰<sup>3</sup>, 马世青<sup>3</sup>, 王志华<sup>2</sup>, 余长发<sup>2</sup>

(1. 辽宁省冶金地质勘查局地质勘查研究院, 辽宁鞍山 114000; 2. 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一地质大队, 新疆鄯善 838204)

**摘要:** 东天山红云滩铁矿赋存于下石炭统雅满苏组火山碎屑岩地层中。矿体主要呈层状、似层状、透镜状。矿石矿物以大量磁铁矿为主, 含少量的磁赤铁矿、镜铁矿、黄铁矿和极少量的黄铜矿等。脉石矿物主要有石榴石、透辉石、阳起石、绿帘石、绿泥石、黑云母、钠长石、石英等。矿石构造以块状构造和浸染状构造为主, 局部为条带状构造、脉状构造, 矿石结构包括半自形-他形粒状结构、交代结构。围岩蚀变对称分带明显, 从矿化体到两侧围岩, 蚀变呈现从深色到浅色的变化现象。根据矿物共生组合、矿石结构的观察, 本次工作识别出矽卡岩期和热液期两个成矿期, 进一步细分为4个成矿阶段: 矽卡岩阶段、退化蚀变阶段(主成矿期)、热液早期阶段及石英-硫化物阶段。电子探针分析表明石榴石端员组分以钙铁石榴石-钙铝石榴石系列为主, 辉石端员组分以透辉石-钙铁辉石为主, 角闪石端员组分主要为阳起石和透闪石, 这些特点表明矿区矽卡岩为热液交代钙矽卡岩。磁铁矿的主、微量元素特征表明其形成与矽卡岩密切相关。结合成矿地质特征, 认为矽卡岩是由富铁岩浆热液流体沿断裂构造运移、交代下石炭统雅满苏组富钙火山碎屑岩地层而形成的, 磁铁矿的形成与矽卡岩的退化变质作用有关。

**关键词:** 磁铁矿, 矽卡岩, 化学组分标型, 红云滩铁矿床, 东天山

中图分类号: P578.4<sup>+</sup>6; P575.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)04-0431-19

## Mineralogy, mineral chemistry and genesis of the Hongyuntan iron deposit in East Tianshan Mountains, Xinjiang

ZHANG Li-cheng<sup>1,2</sup>, WANG Yi-tian<sup>2</sup>, CHEN Xue-feng<sup>3</sup>, MA Shi-qing<sup>3</sup>, WANG Zhi-hua<sup>2</sup> and  
YU Chang-fa<sup>2</sup>

(1. Geological Exploration Research Institute, Metallurgical Geological Exploration Bureau of Liaoning Province, Anshan 114000, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. No. 1 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Shanshan 838204, China)

**Abstract:** The Hongyuntan iron deposit is hosted in pyroclastic rocks of the Lower Carboniferous Yamansu Formation. The ore bodies occur as layers, stratoid bodies or lenses. The principal ore mineral is magnetite, together with minor maghemite, specularite, pyrite and trace chalcopyrite. The gangue minerals include garnet, diopside, actinolite, chlorite, tremolite, epidote, biotite, albite and quartz. The ore structures are mainly of massive and disseminated forms, with occasional banded or veined forms. The ore textures are of subhedral-anhedral granular and metasomatic types. The wall rock alteration shows symmetrical zoning, and the alteration colors change

收稿日期: 2013-01-05; 修订日期: 2013-05-24

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(1212011085527)

作者简介: 张立成(1984-), 硕士研究生, 矿床学专业, E-mail: zhanglicheng365@126.com; 通讯作者: 王义天(1969-), 博士, 研究员, 从事构造与成矿研究, E-mail: wyt69@263.net

from dark to light from ore bodies outwards. On the basis of observed mineral assemblages and ore fabrics, two periods of ore deposition were recognized, i. e., skarn period and hydrothermal ore-forming period, which could be further subdivided into four metallogenic stages, namely skarn stage, retrograde alteration stage (main ore-forming stage), early hydrothermal stage and quartz-sulfide stage. Electron microprobe analyses show that the end member of garnet is mainly andradite-grossularite. The composition of pyroxene is mainly diopside-astroite. The amphiboles is composed mainly of actinolite and tremolite with minor magnesiohornblende. The composition of these skarn minerals suggests that skarn in the Hongyuntan iron deposit is calcic skarn, belonging to metasomatic skarn. The characteristics of main and trace elements suggest that the formation of magnetite was closely related to the skarn. In combination with geological characteristics, the authors suggest that the skarn might have resulted from interaction between Ca-rich pyroclastic and Fe-rich magmatic hydrothermal fluid which was transported along the fault system. The formation of magnetite was hence related to the regressive metamorphism of the skarn.

**Key words:** magnetite; skarn; chemical composition typomorphy; Hongyuntan iron deposit; East Tianshan Mountains

新疆东天山造山带中的觉罗塔格成矿带是我国重要的多金属成矿带之一,在其下石炭统雅满苏组地层中赋存了一系列中小型的铁矿床(姜福芝等, 2002; 冯京等, 2009),自西向东依次分布有阿奇山、红云滩、铁岭、彩虹山、百灵山、赤龙峰、骆驼峰、库姆塔格、雅满苏等铁矿床(图 1),显示了巨大的成矿潜力和良好的找矿前景。其中,红云滩铁矿在 1988 年就已经有了小规模露天民采,1994 年新疆地矿局第一地质大队开始对其进行正规开采,之后在 2006 年和 2008 年两次对其进行资源储量核实,现该矿床的资源量已达中型规模<sup>①</sup>。但目前对其研究程度较低,关于矿床成因还存在分歧。王正廷(1980)根据矿床的地质特征及硫同位素特征认为该矿床是多次火山蚀变和接触变质叠加火山喷发堆积成因;也有人根据区域成矿特点认为该矿床是海相火山岩型(徐仕琪等, 2011)、火山气液型(张成和等, 1980)及接触交代矽卡岩型(王登红等, 2006)等。吴昌志等(2006)对矿区花岗岩的年代学和地球化学开展了研究,认为其形成于早-中石炭世的岛弧环境。张增杰等(2012)对矿石的稳定同位素进行了系统的研究,氢、氧同位素表明从成矿前到成矿后,成矿流体均有大气降水的参与,硫同位素表明成矿物质具有幔源的特征。总之,研究者普遍认为该矿床的成矿作用与岩浆作用有关,但具体是火山活动还是侵入活动则存在分歧。磁铁矿体伴随着大量的矽卡岩化,但

对矽卡岩矿物及磁铁矿的矿物学及矿物地球化学研究还处于空白,这不利于矿床成因研究及进一步找矿勘查工作。鉴于此,本次开展了矿物学和矿物地球化学研究工作,重点是对矿体及矿体附近的矽卡岩矿物和磁铁矿的主量元素以及微量元素特征进行系统的研究,探讨矽卡岩的形成机制及其与铁矿的关系,为进一步研究觉罗塔格成矿带中铁矿床的成矿机制和成矿规律提供新依据。

## 1 区域地质背景

东天山造山带觉罗塔格成矿带西起托克逊以东,东至甘肃-新疆交界,呈近东西走向,长约 520 km,宽 40~60 km,南以阿克库都克-沙泉子断裂为界与中天山地块相邻,北以大南湖-大草滩断裂为界与吐哈地块相连。三条近东西向的大型断裂带奠定了觉罗塔格成矿带的基本构造格架,自北向南依次为康古尔-黄山断裂带、雅满苏-苦水断裂带和阿克库都克-沙泉子断裂带,将觉罗塔格成矿带分为三个亚成矿带即北部的大南湖-头苏泉岛弧成矿带(北带)、中部的康古尔-黄山剪切成矿带(中带)和南缘的阿奇山-雅满苏岛弧成矿带(南带)(马瑞士等, 1993; 姬金生等, 1994; 周济元等, 1994; 杨兴科等, 1999)。红云滩铁矿床就位于阿奇山-雅满苏岛弧带成矿带西南缘的阿奇山背斜的东南翼(图 1)。

① 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局. 2009. 新疆鄯善县红云滩铁矿二期资源储量核实报告. 内部资料.



凝灰岩围绕核部地层呈封闭状分布。东端倾角 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ,西端倾角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。两翼在岩石的蚀变和铁矿化方面均有明显差异,北翼岩石蚀变强烈,铁矿化较强,因而铁矿体分布也较多,尤其在东端转折部位蚀变和铁矿化均强烈,是赋矿的最主要地段,南翼岩石蚀变和铁矿化均较微弱,加之被花岗岩体破坏而出露不完整。向斜构造中发育有北东向、北西向及北东东向三组断裂。其中北东向断裂是矿区内的主要控矿构造。

矿区岩浆岩发育,侵入岩分布极为广泛,属于红云滩岩体的一部分,主要有3期岩浆活动:第一期中性侵入岩,岩性变化较大,岩性主要有闪长岩、石英闪长岩,局部为含石英辉长闪长岩,各种岩性之间均呈逐渐过渡的关系,在矿区的北部、东部及西部均有出露;第二期酸性侵入岩,即花岗闪长岩、钾长花岗岩、二长花岗岩、石英正长岩,广泛出露于矿区南部和东部。第二期侵入体为复式岩体的主体部分,常见有侵入于第一期岩体内的现象,接触面清晰,对地层和闪长岩体混染作用强烈;第三期浅成岩脉,包括闪长玢岩、石英钠长斑岩、辉绿玢岩、花岗细晶岩、电气石细晶岩及花岗斑岩等,主要沿北东、北东及北西向三组断层充填。一般长约数十米至数百米,最长可达1000多米,一般宽约2~10 m。在地表和钻孔内均见有岩脉穿切矿体的现象,说明其形成应在成矿期之后。

## 2.2 矿体特征

铁矿体(矿化体)主要产于雅满苏组第一岩性段的II岩性层呈不均匀互层的安山质凝灰岩与凝灰质粉砂岩的地层中(图2a、2b)。共有I~V号5个矿带,呈层状、似层状、透镜状分布,倾向北西,倾角 $20^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 不等,与地层一般有 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 交角。矿石品位45%~58%。矿体受北东向构造裂隙控制明显,在平面上平行排列,在剖面上雁列式出现。近地表矿体规模小、连续性差但品位高,往深部矿体规模大、连续性好但品位低。对于单个矿体具有“中富边贫、上富下贫”的特点。单个矿体长一般在100~300 m之间,最大可达540 m,平均厚度达6~12 m。

## 2.3 矿石特征

矿区的矿石类型按成因分为矽卡岩型和热液型两种,分述如下:

(1)矽卡岩型矿石:磁铁矿一般与阳起石、透闪石、绿帘石、镁角闪石、绿泥石等含水矽卡岩矿物共

生,也常见交代石榴石、透辉石等无水矽卡岩矿物。一般呈中细粒( $<0.1\text{ mm}$ ),半自形-他形粒状结构、交代结构、似海绵陨铁结构,通常以致密块状、稠密浸染状和少量条带状产出,构成主矿体。

半自形-他形粒状结构:磁铁矿绝大多数为此种结构,尤其在富矿石中,半自形-他形细粒状磁铁矿(图3a)颗粒呈最紧密排列,形成块状构造的矿石(图3b)。

交代结构:磁铁矿、绿帘石交代石榴石内部及边部(图3c、3d),磁铁矿、角闪石交代透辉石(图3e),黄铁矿沿磁铁矿边部进行交代(图4d)等。

似海绵陨铁结构:磁铁矿交代石榴石,当交代作用非常强烈时,使石榴石呈彼此孤立的球状或似等轴状,磁铁矿成胶结物状,而形成似海绵陨铁结构。此种结构类型为石榴石型贫矿所特有。

块状构造:由细粒和少量粗粒的磁铁矿,组成颗粒紧密排列的致密块状矿石。是本区最常见的一种构造类型,多组成富矿石(图3b)。

稠密浸染状构造:磁铁矿微细颗粒,在脉石基质中呈密度不等的浸染状分布(图3f、3d)。

条带状构造:磁铁矿与绿帘石呈条带状分布,在矿体的局部地区少量出现(图3g)。

(2)热液期矿石:这类磁铁矿常伴随有石英、钠长石及少量黑云母、钾长石等蚀变,一般位于矿体的边缘部位,或者沿断裂裂隙分布呈细脉状(图4b、4c)定向的浸染状(图4d)等产出。一般不构成独立矿体。黄铁矿一般为中细粒( $>0.1\text{ mm}$ ),自形-他形粒状结构,通常呈定向的稠密浸染状(图4e)团块状、脉状(图4f、4g)分布于矿石内部或者矿体与围岩的接触带上。黄铜矿一般呈细粒他形结构与黄铁矿共生。

浸染状:磁铁矿、黄铁矿呈半自形-他形粒状沿裂隙边缘分布,常伴生石英、黑云母、钾长石等矿物。

定向的稠密浸染状构造:磁铁矿在安山质凝灰岩中呈稠密浸染状,但呈线性定向分布(图4d),黄铁矿或黄铜矿在磁铁矿矿石中,呈稠密浸染状分布,但都有一定的定向性(图4e)。

细脉状构造:磁铁矿可沿围岩的裂隙充填成磁铁矿细脉,磁铁矿脉宽0.5~10 cm不等,磁铁矿脉两侧围岩中含有细小的浸染状磁铁矿,可以在凝灰岩中(图4b、4h),也可以在矿体边部(图4c)。矿与围岩界线清楚或成渐变关系。反映了沿裂隙充填交代的成矿过程。黄铁矿、黄铜矿常与石英、绿帘石呈

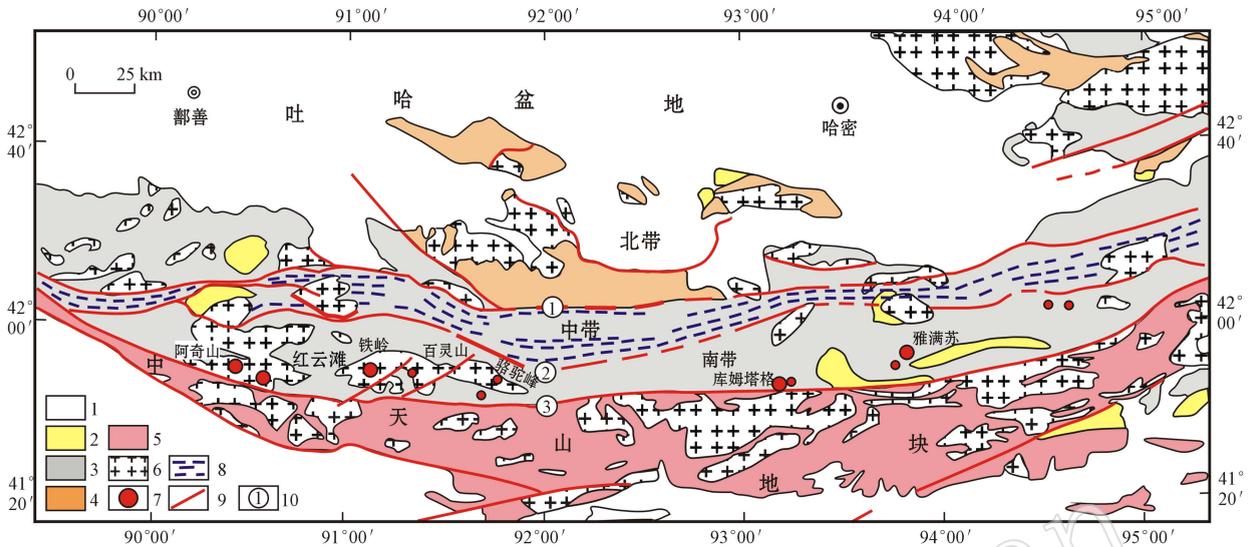


图1 东天山区域地质及铁矿(点)分布简图(据王京彬等,2006)

Fig. 1 Geological map of the East Tianshan Mountains and iron deposits (after Wang Jingbin *et al.*, 2006)

1—中生界; 2—二叠纪陆相火山-沉积岩系; 3—石炭纪火山-沉积岩系; 4—奥陶-泥盆纪火山-沉积岩系;

5—前寒武纪变质岩; 6—花岗岩类; 7—铁矿床; 8—剪切带; 9—板块缝合带; ①—康古尔-黄山断裂; ②—雅满苏-苦水断裂;  
③—阿其克库都克-沙泉子大断裂

1—Cenozoic-Mesozoic; 2—Permian continental volcanic-sedimentary rock; 3—Carboniferous volcanic-sedimentary rock; 4—Ordovician-Devonian volcanic-sedimentary rock; 5—Precambrian metamorphosed rock; 6—granite; 7—iron deposit; 8—shear zone; 9—suture; ①—Kanguertage-Huangshan fault; ②—Yamansu-Kushui fault; ③—Aqikekuduke-Shaquanzi fault

觉罗塔格成矿带广泛发育古生代的火山沉积岩系(图1),其中阿奇山-雅满苏岛弧区地层以下石炭统雅满苏组出露最为广泛(丁天府,1990),其岩性为浅海相中-酸性、基性熔岩、火山碎屑岩、陆源碎屑和碳酸盐岩等一套相变比较复杂的沉积物,厚度一般大于2000 m,其中在雅满苏地区厚度较大,而在阿奇山一带稍薄。在阿奇山西部,雅满苏组不整合于下石炭统小热泉子组之上,后者主要为中性火山熔岩、火山碎屑岩夹陆源碎屑岩,底部为少量玄武质熔岩;在阿奇山北部及东南部的局部地段,中石炭统白鱼山组及底格尔组均不整合于雅满苏组之上(周济元等,1994)。

觉罗塔格造山带的岩浆活动频繁强烈,尤其是华力西期和印支期的侵入岩最为发育。侵入岩以深成岩为主,浅成岩次之,形态包括岩基、岩株、岩墙等。岩性从超基性、基性到中酸性等各类岩浆岩均有发育,其中基性-超基性岩体主要分布于东段的黄山一带,中酸性岩体尤其是花岗岩类侵入岩则在全区普遍发育。在阿奇山-雅满苏岛弧带中分布着一系列整体呈东西向展布的中酸性岩体,自西向东分别有红云滩、铁岭、百灵山和骆驼峰等岩体。其中红

云滩岩体的岩性主要有闪长岩、花岗闪长岩、石英闪长岩、云英闪长岩、二长花岗岩及钾长花岗岩等,为华力西中期岩浆活动的产物(王碧香等,1989;吴昌志等,2006)。

## 2 成矿地质特征

### 2.1 矿区地质特征

矿区出露地层(图2a)主要为下石炭统雅满苏组上亚组第一岩性段( $C_{1y_1}$ ),总厚度近1000 m,出露面积不足3 km<sup>2</sup>。地层走向主要呈北北东向,倾向北西西,倾角一般30°~50°。由于华力西中期中酸性岩体的侵入,致使下石炭统地层呈东薄西厚的顶盖残留体。该岩性段主要由中基性-中酸性火山碎屑岩及中酸性熔岩和正常碎屑岩组成,由下而上划分为3个岩性层。I岩性层( $C_{1y_1}^I$ ):下部为灰白带褐黄色、厚层状至块状凝灰质砾岩,砾石成分主要为石英。其次有少量凝灰质砂岩,分布于矿区北部。上部为浅黄色至褐黑色凝灰质粉砂岩、含砾粉砂岩;II岩性层( $C_{1y_1}^{II}$ ):下部为含磁铁矿的安山质凝灰岩与凝灰质粉砂岩呈不均匀互层,夹熔结角砾岩、中酸

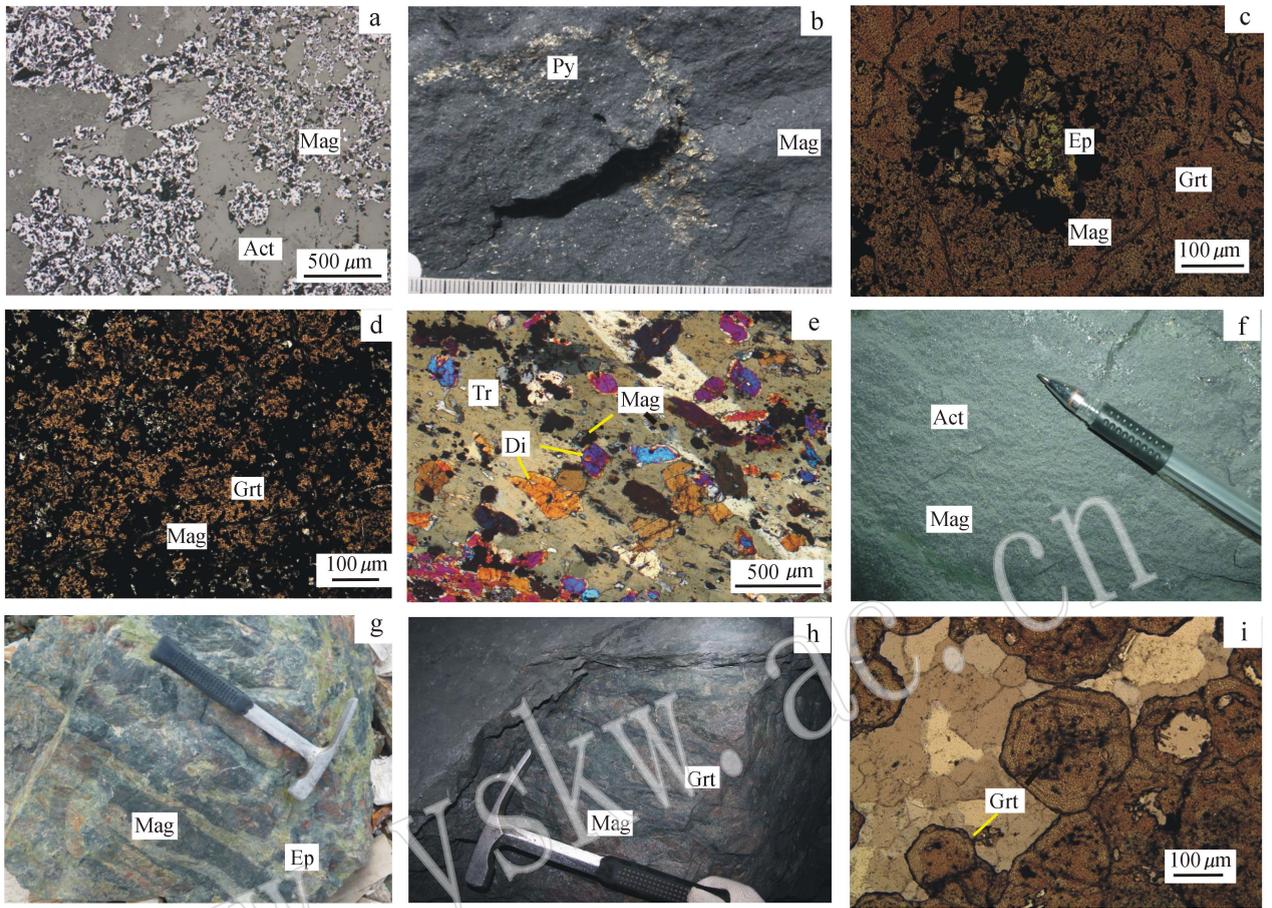


图 3 红云滩铁矿矽卡岩期矿石特征

Fig. 3 Characteristics of skarn ores from the Hongyuntan iron deposit

a—半自形-他形粒状磁铁矿(反射光); b—致密块状磁铁矿,黄铁矿呈稠密浸染状定向分布; c—绿帘石、磁铁矿交代石榴石(单偏光); d—磁铁矿交代石榴石呈浸染状分布(单偏光); e—磁铁矿、角闪石交代透辉石(正交光); f—阳起石-磁铁矿富矿,磁铁矿呈稠密浸染状分布; g—条带状矿石; h—石榴石-磁铁矿贫矿石,磁铁矿呈脉状分布; i—矽卡岩早期未被交代的石榴石(单偏光); Mag—磁铁矿; Py—黄铁矿;

Grt—石榴石; Di—透辉石; Act—阳起石; Ep—绿帘石; Tr—透闪石

a—subhedral-anhedral granular magnetite ore (reflective light); b—compact massive magnetite ore with pyrite veins; c—garnet replaced by epidote and magnetite (transmitted light); d—garnet replaced by magnetite (transmitted light); e—diopside replaced by hornblende and magnetite (crossed nicols); f—actinolite-magnetite rich ore with dense disseminated magnetite; g—banded magnetite ore; h—garnet-magnetite poor ore with magnetite vein; i—automorphic garnet (transmitted light); Mag—magnetite; Py—pyrite; Grt—garnet; Di—diopside; Act—actinolite; Ep—epidote; Tr—tremolite

脉状穿切围岩(图 4g)或矿体(图 4f),并可导致两侧磁铁矿产生重结晶作用(图 4a),脉体一般长 0.5~2 m,宽可达 0.5~5 cm 不等。

## 2.4 围岩蚀变

矿区围岩蚀变发育,呈现对称分带特点(图 2c),表现出从矿体(矿化体)到围岩,蚀变具有从深色到浅色的变化现象。内侧的深色蚀变主要包括石榴石化、透辉石化、阳起石化、透闪石化及绿帘石化等,矿体(矿化体)产于此蚀变带中;外侧的浅色蚀变主要

包括硅化、钠长石化及少量的黑云母化、钾长石化等。这种蚀变特征也反映了含铁质流体沿断裂运移沉淀同时对两侧围岩进行交代蚀变,蚀变矿物由富铁矿物组合逐渐变为贫铁矿物组合的特点。

## 2.5 成矿期次划分

根据矿体产出特征、矿石组构和矿物共生组合,本次工作将红云滩铁矿床的成矿过程划分为两个成矿期(图 5),即矽卡岩期、热液期,进一步划分为 4 个成矿阶段,其中矽卡岩期为主成矿期。

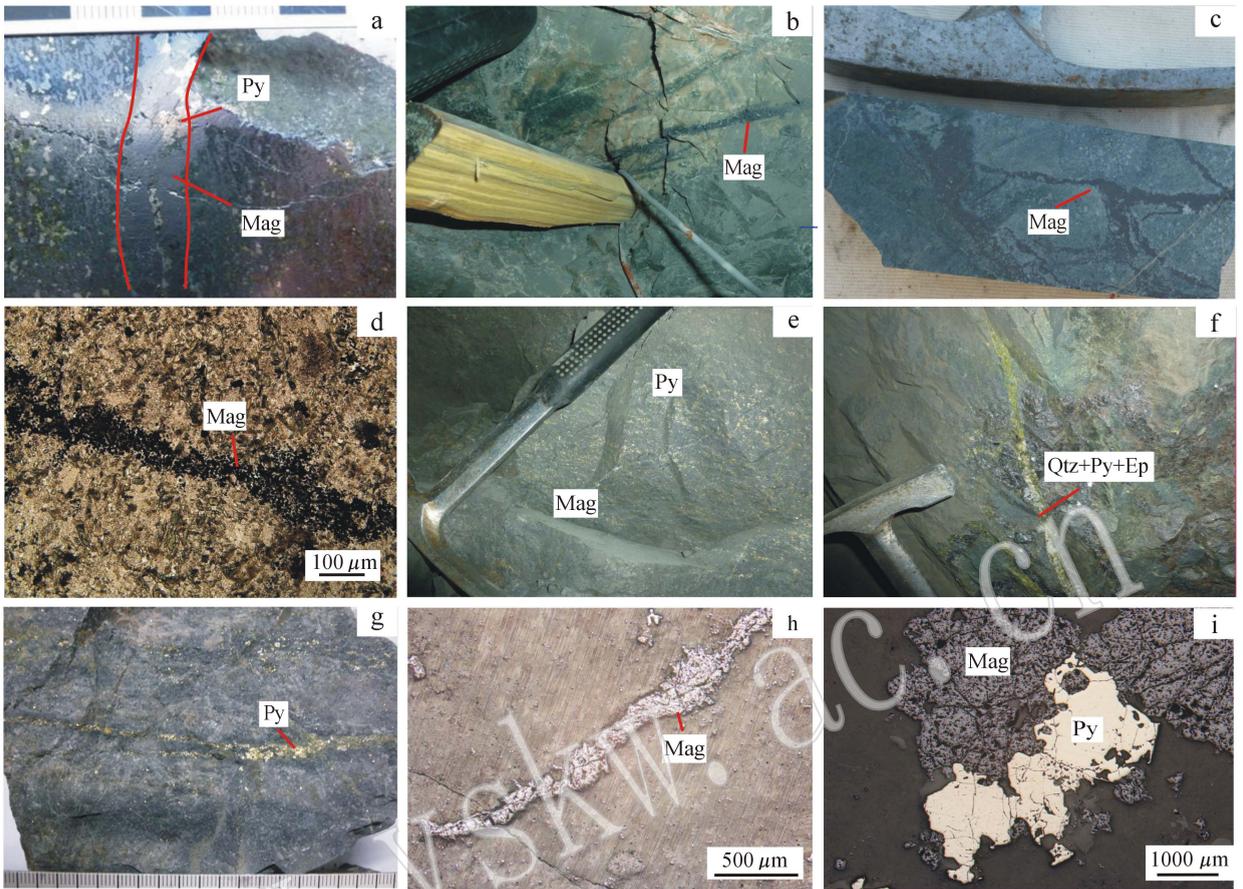


图4 红云滩铁矿热液期矿石特征

Fig. 4 Characteristics of hydrothermal ores from the Hongyuntan iron deposit

a—脉状黄铁矿使两侧磁铁矿重结晶; b—在安山质凝灰岩中分布的脉状磁铁矿; c—在阳起石-磁铁矿矿石中呈脉状分布的磁铁矿; d—  
在安山质凝灰岩中呈稠密浸染状定向分布的磁铁矿(单偏光); e—  
在富矿石中黄铁矿呈稠密浸染状,具有弱定向分布特征; f—穿过铁矿石的石英-黄铁矿-绿帘石脉; g—  
在安山质凝灰岩中分布的黄铁矿脉; h—  
在安山质凝灰岩中分布的脉状磁铁矿(反光镜); i—  
黄铁矿交代磁铁矿(反射光)

a—pyrite vein causing recrystallization of magnetite on both sides; b—magnetite vein crosscutting andesitic tuff; c—magnetite vein crosscutting actinolite-magnetite ore; d—dense disseminated and directional magnetites filling in andesitic tuff(transmitted light); e—dense disseminated and directional pyrites filling in magnetites; f—pyrite + quartz + epidote vein crosscutting poor ore; g—pyrite vein crosscutting andesitic tuff; h—magnetite vein crosscutting andesitic tuff(reflective light); i—magnetites replaced by pyrites(reflective light)

矽卡岩期: 早阶段为矽卡岩阶段,主要形成石榴石,其次为透辉石和少量磁铁矿等。多分布于主矿体下部,形成贫铁矿体。晚阶段为退化蚀变阶段,形成阳起石、透闪石、绿帘石、镁角闪石、绿泥石等含水硅酸盐矿物以及大量磁铁矿,构成主矿体,是主成矿阶段。

热液期: 早阶段形成少量脉状及浸染状的粗粒磁铁矿,一般不构成独立矿体。同时伴随硅化、钠长石化等浅色蚀变。晚阶段为石英-硫化物阶段,主要形成石英、绿帘石、黄铁矿及少量的黄铜矿等,主要分布在矿体边部及蚀变带中。

### 3 样品及分析方法

本次工作对红云滩铁矿床V号矿带二号竖井中1250中段7号和9号穿脉以及ZK402、ZK1401、ZK1402、ZK1403进行了系统观察、测量和样品采集。在室内观察薄片的基础上对其中20块样品中的石榴石、透辉石、角闪石、绿帘石及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5kV、电

矿物名称	矽卡岩期		热液期	
	早阶段	晚阶段	早阶段	晚阶段
透辉石 Di	■			
石榴石 Grt	■			
磁铁矿 Mag		■	■	
绿泥石 Chl		■	■	
阳起石 Act		■	■	
透闪石 Tr		■	■	
绿帘石 Ep			■	■
黑云母 Bt			■	■
钠长石 Ab			■	■
石英 Qtz			■	■
黄铁矿 Py				■
黄铜矿 Ccp				■
方解石 Cal				■

图 5 红云滩铁矿矿石矿物和脉石矿物组合共生关系  
Fig. 5 Mineral paragenesis and ore-forming stages of the Hongyuntan iron deposit

流 20 nA、束斑直径 5  $\mu\text{m}$ ，标样采用天然矿物国家标准，分析精度为 0.01%。并对 12 件磁铁矿单矿物进行了微量元素含量的化学分析测试。微量元素分析在核工业北京地质研究院测试，采用等离子质谱法 (ICP-MS) 分析，分析误差小于 5%。石榴子石、辉石、角闪石、绿帘石矿物化学成分计算根据 Minpet2.02 完成。

## 4 矿物学特征及矿物化学分析结果

### 4.1 石榴石

矿区内石榴石分布较广，在主矿体下部最为发育 (图 3h)。多呈褐色，单偏光下主要呈浅褐色，正高-极高突起，糙面明显，切面多呈六边形或不规则状；正交偏光下全消光；粒径大多小于 2 mm，多为自形-他形、中-细粒结构，粒度大小不一，说明石榴石结晶

的时间相对较长且受退化蚀变阶段矿物交代强弱不等 (图 3c、3d、3i)；自形程度高的环带结构发育 (图 3i)，自形程度低的常被绿帘石、磁铁矿等矿物交代。

电子探针结果 (表 1) 表明：石榴石以钙铁榴石 (65.37%~87.86%) 为主，其次为钙铝榴石 (6.66%~32.96%)，其他端员组分 (<6.73%) 含量很低，属钙铁榴石-钙铝榴石系列 (图 6a)，与世界上典型的矽卡岩型铁矿的石榴石组分具有相似分布区间，与国内矽卡岩型铁矿中的石榴石特征一致 (赵斌等, 1982; 赵一鸣等, 1990; 徐林刚等, 2006; 周振华等, 2011)。未被交代的自形石榴石环带发育，不同环带的化学组成具有一定的差异 (图 7)，最显著的差异表现为钙铁榴石和钙铝榴石两个端员成分含量呈交替变化，这说明了矽卡岩早期热液流体成分也是动态变化的。

### 4.2 辉石

辉石是红云滩铁矿矽卡岩早期蚀变矿物，多与石榴石共生，粒径一般在 0.04~0.25 mm 之间，主要呈半自形柱状-粒状出现，单偏光下无色，正高突起，正交偏光下最高干涉色为二级蓝绿，常见被退化蚀变阶段的角闪石、绿帘石、磁铁矿交代 (图 3e)。

电子探针分析结果表明 (表 2)：辉石属于钙质辉石的透辉石-钙铁辉石系列，以透辉石为主，透辉石端员组分变化范围在 55.51%~71.81% 之间；钙铁辉石为 27.96%~44.18%；锰钙辉石变化范围为 0.02%~0.71%。与世界上典型的矽卡岩型铁矿床的辉石具有极其相似的特征 (图 6b)，但国外的矽卡岩型铁矿床中钙铁辉石含量一般超过 80% (Meinert, 1992)；而中国的矽卡岩性铁矿床以富透辉石为特征，其含量一般为 50%~90%，属于钙质矽卡岩 (赵斌等, 1987; 赵一鸣等, 1997)。

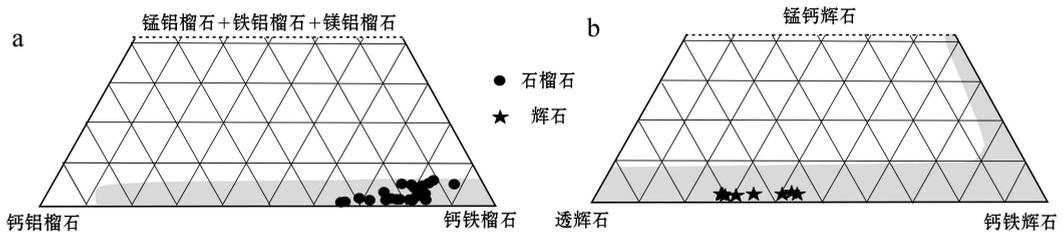


图 6 红云滩铁矿与世界矽卡岩型矿床 (阴影部分) 的石榴石 (a)、辉石 (b) 成分对比  
(底图据 Leake 等, 1997; David 等, 2005)

Fig. 6 Compositional plot of garnets (a), augite (b) of the Hongyuntan iron deposit in comparison with other skarn deposits in the world (after Leake *et al.*, 1997; David *et al.*, 2005)

表1 红云滩铁矿床代表性石榴石电子探针分析数据

 $w_B/\%$ 

Table 1 Representative data of electron microprobe analysis of garnets from the Hongyuntan deposit

样号	HYT-28-1-3	HYT-28-2-2	HYT-28-2-3	HYT-4-1-2	HYT-4-2-2	HYT-4-3-2	HYT-4-4-2	HYT-7-1-1	HYT-7-1-2	HYT-7-1-3	HYT-7-2-1
SiO <sub>2</sub>	36.79	35.87	37.57	37.24	37.40	36.50	37.95	37.62	37.47	37.34	37.25
TiO <sub>2</sub>	0.15	0.03	0.07	0.16	0.16	0.23	0.15	0.04	0.09	0.00	0.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.85	4.35	5.87	5.35	7.19	4.28	7.10	4.08	3.80	4.75	4.77
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.01
TFeO	23.92	22.84	20.71	22.35	19.44	24.82	19.52	23.23	24.93	21.75	22.09
MnO	0.13	0.13	0.13	0.10	0.02	0.19	0.08	0.05	0.13	0.07	0.11
MgO	0.05	0.04	0.27	0.13	0.22	0.06	0.24	0.16	0.06	0.12	0.19
CaO	31.35	30.11	33.42	32.22	33.69	31.63	33.54	33.64	31.33	33.29	33.56
Total	96.35	93.44	98.09	97.59	98.14	97.80	98.61	98.82	97.83	97.38	98.27
Si	3.07	3.08	3.05	3.05	3.02	3.02	3.05	3.05	3.08	3.06	3.03
Ti	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
Al	0.38	0.44	0.56	0.52	0.69	0.42	0.67	0.39	0.37	0.46	0.46
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	1.57	1.51	1.40	1.44	1.29	1.56	1.29	1.57	1.58	1.49	1.51
Fe <sup>2+</sup>	0.10	0.13	0.00	0.09	0.02	0.15	0.02	0.00	0.14	0.00	0.00
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
Mg	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02
Ca	2.80	2.77	2.90	2.83	2.92	2.80	2.89	2.92	2.76	2.93	2.93
Ura	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.08	0.03
And	80.54	77.37	71.45	73.59	65.37	78.94	65.64	80.17	81.06	75.98	76.30
Pyr	0.23	0.18	1.12	0.52	0.91	0.23	0.98	0.66	0.24	0.49	0.78
Spe	0.32	0.32	0.30	0.24	0.05	0.45	0.18	0.10	0.31	0.17	0.25
Gro	15.45	17.52	27.09	22.57	32.96	15.29	32.34	19.03	13.63	23.27	22.65
Alm	3.46	4.61	0.03	3.03	0.72	5.10	0.78	0.03	4.77	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub>	36.56	37.02	37.03	37.22	36.45	36.47	37.63	37.17	36.83	36.46	36.31
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.04	0.03	0.02	0.00	0.10	0.14	0.01	0.11	0.06	0.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.57	4.41	4.02	4.59	2.44	3.65	6.58	3.70	3.93	3.68	3.37
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00
TFeO	26.23	22.66	22.82	23.00	27.13	25.50	20.58	24.26	24.49	24.40	23.50
MnO	0.26	0.07	0.07	0.07	0.14	0.16	0.23	0.11	0.11	0.11	0.11
MgO	0.03	0.12	0.10	0.14	0.02	0.04	0.14	0.07	0.11	0.06	0.10
CaO	31.33	33.66	32.71	33.45	31.47	31.11	34.15	32.05	32.15	32.05	32.44
Total	98.15	98.09	97.04	98.58	97.70	97.07	99.47	97.47	97.81	96.90	96.00
Si	3.02	3.03	3.06	3.03	3.03	3.04	3.01	3.07	3.04	3.04	3.04
Ti	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
Al	0.35	0.43	0.39	0.44	0.24	0.36	0.62	0.36	0.38	0.36	0.33
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	1.63	1.55	1.56	1.54	1.74	1.61	1.36	1.59	1.59	1.61	1.63
Fe <sup>2+</sup>	0.18	0.00	0.02	0.03	0.15	0.16	0.01	0.08	0.10	0.09	0.01
Mn	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	2.77	2.95	2.90	2.92	2.81	2.78	2.93	2.83	2.84	2.86	2.91
Ura	0.00	0.00	0.11	0.01	0.04	0.02	0.01	0.09	0.08	0.00	0.00
And	82.45	78.31	79.84	77.73	87.86	81.80	68.68	81.51	80.59	81.73	83.06
Pyr	0.14	0.47	0.42	0.58	0.06	0.17	0.55	0.29	0.46	0.27	0.40
Spe	0.60	0.16	0.16	0.16	0.33	0.37	0.52	0.26	0.27	0.26	0.27
Gro	10.82	21.06	18.88	20.58	6.66	12.09	29.74	15.08	15.27	14.84	15.76
Alm	5.99	0.00	0.60	0.94	5.05	5.55	0.50	2.78	3.33	2.91	0.50

注: Alm—铁铝榴石; And—钙铁榴石; Gro—钙铝榴石; Pyr—镁铝榴石; Spe—锰铝榴石; 0.00为低于检测限; 分析精度为0.0 n%。

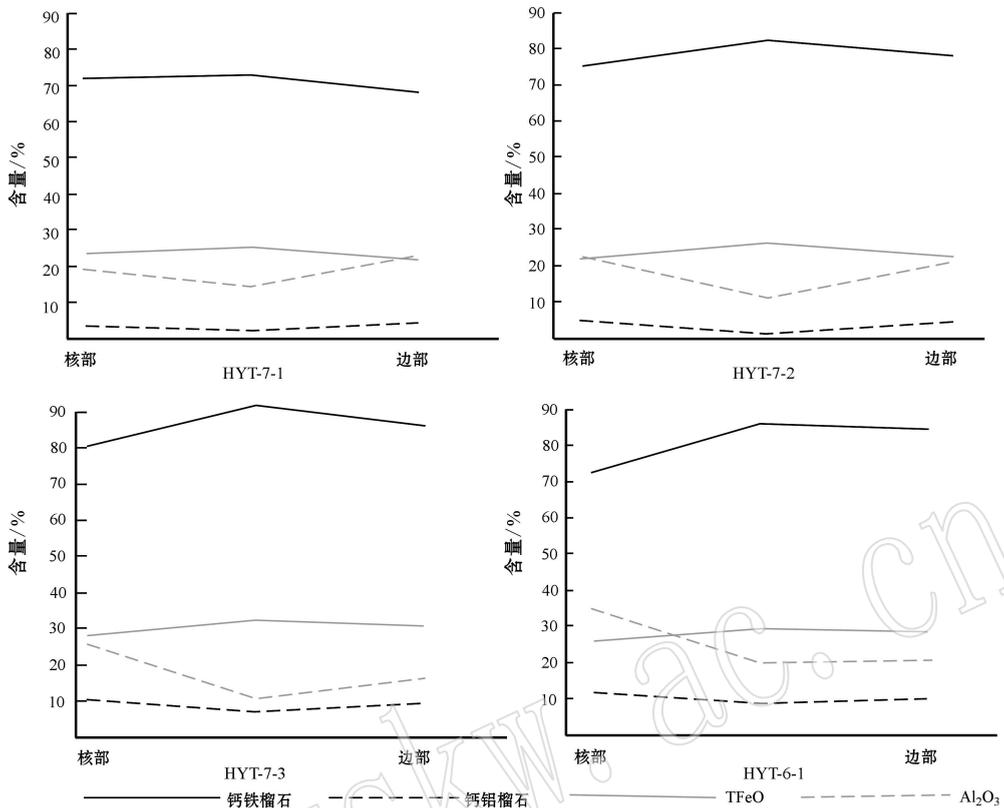


图 7 红云滩铁矿石石榴石颗粒环带成分的变化

Fig. 7 Chemical composition of the oscillatory-zoning in garnets of the Hongyuntan iron deposit

### 4.3 角闪石

角闪石族矿物广泛分布在蚀变火山岩以及磁铁矿体中,其中阳起石-磁铁矿组合(图 3f)是最重要的矿石类型。角闪石族矿物主要呈暗绿色-黄绿色,长柱状、部分短柱状,粒度多为 0.05~1.4 mm,可由辉石以及火山岩中普通角闪石蚀变而成。根据 Leake 等(1997)的分类方法,计算红云滩铁矿角闪石属钙质角闪石系列,主要为阳起石和透闪石为主及少量镁角闪石(图 8)。主要成分为:  $Si_T = 6.88 \sim 7.8$ ,  $Mg/(Mg + Fe^{2+}) = 0.53 \sim 0.93$ ,  $Mg/(Mg + Al) = 0.59 \sim 0.89$ ,  $Al_2O_3$  为 2.44%~8.29%,  $TiO_2$  含量很低,小于 0.5%(表 3)。

### 4.4 绿帘石

矿区内绿帘石可分为 2 期: ① 退化蚀变阶段的绿帘石在矿体中分布较广,可交代石榴石、透辉石呈浸染状出现,也可与磁铁矿呈条带状出现。多呈黄绿色或草绿色,正高突起,半自形-他形粒状,粒度较小,一般在 0.005~0.25 mm 之间。② 石英-硫化物阶段的绿帘石主要分布在矿体边缘及围岩中,与石英、黄铁矿呈脉状产出。呈草黄绿色,呈半自形-自

形,粒度较大,可达 2 mm。

退化蚀变阶段绿帘石的电子探针分析(表 4)表明,矿区内绿帘石相对富铁,其  $Fe/(Fe + Al) = 0.14 \sim 0.74$ 。

### 4.5 磁铁矿

矿区内磁铁矿可分为 2 期: ① 退化蚀变阶段的磁铁矿构成主矿体,主要呈块状、稠密浸染状及少量的条带状等。致密块状磁铁矿组成矿区内富矿体,多位于矿体的中上部,而矿体边部的磁铁矿主要呈稠密浸染状、条带状。磁铁矿呈半自形-他形粒状,粒度较小,一般  $< 0.1$  mm; ② 热液期早阶段磁铁矿主要呈脉状和稀疏浸染状在矿体边部及围岩中产出,伴随有钠长石化和硅化。磁铁矿呈半自形-自形粒状,粒度较大,一般  $> 0.1$  mm。

电子探针分析(表 5)显示,磁铁矿主要成分为  $TFeO = 88.75\% \sim 92.76\%$ ,  $SiO_2 = 0.00 \sim 0.272\%$ ,  $TiO_2 = 0.000 \sim 0.152\%$ ,  $MnO = 0.000 \sim 0.064\%$ ,  $MgO = 0.000 \sim 0.052\%$ ,  $Al_2O_3 = 0.000 \sim 0.246\%$ 。两期磁铁矿主量元素组分含量变化不大,热液期磁铁矿相对富  $TiO_2$ 。

表 2 红云滩铁矿代表性辉石电子探针分析数据

 $\omega_B/\%$ 

Table 2 Representative data of electron microprobe analysis of clinopyroxenes from the Hongyuntan iron deposit

样号	HYT-31-3-1	HYT-31-3-2	ZK1403-1-2	ZK1403-2-2	HYT-31-2-3	HYT-31-3-2	HYT-16-1-3	HYT-14-1-1
SiO <sub>2</sub>	54.13	52.89	50.35	49.99	53.54	53.57	52.39	52.10
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.00	0.00	0.11	0.00	0.02	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.34	2.61	1.51	1.91	0.53	0.48	0.82	0.65
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.04
FeO	11.47	12.59	12.85	14.09	8.73	9.07	13.22	10.59
MnO	0.01	0.01	0.12	0.10	0.07	0.06	0.22	0.06
MgO	16.10	15.68	10.29	9.84	12.60	12.93	9.77	11.08
CaO	12.31	12.36	23.35	23.42	23.32	23.11	23.48	23.72
Na <sub>2</sub> O	0.46	0.46	0.29	0.36	0.41	0.40	0.27	0.26
K <sub>2</sub> O	0.17	0.21	0.01	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00
Total	97.02	96.83	98.78	99.85	99.22	99.67	100.18	98.59
基于 6 个氧原子和 4 个阳离子计算								
Si	2.03	2.01	1.95	1.93	2.01	2.01	2.00	2.00
Al(IV)	0.00	0.00	0.05	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
Al(VI)	0.10	0.12	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00	0.08	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>2+</sup>	0.37	0.40	0.34	0.34	0.28	0.28	0.42	0.34
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Mg	0.90	0.89	0.59	0.57	0.71	0.72	0.55	0.63
Ca	0.50	0.50	0.97	0.97	0.94	0.93	0.96	0.97
Na	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
K	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总离子数	3.94	3.96	4.02	4.03	3.99	4.00	4.00	4.00
Mn/Fe	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Mg/Fe	2.46	2.20	1.44	1.26	2.57	2.54	1.31	1.86
Di	71.08	68.70	58.71	55.51	71.81	71.59	56.39	64.95
Hd	28.89	31.28	40.90	44.18	27.96	28.21	42.89	34.84
Jo	0.02	0.02	0.40	0.31	0.22	0.20	0.71	0.21
Wo	27.57	27.50	48.38	48.06	48.11	47.20	48.86	49.49
En	50.16	48.53	29.66	28.09	36.17	36.76	28.28	32.17
Fs	20.39	22.11	20.86	22.52	14.20	14.58	21.86	17.36
Ac	1.88	1.85	1.10	1.32	1.52	1.46	1.00	0.99

注：0.00 为低于检测限；Di—透辉石；Hd—钙铁辉石；Jo—锰钙辉石；分析精度为 0.0n%；TFeO 为全铁氧化物。

微量元素分析(表 6)表明,矽卡岩期磁铁矿中  $\text{Co} = 28.8 \times 10^{-6} \sim 67 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $44.04 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Ni} = 1.53 \times 10^{-6} \sim 8.92 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $5.44 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Sc} = 0.18 \times 10^{-6} \sim 2.84 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $1.05 \times 10^{-6}$ ;  $\text{V} = 24.4 \times 10^{-6} \sim 134 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $70.96 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Cr} = 6.2 \times 10^{-6} \sim 41.4 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $18.02 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Cu} = 15 \times 10^{-6} \sim 54.7 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $34.34 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Zn} = 20.2 \times 10^{-6} \sim 69.2 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $40.58 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Ga} = 3.94 \times 10^{-6} \sim 15.5 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $11.24 \times 10^{-6}$ 。热液期磁铁矿中  $\text{Co} = 25.6 \times 10^{-6} \sim 57.1 \times 10^{-6}$ , 平均值

为  $43.38 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Ni} = 14.6 \times 10^{-6} \sim 39.1 \times 10^{-6}$ , 平均值  $24.7 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Sc} = 0.75 \times 10^{-6} \sim 5.45 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $2.08 \times 10^{-6}$ ;  $\text{V} = 166 \times 10^{-6} \sim 687 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $436.6 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Cr} = 6.32 \times 10^{-6} \sim 169 \times 10^{-6}$ , 平均值  $44 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Cu} = 9.47 \times 10^{-6} \sim 43.2 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $21.09 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Zn} = 27.7 \times 10^{-6} \sim 57.2 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $40.5 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Ga} = 16.5 \times 10^{-6} \sim 24.9 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $20.42 \times 10^{-6}$ 。两期磁铁矿微量元素含量变化较大,热液期磁铁矿中 V、Cr、Ni、Ga、Sc 平均含量更高。

表3 红云滩铁矿代表性角闪石电子探针分析数据

Table 3 Representative data of electron microprobe analysis of amphibole from the Hongyuntan iron deposit

$w_B/\%$

样号	HYT-31-2-2	HYT-15-1-2	HYT-15-2-1	HYT-20-1-1	HYT-7-1-1	HYT-14-2-1	HYT-14-3-1	HYT-1-2-2-1	HYT-2-1-1	HYT-2-2-1	HYT-31-3-3
SiO <sub>2</sub>	50.90	50.55	50.91	44.42	52.33	48.88	48.58	52.24	52.37	54.49	54.14
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.49	0.46	0.24	0.15	0.34	0.39	0.37	0.12	0.05	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.10	4.46	4.31	8.29	2.44	7.10	6.91	3.61	3.27	2.85	6.52
TFeO	13.57	12.81	12.38	18.31	16.33	12.41	12.76	11.85	10.44	9.75	11.18
MnO	0.00	0.11	0.09	0.09	0.08	0.03	0.02	0.07	0.07	0.09	0.06
MgO	14.36	14.81	14.59	9.60	12.20	14.16	14.04	16.08	16.95	17.51	11.39
CaO	11.93	11.81	11.80	12.24	12.41	12.02	12.03	12.45	11.95	12.13	9.90
Na <sub>2</sub> O	0.64	0.69	0.75	1.20	0.20	1.22	1.15	0.59	0.69	0.55	0.65
K <sub>2</sub> O	0.32	0.12	0.08	1.15	0.09	0.26	0.21	0.21	0.13	0.15	3.42
Total	95.89	95.85	95.44	95.55	96.26	96.42	96.14	97.40	95.98	97.58	97.29
基于23个氧原子数计算											
Si	7.53	7.45	7.52	6.88	7.78	7.18	7.18	7.54	7.61	7.73	7.80
Al <sup>IV</sup>	0.47	0.55	0.48	1.12	0.22	0.82	0.82	0.46	0.39	0.27	0.20
Al <sup>VI</sup>	0.24	0.23	0.27	0.39	0.21	0.41	0.38	0.15	0.17	0.21	0.91
Ti	0.01	0.05	0.05	0.03	0.02	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.77	0.78	0.83	0.37	0.98	0.64	0.64	0.79	0.79	0.89	0.95
Fe <sup>2+</sup>	0.91	0.80	0.70	2.00	1.06	0.89	0.94	0.65	0.47	0.27	0.39
Mn	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Mg	3.17	3.26	3.21	2.22	2.70	3.10	3.09	3.46	3.67	3.70	2.45
Ca	1.89	1.86	1.87	2.03	1.98	1.89	1.90	1.93	1.86	1.84	1.53
Na	0.18	0.20	0.22	0.36	0.06	0.35	0.33	0.17	0.19	0.15	0.18
K	0.06	0.02	0.01	0.23	0.02	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.63
阳离子总量	15.23	15.22	15.17	15.63	15.02	15.36	15.36	15.21	15.21	15.11	15.05
Mg/(Mg+Fe <sup>2+</sup> )	0.78	0.80	0.82	0.53	0.72	0.78	0.77	0.84	0.89	0.93	0.86
Mg/(Mg+Al)	0.82	0.81	0.81	0.59	0.86	0.72	0.72	0.85	0.87	0.89	0.69
OH <sup>-</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Si <sub>T</sub>	7.53	7.45	7.52	6.88	7.78	7.18	7.18	7.54	7.61	7.73	7.80
Al <sub>T</sub>	0.47	0.55	0.48	1.12	0.22	0.82	0.82	0.46	0.39	0.27	0.20
Al <sub>C</sub>	0.24	0.23	0.27	0.39	0.21	0.41	0.38	0.15	0.17	0.21	0.91
Fe <sub>C</sub> <sup>+</sup>	0.77	0.78	0.83	0.37	0.98	0.64	0.64	0.79	0.79	0.89	0.95
Ti <sub>C</sub>	0.01	0.05	0.05	0.03	0.02	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.00
Mg <sub>C</sub>	3.17	3.26	3.21	2.22	2.70	3.10	3.09	3.46	3.67	3.70	2.45
Fe <sub>C</sub> <sup>2+</sup>	0.81	0.68	0.64	2.00	1.06	0.82	0.85	0.56	0.35	0.19	0.39
Mn <sub>C</sub>					0.01						0.01
Fe <sub>OH</sub> <sup>+</sup>	0.10	0.12	0.06	0.00	0.00	0.07	0.09	0.09	0.12	0.08	0.00
Mn <sub>B</sub>	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Ca <sub>B</sub>	1.89	1.86	1.87	1.98	1.98	1.89	1.90	1.91	1.86	1.84	1.53
Na <sub>B</sub>	0.01	0.00	0.06	0.05	0.02	0.03	0.00	0.01	0.01	0.07	0.18
Ca <sub>A</sub>	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Na <sub>A</sub>	0.17	0.19	0.16	0.36	0.04	0.32	0.33	0.17	0.18	0.08	0.18
K <sub>A</sub>	0.06	0.02	0.01	0.23	0.02	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.63

注: TFeO为全铁氧化物, 0.00为低于检测限; 分析精度为0.0。

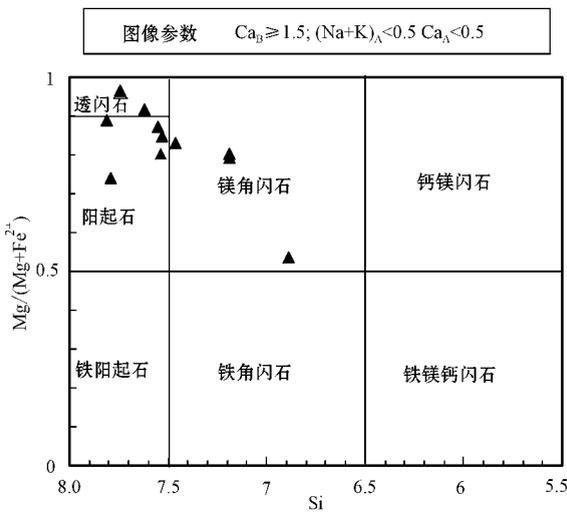


图 8 红云滩铁矿角闪石分类图解(据 Leake *et al.*, 1997)

Fig. 8 Classification of amphibole from the Hongyuntan iron deposit (after Leake *et al.*, 1997)

表 4 红云滩铁矿代表性绿帘石电子探针分析数据  $w_p/\%$

Table 4 Representative data of electron microprobe analysis of epidote from the Hongyuntan iron deposit

样号	HYT-28-2-3	HYT-28-3-3	ZK1403-3-1-1	ZK1403-3-1-4	ZK1403-3-2-3
Na <sub>2</sub> O	0.05	0.03	0.04	0.01	0.00
MgO	0.00	0.02	0.15	0.02	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.38	22.12	6.88	29.52	28.72
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
CaO	21.20	22.48	31.82	23.21	23.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.21	0.00	0.00	0.03
TFeO	12.64	13.33	19.60	4.97	5.23
MnO	0.07	0.07	0.15	0.08	0.00
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.00	0.28	0.00	0.01
SiO <sub>2</sub>	35.97	37.47	35.88	39.97	39.45
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.02	0.07	0.00	0.00
Total	90.36	95.78	94.87	97.81	96.62

注：TFeO 为全铁氧化物，0.00 为低于检测限；分析精度为 0.0n%。

## 5 讨论

### 5.1 矽卡岩成因

矽卡岩具有多成因性,涂光炽(1981)指出除了接触交代作用外,火山-次火山气液作用、混合岩化作用和区域变质作用也可以形成矽卡岩。Oвчинников(1980)对前苏联乌拉尔地区铁矿床进行研究后,认为矽卡岩铁矿床可以形成于全部岩浆作

用过程之中。红云滩铁矿体就产于矽卡岩蚀变带(图 2c)内,矽卡岩类型主要有石榴石矽卡岩、透辉石-石榴石矽卡岩、阳起石-绿帘石-透辉石矽卡岩等,均含有大量的磁铁矿,磁铁矿与退化蚀变矽卡岩矿物共生(图 3f),交代无水矽卡岩矿物(图 3c、3d、3e),可见铁矿的形成与矽卡岩关系密切。

矽卡岩矿物组分研究显示,石榴石端员组分属于钙铁榴石-钙铝榴石系列,以钙铁榴石(65.37%~87.86%)为主(图 6a),辉石端员组分属于透辉石-钙铁辉石系列,以透辉石(55.51%~71.81%)为主(图 6b),角闪石端员组分主要以阳起石和透闪石为主(图 8)。矿区矽卡岩与我国一些典型交代钙矽卡岩(赵一鸣等,1990)特点具有相似性,而且石榴石和辉石成分变化较大显示成矿处于非完全封闭的平衡条件下(赵劲松等,1996),这些与矿区发育不同类型、不同走向的断裂构造的客观事实一致。结合野外详细的地质观察,认为产于安山质凝灰岩地层中的大量矽卡岩矿物是岩浆热液沿断裂构造运移、交代中性富钙质火山岩的产物。

### 5.2 磁铁矿成因

不同成因类型铁矿石中磁铁矿化学成分组成具有标型特征(徐国凤等,1979)。磁铁矿中主量、微量等化学组分对判定矿床成因类型有一定的指示意义。红云滩磁铁矿主要成分与典型钙矽卡岩中磁铁矿化学成分相似(徐国凤等,1979),均表现出 Al 含量较低而 Mn、Mg、Si 含量较高的特点。矽卡岩期磁铁矿与热液期磁铁矿主量元素组分含量变化不大,表明热液期磁铁矿对矽卡岩期磁铁矿具有一定的继承性,而微量元素组分含量变化较大(图 9),可见热液期磁铁矿可能是矽卡岩期磁铁矿受到后期热液改造的结果。TFeO 与 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 均呈负相关(图 10),表明相对基性的环境益于磁铁矿的形成,特别是对于相对富含 V、Cr、Ni、Ga、Sc 的热液期磁铁矿的形成更加有利,但热液期往往伴随着硅化蚀变,这对热液期磁铁矿的形成是极为不利的,导致热液期磁铁矿规模很小而不独立构成矿体。在王顺金(1984)磁铁矿成因图解(图 11)上,矽卡岩期磁铁矿数据点主要落在了热液型及钙矽卡岩区域,显示了主成矿期磁铁矿与岩浆热液及矽卡岩关系密切,磁铁矿稀土元素特征也表明了磁铁矿的岩浆热液成因及其与石榴石的同源性(另文发表);而热液期磁铁矿主要处于与中酸性岩的过渡区,可见在主成矿期之后受到了后期热液的影响。

表 5 红云滩铁矿代表性磁铁矿电子探针分析数据

 $w_B/\%$ 

Table 5 Representative data of electron microprobe analysis of magnetite from the Hongyuntan iron deposit

样号	点号	期次	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TFeO	MnO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Total
HYT-31-1-1	36-1-1	矽卡岩期	0.000	0.000	0.037	0.021	0.000	0.000	90.584	0.000	0.087	0.000	0.015	0.060	90.804
HYT-31-2-1	36-2-1	矽卡岩期	0.011	0.038	0.246	0.062	0.000	0.000	89.767	0.003	0.000	0.272	0.017	0.093	90.509
HYT-31-4-1	36-4-1	矽卡岩期	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	91.362	0.000	0.004	0.017	0.050	0.147	91.580
ZK1403-3-1-3	55-1-3	矽卡岩期	0.002	0.000	0.027	0.040	0.488	0.046	90.831	0.000	0.020	0.047	0.000	0.000	91.501
HYT-28-1-1	33-1-1	矽卡岩期	0.017	0.006	0.020	0.000	0.009	0.055	92.730	0.019	0.000	0.023	0.045	0.034	92.958
HYT-28-2-1	33-2-1	矽卡岩期	0.076	0.000	0.164	0.004	0.519	0.135	89.521	0.000	0.000	0.238	0.027	0.000	90.684
HYT-4-1-1	5-1.1	矽卡岩期	0.000	0.006	0.050	0.000	0.000	0.000	92.044	0.000	0.000	0.018	0.011	0.093	92.222
HYT-4-3-1	5-3.1	矽卡岩期	0.004	0.000	0.065	0.000	0.000	0.000	91.730	0.000	0.000	0.064	0.037	0.040	91.940
HYT-4-4-1	5-4.1	矽卡岩期	0.037	0.000	0.092	0.000	0.000	0.023	90.740	0.000	0.009	0.023	0.023	0.016	90.963
HYT-31-2-1	36-2.1	矽卡岩期	0.074	0.000	0.030	0.044	0.053	0.000	91.498	0.019	0.000	0.067	0.069	0.109	91.963
HYT-16-1-1	18-1.1	矽卡岩期	0.000	0.000	0.117	0.000	0.000	0.000	91.708	0.003	0.011	0.105	0.000	0.006	91.950
HYT-16-2-1	18-2.1	矽卡岩期	0.000	0.034	0.120	0.021	0.000	0.000	92.590	0.025	0.000	0.038	0.007	0.056	92.891
HYT-15-1-1	17-1.1	矽卡岩期	0.067	0.000	0.038	0.000	0.000	0.000	89.192	0.000	0.023	0.044	0.072	0.387	89.823
HYT-6-2-1	7-2.1	矽卡岩期	0.226	0.019	0.046	0.009	0.000	0.000	91.711	0.000	0.000	0.131	0.047	0.047	92.236
HYT-6-5-1	7-5.1	矽卡岩期	0.000	0.008	0.054	0.000	0.000	0.000	91.550	0.000	0.000	0.119	0.067	0.000	91.798
HYT-6-6-1	7-6.1	矽卡岩期	0.017	0.006	0.033	0.003	0.000	0.000	92.096	0.009	0.000	0.183	0.051	0.011	92.409
HYT-6-7-1	7-7.1	矽卡岩期	0.054	0.009	0.006	0.001	0.000	0.000	91.200	0.000	0.000	0.075	0.048	0.038	91.431
HYT-11-2-3-2	13-3.2	矽卡岩期	0.080	0.038	0.024	0.000	0.055	0.012	89.999	0.000	0.000	0.047	0.027	0.063	90.345
HYT-11-2-4-1	13-4.1	矽卡岩期	0.019	0.020	0.043	0.000	0.000	0.046	90.940	0.000	0.000	0.029	0.050	0.003	91.150
HYT-1-2-1-1	2-1.1	热液期	0.039	0.000	0.020	0.000	0.000	0.000	92.654	0.003	0.000	0.050	0.048	0.257	93.071
HYT-1-2-1-2	2-1.2	热液期	0.024	0.035	0.015	0.000	0.000	0.029	91.400	0.000	0.007	0.018	0.059	0.291	91.878
HYT-1-2-3-1	2-3.1	热液期	0.067	0.013	0.014	0.000	0.000	0.000	90.693	0.032	0.000	0.137	0.030	0.110	91.096
HYT-20-1-2	22-1.2	热液期	0.023	0.000	0.100	0.000	0.000	0.000	90.002	0.064	0.043	0.015	0.011	0.029	90.287
HYT-20-2-1	22-2.1	热液期	0.000	0.018	0.208	0.000	0.000	0.000	90.883	0.000	0.077	0.036	0.002	0.015	91.239
HYT-20-3-1	22-3.1	热液期	0.000	0.009	0.158	0.007	0.000	0.024	88.746	0.000	0.087	0.012	0.028	0.006	89.077
HYT-26-1-1	HYT-26-1.1	热液期	0.026	0.001	0.111	0.005	0.000	0.000	92.764	0.000	0.152	0.044	0.021	0.024	93.148
HYT-26-2-1	HYT-26-2.1	热液期	0.117	0.011	0.042	0.000	0.000	0.000	92.555	0.019	0.079	0.047	0.000	0.033	92.903
HYT-26-2-2	HYT-26-2.2	热液期	0.037	0.008	0.026	0.070	0.000	0.000	91.907	0.044	0.008	0.015	0.061	0.021	92.197
HYT-31-1-1	36-1.1	热液期	0.015	0.005	0.103	0.000	0.000	0.078	92.302	0.003	0.000	0.038	0.058	0.095	92.697
HYT-31-1-2	36-1.2	热液期	0.020	0.052	0.126	0.000	0.000	0.003	91.764	0.000	0.000	0.073	0.026	0.092	92.156
HYT-11-2-3-3	7-1.1	热液期	0.000	0.029	0.000	0.004	0.000	0.000	92.533	0.000	0.015	0.099	0.026	0.024	92.730
HYT-11-2-3-1	13-3.1	热液期	0.056	0.000	0.008	0.000	0.000	0.006	91.844	0.057	0.029	0.032	0.018	0.026	92.076
HYT-3-1-1	HYT-3-1.1	热液期	0.011	0.010	0.103	0.000	0.000	0.003	91.538	0.035	0.033	0.044	0.010	0.036	91.823
HYT-3-2-1	HYT-3-2.1	热液期	0.015	0.030	0.115	0.018	0.000	0.040	91.874	0.009	0.052	0.029	0.034	0.052	92.268

注: TFeO 为全铁氧化物, 0.00 为低于检测限; 分析精度为 0.0n%。

表 6 红云滩铁矿代表性磁铁矿微量元素含量

 $w_B/10^{-6}$ 

Table 6 Trace element content of magnetite from the Hongyuntan iron deposit

样号	样品名称	成矿期次	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	In
HYT-19-1	磁铁矿	矽卡岩期	0.689	134	11.5	39.1	4.09	54.7	69.2	14.9	0.146
HYT-20	磁铁矿	矽卡岩期	2.84	85.3	16.4	55.4	6.31	30.5	38.1	12.8	0.092
HYT-24	磁铁矿	矽卡岩期	0.422	54.2	41.4	29.9	6.37	44.2	50	9.08	0.06
HYT-29	磁铁矿	矽卡岩期	0.179	24.4	14.6	28.8	1.53	27.3	25.4	3.94	0.015
HYT-30	磁铁矿	矽卡岩期	1.14	56.9	6.2	67	8.92	15	20.2	15.5	0.091
HYT-31	磁铁矿	热液期	5.45	687	169	46.3	23.5	28.2	27.7	24.9	0.052
ZK1402-1	磁铁矿	热液期	1.3	297	21.1	57	39.1	13.6	57.2	19.9	0.06
ZK1402-2	磁铁矿	热液期	1.59	511	15.2	25.6	14.6	9.47	44.3	22.9	0.067
ZK1401-2	磁铁矿	热液期	1.29	522	8.4	30.9	21	11	35.8	17.9	0.06
ZK402-1	磁铁矿	热液期	0.75	166	6.32	57.1	25.3	43.2	37.5	16.5	0.104

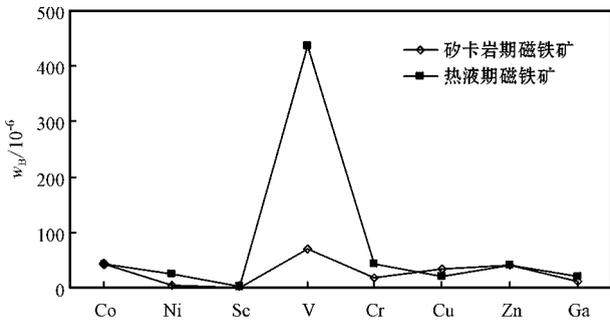


图 9 红云滩铁矿床磁铁矿微量元素平均含量分布图

Fig. 9 Trace element patterns of magnetite from the Hongyuntan iron deposit

不同成因磁铁矿 Co、Ni 及 Co/Ni 比值明显不同,具有一定的成因意义(叶庆同,1982),两期磁铁矿 Co、Ni 含量均较低,而 Ni/Co=(0.05~0.69)<2 为热液成因(赵玉社,2000),与典型的接触交代型磁铁矿相比, Ni/Co 比值接近但 Co、Ni 含量要小(叶庆同,1982;王奎仁,1989;汤蔡联,1990),说明磁铁矿的形成与典型的接触交代矽卡岩型还有一定区别。

### 5.3 矿床成因

一般认为矽卡岩由酸性-中酸性花岗质岩体与碳酸盐岩以及富钙镁质的碎屑岩接触交代作用而形成,接触带广泛发育矽卡岩,矽卡岩与大量金属堆积成矿密切相关(程裕淇等,1994;赵一鸣等,1990;赵一鸣,2002)。红云滩铁矿矿体呈层状、似层状、透镜状赋存于下石炭统雅满苏组富钙安山质火山岩地层中,矿体及其周围发育大量的矽卡岩矿物,但铁矿体与矽卡岩并不是沿岩体接触带分布,而且在钾长花岗岩及闪长岩岩体的接触带上也并未发育矽卡岩化。这与典型的产于接触带的矽卡岩有一定差异,

而与新疆阿尔泰地区蒙库铁矿(杨富全等,2007)、乌吐布拉克铁矿(张志欣等,2011)、西天山查岗诺尔铁矿矽卡岩阶段矿化(洪为等,2012)以及东天山雅满苏铁矿(李万茂等,1986;王兴保,2005)的地质特征相似,均产于明显受构造控制的矽卡岩带内,而矽卡岩矿物的化学组成和我国一些交代矽卡岩型矿床中的钙矽卡岩(赵一鸣等,1990)基本相同。赋存铁矿体的地层为下石炭统火山碎屑岩,该地层又被早石炭世的红云滩岩体(王碧香等,1989;吴昌志等,2006)所吞噬呈残留顶盖产出,推测铁矿体形成于早石炭世,阿奇山-雅满苏一带在早石炭世为俯冲岛弧环境(马瑞士等,1993;姬金生等,1994;周济元等,1994;杨兴科等,1999),暗示成矿作用与俯冲环境下的岩浆活动有关,成矿物质为岩浆来源。矿石硫化物硫同位素值分布区间为-1‰~1‰(张增杰等,2012),也表现为岩浆硫或幔源硫的特征。矿区内火山碎屑岩地层分布极为有限,提供大量铁质来源的可能性很小,根据矿床所处大地构造环境、矿床地质特征及硫同位素表明成矿铁质来源可能以岛弧岩浆活动所携带的深部铁质为主。

阿奇山-雅满苏铁成矿带内火山机构发育,火山机构控制着大量铁矿床的分布(张成和等,1980),这与西天山阿吾拉勒成矿带具有相似性(陈毓川等,2008)。阿吾拉勒成矿带内火山岩型铁成矿作用与火山-次火山岩的喷发、侵入活动密切相关(张作衡等,2012)。两个成矿带中铁矿床在成矿地质特征上也有明显的共同点:① 矿体多赋存在火山碎屑岩中,以富钙、富碱的安山质凝灰岩为主;② 矿体多受古火山机构及断裂控制;③ 矿石以磁铁矿为主,具有富铁低磷的特点;④ 发育大量的围岩蚀变,以钠(钾)钙质蚀变为主,常见有石榴石化、透辉石化、阳

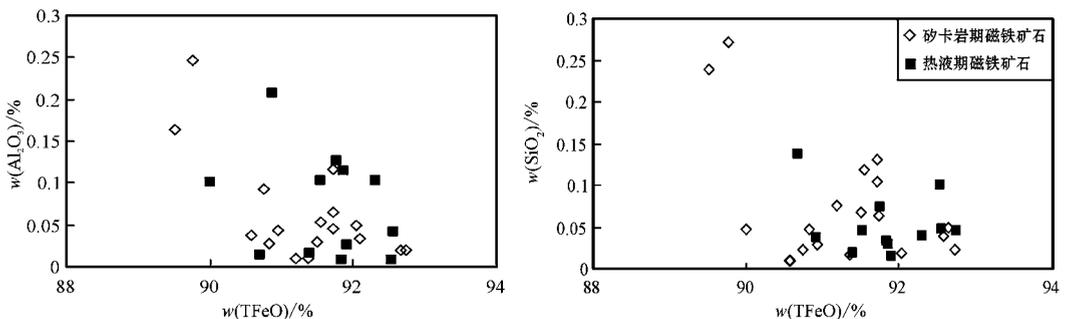


图 10 红云滩铁矿床磁铁矿中氧化物相关图

Fig. 10 Oxides correlation diagram of magnetite from the Hongyuntan iron deposit

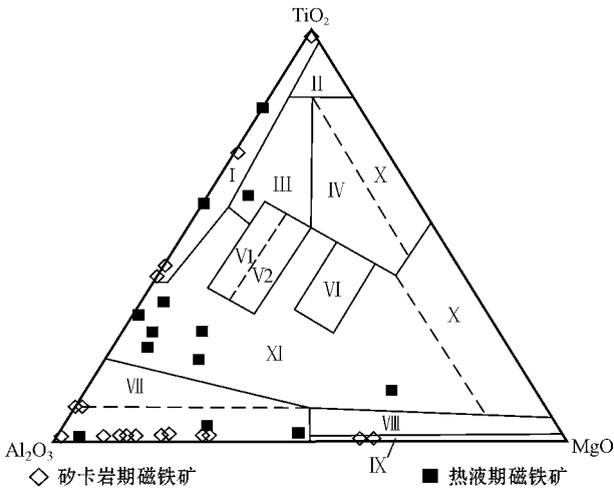


图 11 红云滩铁矿磁铁成因图解(据王顺金, 1984)

Fig. 11 Genetic diagram of magnetite from the Hongyuntan iron deposit (after Wang Shunjin, 1984)

I—花岗岩区; II—玄武岩区; III—辉长岩区; IV—橄榄岩区; V1—角闪岩区; V2—闪长岩区; VI—金伯利岩区; VII—热液型及钙矽卡岩型(虚线以上主要为深成热液型, 以下为热液型及钙矽卡岩型); VIII—热液型、镁矽卡岩型; IX—沉积变质、热液叠加型; X—碳酸盐岩区; XI—过渡区

I—granite area; II—basalt area; III—gabbro area; IV—peridotite area; V1—amphibolite area; V2—diorite area; VI—kimberlite area; VII—hydrothermal type and Ca-skarn type; VIII—hydrothermal type and Mg-skarn type; IX—sedimentary metamorphism type and hydrothermal superposition type; X—carbonate area; XI—transition area

起石化、绿帘石化、绿泥石化等。结合红云滩铁矿的成矿地质特征表明红云滩铁矿成矿作用也与岩浆活动关系紧密。结合矿物学和矿物地球化学特征, 认为红云滩矿床中的矽卡岩是由俯冲环境产生的富铁岩浆热液沿断裂运移、交代富钙安山质火山岩所形成。在矽卡岩阶段首先形成了钙铁榴石-钙铝榴石系列及透辉石-钙铁辉石系列矿物, 退化蚀变阶段形成一套含水硅酸盐类矿物, 主要以阳起石、绿帘石、绿泥石为主, 其次是透闪石、镁角闪石等。随着矽卡岩的退化蚀变作用的发生, 导致铁元素大量沉淀, 形成了大量的块状及稠密浸染状矿石, 构成了红云滩主矿体。到了热液期, 温度持续降低, 氧逸度不断下降, 受到不同成分热液的影响, 形成了少量的脉状和浸染状铁矿化及硫化物。

## 6 结论

(1) 红云滩铁矿赋存于下石炭统雅满苏组安山

质凝灰岩中, 矿体呈似层状、层状、透镜状产出在矽卡岩蚀变带中, 受断裂构造控制明显, 成矿阶段可划分为矽卡岩阶段、退化蚀变阶段、热液早期阶段及石英-硫化物阶段。

(2) 红云滩铁矿床矽卡岩中石榴石端员组分属于钙铁榴石-钙铝榴石系列, 辉石端员组分属于透辉石-钙铁辉石系列, 角闪石端员组分主要以阳起石和透闪石为主, 还有绿帘石、绿泥石等。矽卡岩为热液交代矽卡岩中的钙矽卡岩。磁铁矿的主要组分、微量元素显示其形成与钙质矽卡岩的形成有关。

(3) 结合矿床地质特征及矿物地球化学特征, 认为红云滩铁矿为与岩浆热液有关的矽卡岩型矿床。

致谢 野外工作期间, 得到了新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局董连慧总工程师及第一地质大队肖忠和刘国辉高级工程师的大力支持; 在国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 得到陈振宇助理研究员和陈晓丹研究实习员等的指导, 在此一并表示诚挚的感谢!

## References

- Chen Yuchuan, Liu Dequan, Tang Yanling, *et al.* 2008. Deposits and Metallogenic System of Tianshan in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 246~287(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yuqi, Zhao Yiming and Lin Wenwei. 1994. Iron Deposit from China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 386~479(in Chinese with English abstract).
- David B F and Philip K S. 2005. Controls on skarn mineralization and alteration at the Cadia deposits, New South Wales, Australia[J]. *Economic Geology*, 99: 761~788.
- Ding Tianfu. 1990. The geological characteristics of stratabound iron deposit in the Yamansu formation in Xinjiang[J]. *Regional Geology of China*, 3: 269~277(in Chinese with English abstract).
- Feng Jing, Xu Shiqi, Tian Jiangtao, *et al.* 2009. Study on metallogenic regularity of marine volcanic-type iron ore of east Tianshan of Xinjiang and methods discuss[J]. *Xinjiang Geology*, 27(4): 330~336 (in Chinese with English abstract).
- Hong Wei, Zhang Zuoheng, Zhao Jun, *et al.* 2012. Mineralogy of the Chaganguoer iron deposit in Western Tianshan Mountains, Xinjiang, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(2): 191~211(in Chinese with English abstract).
- Ji Jinsheng, Tao Hongxiang and Yang Xingke. 1994. Geochemical char-

- acteristics of volcanic rocks within different tectonic settings in the central part of East Tianshan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13(4):297~304(in Chinese with English abstract).
- Jiang Fuzhi, Qin Kezhang and Wang Shulai. 2002. Types, geological characteristics, metallogenic regularity and exploration target of iron deposits in eastern Tianshan mountains[J]. *Xinjiang Geology*, 20(4):379~383(in Chinese with English abstract).
- Leake B E, Woolley A R and Arps C E S. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Mineral and Mineral Names[J]. *American Mineralogist*, 82:1019~1037.
- Li Wanmao, Chen Guoying and Sun Shurong. 1986. A study on the mineral paragenesis of Yanmansu iron deposit[J]. *Exploration of Nature*, 5(16):119~125(in Chinese with English abstract).
- Ma Ruishi, Wang Ciyin and Ye Shangfu. 1993. Tectonic Framework and Evolution of the Eastern Tianshan Mountains[M]. Nanjing University Publishing House:1~225(in Chinese with English abstract).
- Meinert L D. 1992. Skarns and skarn deposits[J]. *Geoscience Canada*, 19:145~162.
- Овчинников Л Н. 1980. О лолитенности скарновых железорудных месторождений[J]. *Геология Рудных Месторождений*, 22(3):58~73.
- Tang Cailian. 1990. Typomorphic characteristic of magnetite and actual significance of Fushan iron deposit[J]. *Hebei Geology Information*, (4):32~36(in Chinese with English abstract).
- Tu Guangzhi. 1981. Several thinking methods in geology[J]. *Geology and Exploration*, (7):1~5(in Chinese with English abstract).
- Wang Bixiang, Li Zhaonai, Zhao Guangzan, et al. 1989. Geochemistry characteristic of granide from eastern part of North Tianshan in Xinjiang[J]. *Journal of Geology*, 63(3):237~245(in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Chunjie, Chen Zhenghui, et al. 2006. Metallogenic characteristics and direction in mineral search in the East Tianshan, Xinjiang, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(8):910~915(in Chinese with English abstract).
- Wang Jingbin, Wang Yuwang and He Zhijun. 2006. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan mountain, NW China[J]. *Geology in China*, 33(3):461~469(in Chinese with English abstract).
- Wang Kuiren. 1989. *Genetic Mineralogy of Earth and Universe*[M]. Hefei: Anhui education Publishing House, 108~129.
- Wang Shunjin. 1984. *Appliance of Genetic Mineralogy*[M]. Beijing: Wuhan Institute of Geology, 1~150(in Chinese).
- Wang Xingbao. 2005. Geology characteristics and genesis of Yamansu iron deposits[J]. *Contribution to Geology and Mineral resources Research*, 20(supplement):125~128(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengting. 1980. A discussion on minerogenetic model of Hongyuntan iron deposit in the Northern Tianshan mountain[J]. *Bulletin Chinese Acad. Geol. Sci.*, 1(2):115~127(in Chinese with English abstract).
- Wu Changzhi, Zhang Zhizun, Khin Zaw, et al. 2006. Geochronology, geochemistry and tectonic significances of the Hongyuntan granitoids in the Qoltag area, Eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5):1121~1134(in Chinese with English abstract).
- Xu Guofeng and Shao Lianjie. 1979. Typomorphic characteristic of magnetite and actual significance[J]. *Geology and Exploration*, (3):30~37(in Chinese with English abstract).
- Xu Lingang, Zheng Jianmin, Yang Fuquan, et al. 2006. Geological and Geochemical characteristics of the Mengku iron deposit in Fuyun County[J]. *Mineral Deposit*, 25(supplement):329~332(in Chinese with English abstract).
- Xu Shiqi, Zhao Tongyang, Feng Jin, et al. 2011. Study on regional metallogenic regularity of marine volcanic type iron ore in the east Tianshan of Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 29(2):173~177(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Xu Lingang, et al. 2007. REE geochemistry of the Mengku iron deposit, Xinjiang and its indication for iron mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10):2443~2456(in Chinese with English abstract).
- Yang Xingke, Ji Jinsheng, Chen Qiang, et al. 1999. Features and significance of regional ductile shear zone, Eastern Tianshan[J]. *Xinjiang Geology*, 17(1):55~64(in Chinese with English abstract).
- Ye Qingtong. 1982. Typomorphic characteristics and genesis significance of magnetite from some iron deposit in Eastern Guangdong[J]. *Acta Petrologica Mineralogica et Analytica*, 1(1):44~51(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chenghe and Ding Tianfu. 1980. Carboniferous marine volcano rock type ore deposit forming conditions in Tianshan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 3:1~18(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zengjie, Sun Jingbo, Hu Mingyue, et al. 2012. Study on stable isotopic characteristics of the Hongyuntan iron deposit of Eastern Tianshan and their implications for the process of mineralization[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(6):918~924(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhixin, Yang Fuquan, Luo Wucang, et al. 2011. Skarn mineral characteristics of the Wulubulake iron deposit in Altay, Xinjiang, and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(2):267~280(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuoheng, Hong Wei, Jiang Zongsheng, et al. 2012. Geological features, mineralization types and metallogenic setting of Late Paleozoic iron

- deposits in western Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 31(5): 941~964 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Bin and Barton M D. 1987. Compositional characteristics of garnets and pyroxenes in contact-metamorphic skarn deposits and their relationship to metallization[J]. Acta Mineralogica Sinica, 7(1): 1~8.
- Zhao Bin, Li Tongjin, Li Zhaoping, et al. 1982. A study on garnet from some skarn deposits in China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2(4): 296~304.
- Zhao Jinsong and Newberry R J. 1996. Novel knowledge on the origin and mineralization of skarns from Shizhuyuan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2(4): 296~304.
- Zhao Yiming, Lin Wenwei and Bi Chengsi. 1990. Skarn Deposit in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1~351 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Zhang Yinan and Lin Wenwei. 1997. Characteristics of pyroxenes and pyroxenoids in skarn deposits of China and their relationship with metallization[J]. Mineral Deposits, 16(4): 318~329 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming. 2002. Some new important advances in study of skarn deposits[J]. Mineral Deposit, 21(2): 113~121 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yushe. 2000. Geology characteristics and genesis of Cihai iron deposit in Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 33(1): 31~38 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiyuan, Mao Yanshi, Huang Zhixun, et al. 1994. Ancient continental margin volcano geology in the Eastern Tian-shan[J]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Publishing House, 1~280 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenhua, Liu Hongwei, Chang Guoxiong, et al. 2011. Mineralogical characteristics of skarns in the Huanggang Sn-Fe deposit of Inner Mongolia and their merallogenic indicating significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 30(1): 97~112 (in Chinese with English abstract).
- 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 等. 2008. 中国天山矿产及成矿体系[M]. 北京: 地质出版社, 246~287.
- 程裕淇, 赵一鸣, 林文蔚. 1994. 中国铁矿床(中册)[M]. 北京: 地质出版社, 386~479.
- 丁天府. 1990. 新疆雅满苏组层控型铁矿的地质特征[J]. 中国区域地质, 3: 269~272.
- 冯京, 徐仕琦, 田江涛, 等. 2009. 东天山海相火山岩型铁矿成矿规律研究方法[J]. 新疆地质, 27(4): 330~336.
- 洪为, 张作衡, 赵军, 等. 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.
- 姬金生, 陶洪祥, 杨兴科. 1994. 东天山中段不同构造环境火山岩地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 13(4): 297~304.
- 姜福芝, 秦克章, 方同辉, 等. 2002. 东天山铁矿床类型、地质特征成矿规律与找矿方向[J]. 新疆地质, 20(4): 379~383.
- 李万茂, 陈国英, 孙淑荣. 1986. 新疆雅满苏铁矿床矿物共生组合的研究[J]. 大自然探索, 5(16): 119~125.
- 马瑞士, 王赐银, 叶尚夫. 1993. 东天山构造格架及地壳演化[M]. 南京大学出版社, 1~225.
- 汤蔡联. 1990. 符山铁矿磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 河北地质情报, (4): 32~36.
- 涂光炽. 1981. 地质学中的若干思维方法[J]. 地质与勘探, (7): 1~5.
- 王碧香, 李兆鹏, 赵光赞, 等. 1989. 新疆北天山东段花岗岩类地球化学特征[J]. 地质学报, 63(3): 237~245.
- 王登红, 李纯杰, 陈郑辉, 等. 2006. 东天山成矿规律与找矿方向的初步研究[J]. 地质通报, 25(8): 910~915.
- 王京彬, 王玉往, 何志军. 2006. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. 中国地质, 33(3): 461~469.
- 王奎仁. 1989. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 108~129.
- 王顺金. 1984. 成因矿物学应用[M]. 武汉: 武汉地质学院, 1~150.
- 王兴保. 2005. 雅满苏铁矿床地质特征及成因浅析[J]. 地质找矿论丛, 20(增刊): 125~128.
- 王正廷. 1980. 北天山红云滩铁矿成矿模式探讨[J]. 中国地质科学院院报天津地质矿产所分刊, 1(2): 115~127.
- 吴昌志, 张志遵, Khin Zaw, 等. 2006. 东天山觉罗塔格红云滩花岗岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 22(5): 1121~1134.
- 徐国风, 邵洁涪. 1979. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探, (3): 30~37.
- 徐林刚, 郑建民, 杨富全, 等. 2006. 新疆富蕴县蒙库铁矿床地质特征及地球化学特征[J]. 矿床地质, 25(增刊): 329~332.
- 徐仕琪, 赵同阳, 冯京, 等. 2011. 东天山海相火山岩型铁矿区域成矿规律研究[J]. 新疆地质, 29(2): 173~177.
- 杨富全, 毛景文, 徐林刚, 等. 2007. 新疆蒙库铁矿床稀土元素地球化学及对铁成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 23(10): 2443~2456.
- 杨兴科, 姬金生, 陈强, 等. 1999. 东天山区域韧性剪切带特征[J]. 新疆地质, 17(1): 55~64.
- 叶庆同. 1982. 粤东一些铁矿床中磁铁矿的标型特征及成因意义[J]. 岩矿测试, 1(1): 44~51.
- 张成和, 丁天府. 1980. 试论新疆天山地区石炭纪海相火山岩型铁矿成矿条件[J]. 新疆地质, 3: 1~18.
- 张增杰, 孙敬博, 胡明月, 等. 2012. 东天山红云滩铁矿稳定同位素

## 附中文参考文献

- 地质特征及其对成矿作用过程的指示[J]. 地球学报, 33(6): 918~924.
- 张志新, 杨富全, 罗五仓, 等. 2011. 新疆阿尔泰乌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): 267~280.
- 张作衡, 洪为, 蒋宗胜, 等. 2012. 新疆西天山晚古生代铁矿床的地质特征、矿化类型及形成环境[J]. 矿床地质, 31(5): 941~964.
- 赵斌, Barton M D. 1987. 接触交代矽卡岩型矿床中石榴石和辉石成分特点及其矿化的关系[J]. 矿物学报, 7(1): 1~8.
- 赵斌, 李统锦, 李昭平, 等. 1982. 我国一些矽卡岩中石榴石的研究[J]. 矿物学报, 2(4): 296~304.
- 赵劲松, Newberry R J. 1996. 对柿竹园矽卡岩成因及其成矿作用的新认识[J]. 矿物学报, 2(4): 296~304.
- 赵一鸣. 2002. 矽卡岩矿床研究的某些重要新进展[J]. 矿床地质, 21(2): 113~121.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思. 1990. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1~351.
- 赵一鸣, 张轶男, 林文蔚. 1997. 我国矽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): 318~329.
- 赵玉社. 2000. 新疆磁海铁矿床地质特征及矿床成因[J]. 西北地质, 33(1): 31~38.
- 周济元, 茅燕石, 黄志勋, 等. 1994. 东天山古大陆边缘火山地质[J]. 成都: 成都科技大学出版社, 1~280.
- 周振华, 刘宏伟, 常帽熊, 等. 2011. 内蒙古黄冈铁矿床矽卡岩矿物学特征及其成矿指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(1): 97~112.

www.yskw.ac.cn