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*

姚磊[1] 谢桂青[2**] 张承帅[1] 刘佳林[1] 杨海波[1] 郑先伟[3] 刘晓帆[4]

YAO Lei[1], XIE GuiQing[2**], ZHANG ChengShuai[1], LIU JiaLin[1], YANG HaiBo[1], ZHENG XianWei[3] and LIU XiaoFan[4]

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室,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和资源评价重点实验室,北京 100037
3. 武汉钢铁集团矿业有限责任公司程潮铁矿,鄂州 436051
4. 北京华油联合燃气开发有限公司,北京 100101

1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
2. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
3. *Chengchao Iron Mine of Wuhan Iron & Steel Group Minerals Co., Ltd, Ezhou* 436051, *China*
4. *Beijing Huayou Union Gas Development Co., Ltd, Beijing* 100101, *China*

2011-09-18 收稿, 2011-11-30 改回.

Yao L, Xie GQ, Zhang CS, Liu JL, Yang HB, Zheng XW and Liu XF. 2012. Mineral characteristics of skarns in the Chengchao large-scale Fe deposit of southeastern Hubei Province and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1):133 – 146

Abstract Chengchao Fe deposit is a typical skarn deposit in southeastern Hubei Province. Electron microprobe analyses show that the end member of garnets in the skarn stage is dominated by andradite, with minor grossular. The clinopyroxene comprises mainly diopside, with minor hedenbergite. The amphibole in the Chengchao Fe deposit mostly belongs to calcic amphiboles, such as pargasite, tremolite, actinolite and ferropargasite. The end member of garnets in the vein skarn is between andradite and grossular. Vein clinopyroxene is dominated by diopside. Characteristics of skarn in Chengchao Fe deposit shows that granite may play a key role in the formation of skarns and ore bodies.

Key words Skarn; Mineralogy; Chengchao Fe deposit; Southeastern Hubei Province

摘 要 程潮铁矿是鄂东南地区典型的矽卡岩铁矿,迄今为止对其矽卡岩矿物学特征研究较少。本文以程潮铁矿主要矽卡岩矿物为研究对象,利用电子探针技术对该矿矽卡岩矿物学特征进行了研究。电子探针分析结果表明:程潮铁矿石榴石和辉石分别以钙铁榴石和透辉石为主;角闪石主要是韭闪石,其次为铁韭闪石、透闪石、阳起石。其中,早期矽卡岩阶段的石榴石和辉石分别以钙铁榴石和透辉石为主;晚期脉状矽卡岩阶段的石榴石端员组分介于钙铁榴石和钙铝榴石之间,而辉石则相对于早期矽卡岩阶段的辉石更趋近于钙铁辉石端员。通过矽卡岩矿物学特征研究表明,花岗岩对矽卡岩和矿体的形成起到了重要作用。

关键词 矽卡岩;矿物学;程潮铁矿;鄂东南

中图法分类号 P618.31

---

* 本文受国土资源部公益性行业课题(200911007-18)、科学技术部973课题(2012CB416802)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(K0902)和地质大调查项目(1212011120994)联合资助.

第一作者简介:姚磊,男,1986年生,硕士生,矿床学专业,E-mail: lemmon20054255@yahoo.com.cn

** **通讯作者**:谢桂青,男,1975年生,研究员,地球化学专业,E-mail: guiqingxie@sohu.com

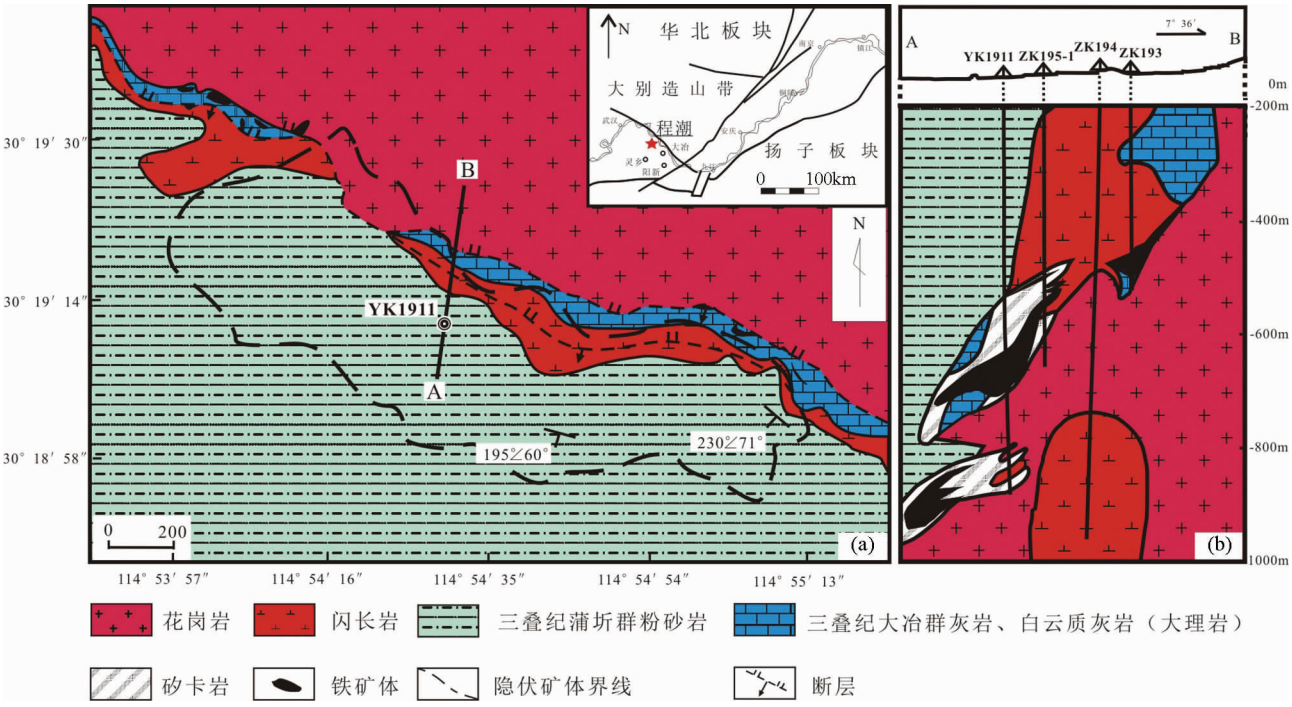


图 1 程潮铁矿地质简图(据翟裕生等,1992a;周涛发等,2008;Xie *et al.*, 2011a;中国冶金地质总局中南地质勘查院,2008①改绘)

(a)-程潮铁矿地质简图及隐伏矿体;(b)-程潮铁矿 W19 勘探线剖面图

Fig. 1 Geological map of the Chengchao skarn deposit(after Zhai *et al.*, 1992a;Zhou *et al.*, 2008;Xie *et al.*, 2011a)

(a)-simplified geologic map of the Chengchao Fe deposit and location of orebody; (b)-sketch of the W19 prospecting line plane section in the Chengchao Fe deposit

矽卡岩型矿床是一种重要的矿床类型(赵一鸣等,1990),其中的矽卡岩型 W、Sn、Cu、Mo、Fe、Zn、Pb 矿床具有重要的经济价值(Einaudi *et al.*, 1981;Meinert, 1992, 1993;Mao *et al.*, 1996, 2006, 2011a, b;Misra, 2000)。长江中下游地区是中国东部中生代大规模成矿的重要地区之一,也是中国一个重要的 Cu、Fe 和 Au 成矿带(Ge *et al.*, 1990;赵一鸣等,1990; 赵一鸣,1991;Mao *et al.*, 2006, 2011a;谢桂青等,2006a;毛景文等,2008),其中矽卡岩型矿床是本区最重要的矿床类型(常印佛等,1991)。鄂东南矿集区位于长江中下游地区铁铜成矿带西段,是我国重要的铁铜矿产基地之一(舒全安等,1992;李均权等,2005)。区内铁铜矿床主要以矽卡岩型为主,包括程潮、铁山、张福山等大型矽卡岩型铁矿床以及铜绿山等矽卡岩型铜矿。自 20 世纪 50 年代以来,众多地质工作者多以铁山铁矿床为研究对象,曾提出了著名的"大冶式"铁矿的矿床模式(裴荣富,1995),而对于程潮铁矿的关注和研究则相对较少。前人提出的"大冶式"矿床模式认为与铁矿有关的岩体为闪长岩和石英二长闪长岩(裴荣富,1995),而程潮铁矿主要矿体产于花岗岩与大理岩或花岗岩与闪长岩类岩石的接触带附近,因此大多数学者认为该矿床的成矿作用与花岗岩有关(翟裕生等,1992a;姚培慧等,1993)。但最新研究表明:程潮铁矿花岗岩、石英闪长岩和与其相关的矽卡岩铁矿在时间上近于同时形成(Xie *et al.*, 2011b),且部分矿体产于花岗岩与闪长岩接触带附近,说明程潮铁矿的闪长岩类岩石可能与矿床的形成也有着密切的联系。因此,程潮铁矿的成矿岩体与闪长岩有关还是与花岗岩有关一直存在争议。

前人曾对程潮铁矿的地质特征、地质构造、成矿时代、矿床成因等做了相应研究(翟裕生等,1982,1992a;舒全安等,1992;陈洪新,1993;姚培慧等,1993;谢桂青等,2006b,2008;闵厚禄等,2008;骆地伟,2008;王磊等,2009;夏金龙等,2009;Xie *et al.*, 2008, 2011a, b),但对于该矿床矽卡岩矿物学的系统研究工作尚薄弱。众所周知,在矽卡岩型矿床的研究中,矽卡岩矿物化学成分的研究工作具有十分重要的地位(Einaudi *et al.*, 1981, Einaudi and Burt, 1982)。程潮铁矿是长江中下游地区最大的矽卡岩型铁矿床,也是鄂东南地区具有代表性的矽卡岩型矿床(舒全安等,1992),本文拟通过开展矽卡岩矿物学特征研究,进而揭示其矽卡岩形成过程和成矿机制。

① 中国冶金地质总局中南地质勘查院. 2008. 程潮铁矿深部增加储量勘探报告(内部资料)

1 区域成矿地质背景

长江中下游地区位于扬子地块北缘的长江断裂带内,秦岭-大别造山带和华北地块南侧,其大地构造分区与下扬子拗陷吻合(图 1a)。已有研究表明:本区地质历史发展演化经历了三个不同的阶段,分别为前震旦纪基底发育阶段,震旦纪-早三叠世盖层沉积阶段和中晚三叠世-新生代板内变形阶段(常印佛等,1991;翟裕生等,1992a),其中在第三阶段中开始的燕山运动主要表现为强烈的断块运动,频繁的岩浆侵入和喷发活动以及大规模的成矿作用。区内出露的地层主要有零星分布的前震旦纪变质基底和震旦纪碎屑岩、白云岩和硅质岩,广泛发育有寒武纪至早三叠世的海相碳酸盐岩以及侏罗纪-白垩纪陆相火山岩夹碎屑岩。区内岩浆岩分布广泛,主要有粗面玄武岩、玄武安山岩、石英斑岩、闪长岩、花岗岩、石英二长岩、正长岩等晚中生代火山岩和Ⅰ型花岗岩(常印佛等,1991;邓晋福等,1992;Pei and Hong,1995),另外还发育有白垩纪碱性侵入-火山岩,主要包括石英正长岩、正长岩、石英二长岩、碱性花岗岩及响岩(唐永成等,1998)。区内矿产资源丰富,根据成矿时代和形成地质环境,可将该地区矿床类型分为晚侏罗-早白垩世矽卡岩型 Cu-Mo-Au 矿床、矽卡岩型 Cu-Fe 矿床和白垩纪中期的矽卡岩型 Fe 矿床(Mao *et al.*, 2011a)。

鄂东南地区地处扬子地块北缘,北与大别造山带相接,是长江中下游成矿带重要的组成部分。区内地层以三叠纪大冶组灰岩、蒲圻组砂页岩、侏罗纪武昌组含煤砂页岩和自流井组砂质碎屑岩、灵乡组、大寺组火山岩和火山碎屑岩分布广泛。谢桂青等(2006c)测得鄂东南地区金牛盆地大寺组火山岩锆石年龄为 128 ±1Ma,认为金牛盆地主体形成于早白垩世,与长江中下游地区其他火山岩盆地形成时代类似。已有研究表明:鄂东南地区三叠系地层控制了铜铁金等多金属的成矿(章广金,1977;蔡本俊,1981;翟裕生等,1992b;陈洪新,1993;王瑜等,2007;余宝岛,2008)。区内中生代岩浆岩广泛发育,其中包括鄂城、铁山、金山店、灵乡、阳新和殷祖 6 大侵入岩体及铜山口、阮家湾、龙角山等多个小侵入体,岩性主要为(石英)闪长岩和花岗闪长(斑)岩。北西西向褶皱和断裂为本区最重要的构造,也是主要的控矿构造,近南北向褶皱和断裂发育较差。区内矿产资源丰富,矿床类型主要包括:矽卡岩型铁矿床(程潮、铁山、张福山)、矽卡岩型铜铁矿床(铜绿山)、矽卡岩型铜钼矿床(李家湾)和矽卡岩-斑岩复合型铜钼矿床(封山洞、铜山口)等(舒全安等,1992)。

2 矿床地质特征

程潮铁矿床由百余个铁矿体及硬石膏矿体组成。铁矿体最大者长约 1700m,宽 350m,厚达 100 多米,一般为透镜状、囊团状和不规则状,并常见膨大、缩小、分枝和尖灭再现的现象;矿体倾向南或南南西,倾角 30°~47°。矿体向北西西侧伏,侧伏角 4°~12°,各矿体的赋存标高,从Ⅰ号到Ⅶ号矿体依次加深。硬石膏矿体一般叠加在铁矿体之上,或与铁矿体组成统一矿体。

矿区内地层出露较少,主要有三叠系和侏罗系,多分布在矿区南部。其中,与成矿有关的围岩主要是三叠系大冶群的灰岩及白云质灰岩(姚培慧等,1993;图 1a)。与成岩成矿有关的构造是北西西向褶皱和断裂构造。矿体的空间分布、产状和形态主要受北西西向主干逆断层—接触构造及其派生的张性断裂破碎带控制。区内与成矿有关的岩体为燕山晚期生成的鄂城岩体,其由不同期次侵入的黑云母辉石闪长岩、闪长岩、石英二长岩和花岗岩组成,属深源同熔型钙碱性花岗岩类岩石系列,其中与成矿关系密切的是肉红色中细粒花岗岩和闪长岩(姚培慧等,1993)。鄂城岩体主体相的中粒花岗岩形成于 130 ±1Ma,粗粒花岗岩形成于 127 ±1Ma,矿区的石英闪长岩形成于 129 ±2Ma(Xie *et al.*, 2011b)。矿区岩体往往发生不同程度的钾化和钠化蚀变,其中闪长岩中主要发生钠化,花岗岩中主要发生钾化。主要矿体产于花岗岩与大理岩或花岗岩与闪长岩的接触带(陈洪新,1993;王磊等,2009;图 1b)。

矿石的矿物成分较复杂,金属矿物主要有磁铁矿,另有少量黄铁矿、黄铜矿、赤铁矿等(图 2f),其中磁铁矿的电子探针分析结果显示:SiO_2 含量为 0.82% ~2.87%,FeO^T 为 87.49% ~91.91%,MgO 为 0.22% ~0.79%,TiO_2 为 0 ~0.1%,MnO 为 0 ~0.12%;非金属矿物除了矽卡岩矿物及退化蚀变矿物之外,还有石英、方解石、硬石膏、石膏、高岭土等矿物。矿石矿物结构主要为中-细粒结构、自形-半自形结构、交代残余结构和假象结构等;矿石构造主要有块状构造、浸染状构造等。根据矿石中的矿物组合特点可将矿石分为:磁铁矿矿石、石榴石透辉石磁铁矿矿石、角闪石磁铁矿矿石、金云母磁铁矿矿石和硬石膏磁铁矿矿石(图 2a-e)。磁铁矿矿石主要为磁铁矿,以及少量角闪石、金云母、黄铁矿、石英和碳酸盐矿物等;石榴石透辉石磁铁矿矿石主要由磁铁矿、透辉石和少量石榴石、角闪石等组成;角闪石磁铁矿矿石主要是磁铁矿、韭闪石以及少量黄铁矿和绿泥石等;金云母磁铁矿矿石主要由磁铁矿、金云母以及石英、黄铁矿等组成;硬石膏磁铁矿矿石主要由磁铁矿、硬石膏和少量黄铁矿、石英等组成。其中,磁铁矿矿石、金云母磁铁矿矿石和角闪石磁铁矿矿石均产于靠近花岗岩体的退化蚀变岩中;石榴石透辉石磁铁矿矿石可见产于靠近花岗岩体的石榴石透辉石矽卡岩中,例如钻孔 YK0011;硬石膏磁铁矿矿石见于钻孔 YK1611、WK3937 以及西区 -410.5 水平,在钻孔 YK1611 中,此类矿石产于石榴石透辉石矽卡岩与石榴石透辉石磁铁矿矿石之间,但产量不大,而在西区 -410.5 水平则产于矿体与闪长岩的接触带部位。

3 矽卡岩及退化蚀变矿化阶段

程潮铁矿的矽卡岩主要为钙矽卡岩,由石榴石、透辉石

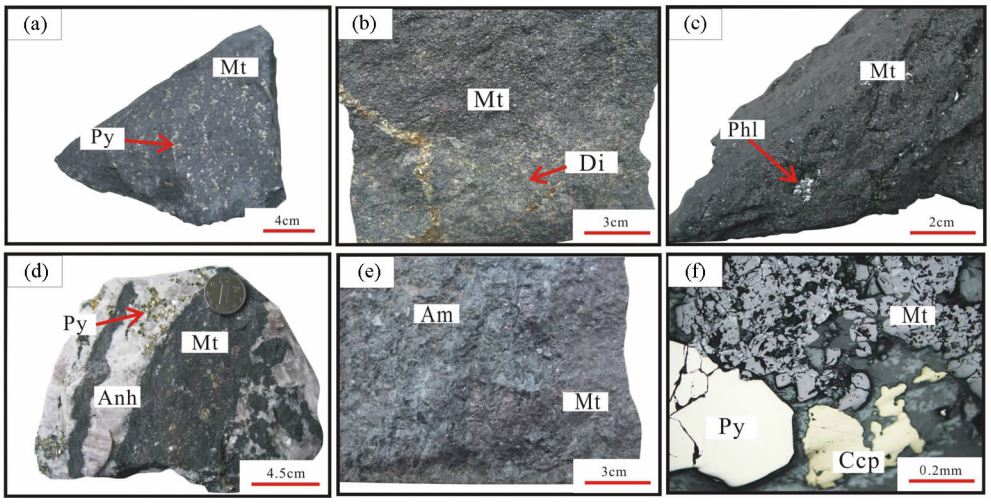


图 2 程潮铁矿典型矿石类型及金属矿物

(a)-磁铁矿(Mt)矿石;(b)-石榴石透辉石(Di)磁铁矿矿石;(c)-金云母(Phl)磁铁矿矿石;(d)-硬石膏(Anh)磁铁矿矿石;(e)-角闪石(Am)磁铁矿矿石;(f)-磁铁矿、黄铁矿(Py)和黄铜矿(Ccp)(反射光)

Fig. 2 Typical ore types and metallic minerals of the Chengchao Fe deposit

(a)-magnetite (Mt) ore; (b)-garnet-diopside (Di)-magnetite ore; (c)-phlogopite (Phl)-magnetite ore; (d)-anhydrite (Anh)-magnetite ore; (e)-amphibole (Am)-magnetite ore; (f)-magnetite, pyrite (Py) and chalcopyrite (Ccp) (under reflective light)

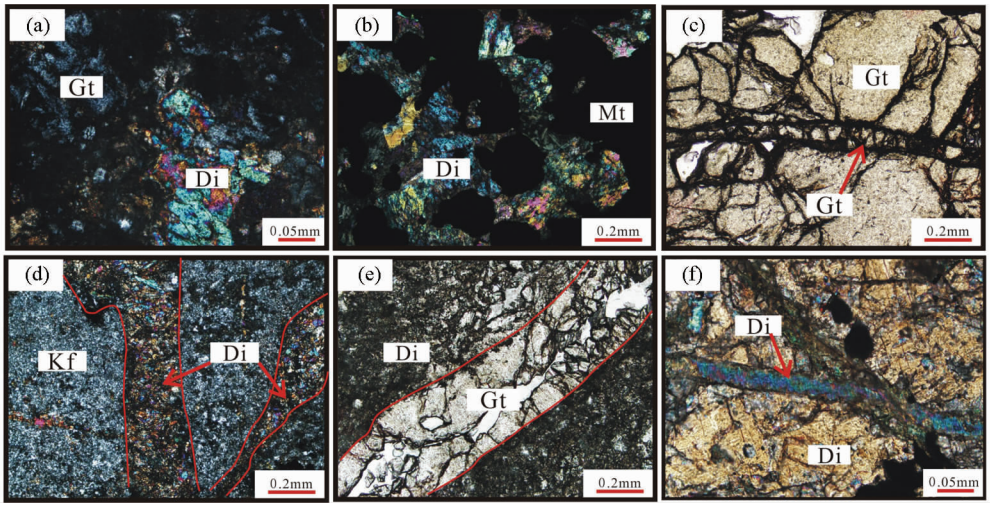


图 3 程潮铁矿典型的矽卡岩矿物

(a)-矽卡岩阶段石榴石(Gt)与透辉石(Di)共生(正交偏光);(b)-透辉石与磁铁矿(Mt)共生(正交偏光);(c)-晚期脉状石榴石切穿早期石榴石(单偏光);(d)-钾长石(Kf)化角岩中的脉状透辉石(正交偏光);(e)-脉状石榴石(单偏光);(f)-脉状透辉石切穿早期透辉石(正交偏光)

Fig. 3 Typical skarn minerals of the Chengchao Fe deposit

(a)-garnet (Gt) associated with diopside (Di) (under transmitted light); (b)-diopside associated with magnetite (Mt) (under transmitted light); (c)-vein garnet cut through the garnet of the early skarn stage (under transmitted light); (d)-vein diopside in hornfels (under transmitted light); (e)-vein garnet (under transmitted light); (f)-vein diopside cut through the diopside of the skarn stage (under transmitted light)

等组成,退化蚀变矿物为韭闪石、浅闪石、阳起石、绿帘石和绿泥石等,主要分布于花岗岩与大理岩或花岗岩与闪长岩的接触带。此外,部分地段矽卡岩和退化蚀变岩中 Mg 含量较高,可见透辉石矽卡岩以及金云母、蛇纹石共生的现象。

矽卡岩有着一定的蚀变分带现象,以钻孔 YK1911 为例,由接触带向外可粗略划分为:石榴石透辉石矽卡岩、退化蚀变岩、石榴石矽卡岩、透辉石石榴石矽卡岩、含角闪石的角岩。石榴石透辉石矽卡岩为内矽卡岩,主要由透辉石组成,半自形-他形结构。退化蚀变岩是主要的含矿蚀变岩,其主要由磁铁矿、角闪石、金云母、透辉石、绿泥石、钠长石和钾长

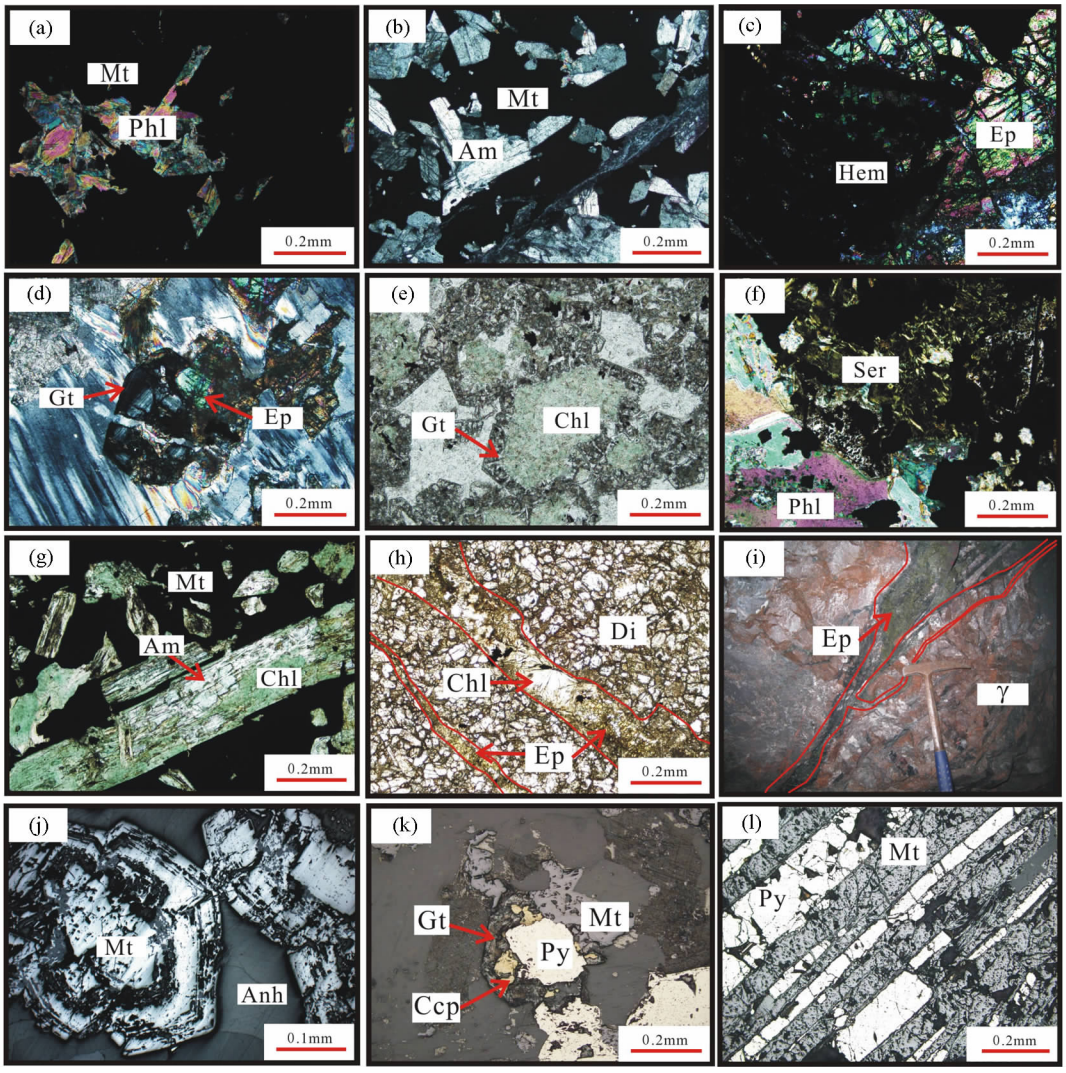


图 4　程潮铁矿典型的退化蚀变矿物和交代现象

(a)-磁铁矿(Mt)与金云母(Phl)共生(正交偏光);(b)-角闪石(Am)与磁铁矿共生(正交偏光);(c)-绿帘石(Ep)与赤铁矿(Hem)共生(正交偏光);(d)-绿帘石交代石榴石(Gt)(正交偏光);(e)-石榴石被绿泥石(Chl)交代(单偏光);(f)-蛇纹石(Ser)与金云母共生(正交偏光);(g)-绿泥石交代角闪石(正交偏光);(h)-脉状绿帘石;(i)-充填花岗岩(γ)体裂隙中的绿帘石;(j)-磁铁矿交代石榴石形成的假象(反射光);(k)-磁铁矿、黄铁矿(Py)、黄铜矿(Ccp)交代石榴石(反射光);(l)-黄铁矿沿磁铁矿裂隙面交代(反射光)

Fig. 4　Typical degradation altered minerals and metasomatic alteration of the Chengchao Fe deposit

(a)-phlogopite (Phl) associated with magnetite (Mt) in the retrograde stage (under transmitted light); (b)-amphibole (Am) associated with magnetite of the retrograde stage (under transmitted light); (c)-epidote (Ep) associated with hematite (Hem) (under transmitted light); (d)-epidote replacing garnet (Gt) (under reflective light); (e)-chlorite (Chl) replacing garnet (under trasmitted light); (f)-phlogopite associated with serpentine (Ser) (under transmitted light); (g)-chlorite replacing amphibole (under reflective light); (h)-vein epidote (under transmitted light); (i)-some epidotes fill in the fissure of granite (γ); (j)-magnetite replacing garnet (under reflective light); (k)-magnetite、pyrite (Py) and chalcopyrite (Ccp) replacing garnet (under reflective light); (l)-pyrite replacing magnetite along its fracture surface (under reflective light)

石等组成。其中角闪石和金云母多为自形-半自形、中-粗粒结构,磁铁矿往往与金云母和角闪石密切共生,多呈浸染状、块状或脉状。石榴石矽卡岩和透辉石石榴石矽卡岩中,透辉石多呈短柱状,半自形结构,石榴石环带结构较为发育。

根据矿物组合和共生关系,可将程潮铁矿的蚀变矿化阶段划分为:矽卡岩阶段(图 3a-f)、退化蚀变阶段(图 4a-l)和硫化物-碳酸盐阶段,其中矽卡岩阶段可分为早期矽卡岩阶段和晚期脉状矽卡岩阶段。早期矽卡岩阶段主要生成石榴石、透辉石等矽卡岩矿物(图 3a-c),这些矿物十分发育且主要分布于岩体与围岩的接触带;晚期脉状矽卡岩阶段主要生成石榴石、透辉石等矽卡岩矿物,但多分布于岩体、矽卡岩和角岩中呈脉状产出(图 3c-f),而在退化蚀变岩中未见分布,

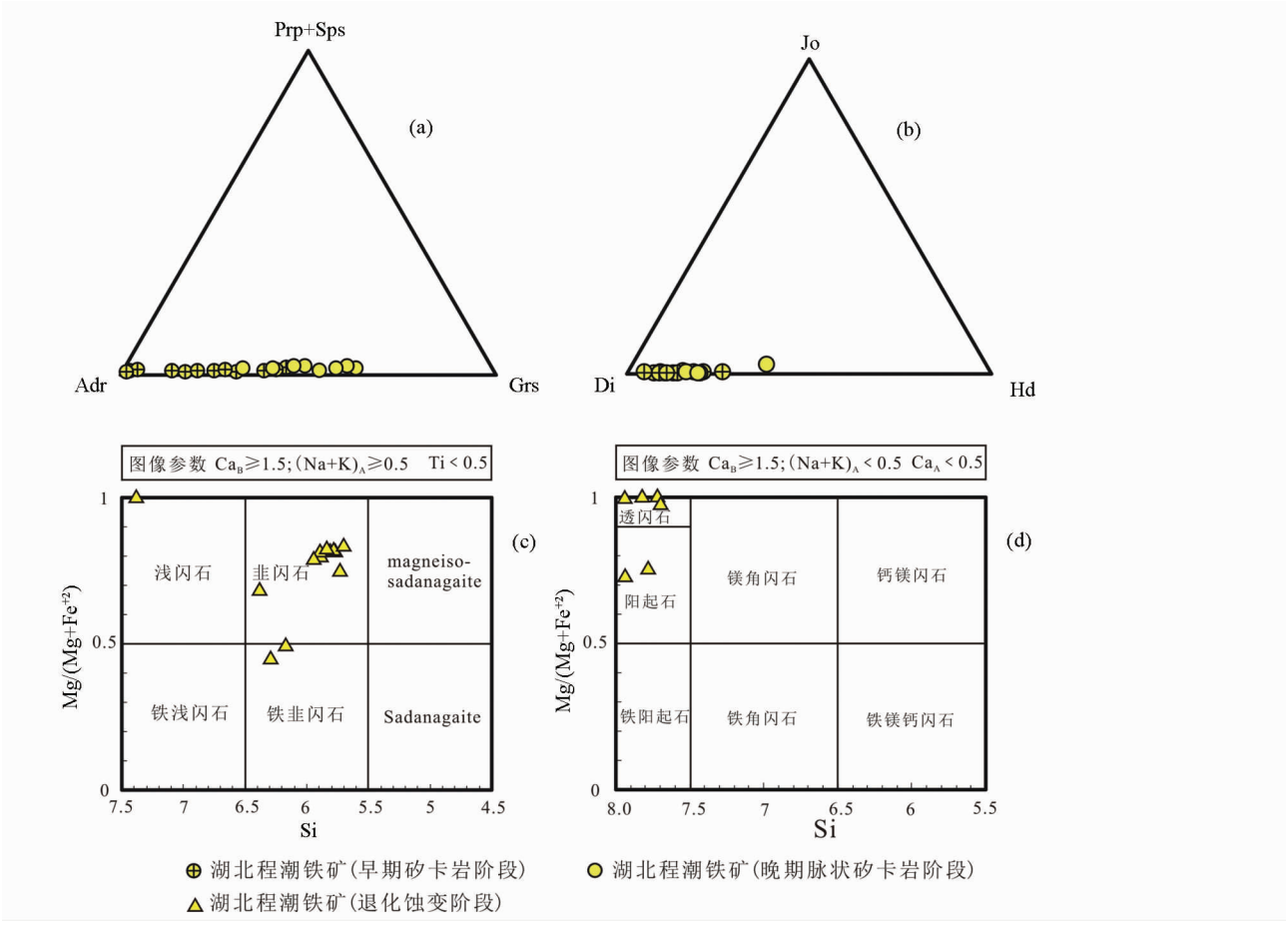


图 5 程潮铁矿石榴石(a)、辉石(b)的端员组分和角闪石分类(c、d,底图据 Leake *et al.*,1997)图解

Adr-钙铁榴石; Grs-钙铝榴石; Sps-锰铝榴石; Prp-镁铝榴石; Di-透辉石; Hd-钙铁辉石; Jo-锰钙辉石

Fig. 5 End members of garnets (a), clinopyroxenes (b) and classication of amphiboles (c, d, after Leake *et al.*, 1997) of Chengchao Fe deposit

Adr-andradite; Grs-grossularite; Sps-spessortite; Prp-pyrope; Di-diopside; Hd-hedenbergite; Jo-johannsenite

可见石榴石、透辉石脉切穿早期矽卡岩阶段矿物的现象(图 3c, f)。这些脉状矽卡岩与围岩有清楚的界线,脉旁交代蚀变现象微弱且几乎未发生退化蚀变作用。退化蚀变阶段是重要成矿阶段,主要生成磁铁矿、金云母、角闪石、绿帘石、绿泥石和蛇纹石等;这些矿物多充填交代矽卡岩期矿物(图 4d, e, j, k),部分退化蚀变岩呈脉状穿切早期矽卡岩或花岗岩岩体(图 4h, i)。硫化物-碳酸盐阶段主要有方解石、石英、硬石膏、石膏、黄铁矿、黄铜矿和赤铁矿等,其中方解石等多呈脉状分布于矽卡岩和矿体之中;黄铁矿多与黄铜矿共生,并可见其沿裂隙面充填交代磁铁矿的现象(图 4l)。各阶段矿物生成顺序见表 1。

4 矽卡岩矿物特征

矽卡岩和矿化之间不仅在空间上大致重合,时间上同时或相继形成,有着密切的成因和地球化学联系(赵一鸣等,1990)。程潮铁矿石榴石、透辉石、角闪石、金云母、绿泥石和绿帘石等矿物发育广泛,在空间上和成因上与成矿有着密切的联系,其主要矽卡岩矿物特征如下。

4.1 石榴石

程潮铁矿石榴石可分为两期:(1)早期矽卡岩阶段的石榴石分布广泛,多呈褐色,单偏光下常为浅褐色,极高正突起,正交偏光下有异常干涉色,可达Ⅰ级灰;粒径一般在 0.1~0.28mm 之间,多为自形-半自形、中-细粒结构,环带结构发育。其多与透辉石等矽卡岩矿物共生(图 3a),且往往被磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、绿泥石、绿帘石、碳酸盐和钾长石等矿物交代(图 4d, e, k),甚至可见磁铁矿交代石榴石形成的假象(图 4j)。(2)晚期脉状矽卡岩阶段的石榴石多呈浅褐色,自形-半自形、中-细粒结构,呈脉状产出,一般分布在远离矿体的矽卡岩(图 3e)、岩体和角岩中,可见脉状石榴石切穿早期石榴石的现象(图 3c)。此外,这种脉状石榴石在月山

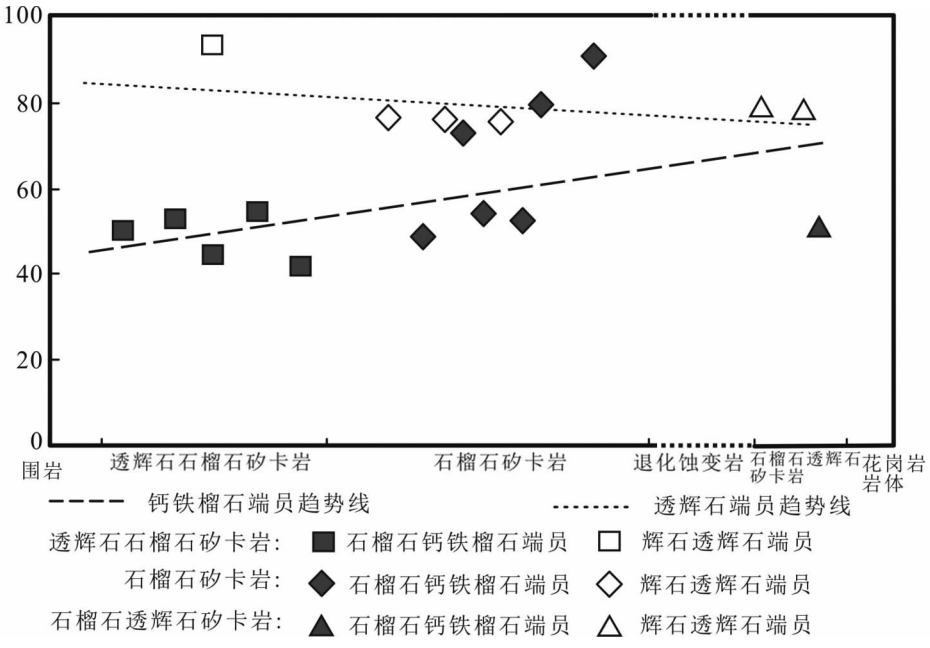


图 6 程潮铁矿钻孔 YK1911 石榴石和辉石端员组分变化示意图

Fig. 6 Graphic changes in garnets and pyroxenes end members of drill hole YK1911 from Chengchao Fe deposit

表 1 程潮铁矿床矿物生成顺序表

Table 1 Generalized paragenesis diagram of the Chengchao Fe deposit

矿物 \ 阶段	矽卡岩阶段		退化蚀变阶段	硫化物-碳酸盐阶段
	早期矽卡岩阶段	晚期脉状矽卡岩阶段		
石榴石	—	—		
透辉石	—	—		
普通角闪石			—	
绿帘石			—	
金云母			—	
磁铁矿			—	
透闪石-阳起石			—	
绿泥石			—	
蛇纹石			—	
钠长石			—	
钾长石			—	
石英				—
石膏				—
方解石				—
黄铁矿				—
黄铜矿				—

安庆铜矿、江苏伏牛山铜矿和湖南柿竹园 W-Sn-Mo-Bi 矿床等也有报道(翟裕生等,1992a;毛景文等,1996)。电子探针结果表明(表 2):程潮铁矿石榴石总体以钙铁榴石(37.43 ~ 97.78)为主(图 5a),其次为钙铝榴石(1.64 ~ 61.36),属钙铁榴石—钙铝榴石系列($Ad_{37\sim98}Gr_{2\sim61}Prp+Sps_{0.33\sim2.28}$)。结合电子探针数据可将程潮铁矿石榴石表示成:

$$Ca_{(2.88\sim3.06)}Mg_{(0\sim0.04)}Mn_{(0.01\sim0.04)}Fe^{2+}_{(0\sim0.03)}Fe^{3+}_{(0.74\sim2.0)}Al_{(0\sim1.20)}Ti_{(0\sim0.11)}Si_{(2.95\sim3.04)}O_{12}$$

其中,早期矽卡岩阶段石榴石的钙铁榴石端员组分变化范围在 49.61 ~ 97.78,钙铝榴石变化范围是 1.64 ~ 48.57;自形-半自形结构石榴石的钙铁榴石端员含量为 49.61 ~ 97.78,他形结构石榴石的钙铁榴石端员含量为 50.90 ~ 94.69;利用电子探针对一些环带发育较好的石榴石沿切面进行分析表明:由中心向外,石榴石各环带的钙铁榴石端员组分含量在 33.5 ~ 57.12 之间,变化不大或无明显规律。晚期脉状矽卡岩阶段的石榴石钙铁榴石变化范围在 37.43 ~ 66.55,钙铝榴石端员组分变化范围在 30.97 ~ 61.36,较早期石榴石明显偏向于钙铝榴石端员,介于钙铁榴石和钙铝榴石端员之间(图 5a)。此外,以钻孔 YK1911 为例,从接触带向外,石榴石钙铁榴石组分含量逐渐降低,钙铝榴石含量逐渐升高(图 6)。

4.2 辉石

辉石是矽卡岩的主要组成矿物之一,程潮铁矿的辉石可分为两期:(1)早期矽卡岩阶段的辉石分布广泛,主要以透辉石为主,多呈绿色或暗绿色,高正突起,有弱多色性;正交偏光下可见鲜艳Ⅱ级蓝、绿、紫等干涉色;粒径一般在 0.045 ~ 0.25mm 之间,多呈短柱状、自形-半自形结构,具典型辉石式解理,横断面对称消光。早期辉石分布广泛,多与石榴石、磁铁矿等矿物共生(图 3a, b)。(2)晚期脉状矽卡岩阶段的辉

表 2 程潮铁矿床代表性石榴石电子探针分析结果(wt%)

Table 2 Representative results of electron microprobe analysis of garnets from the Chengchao Fe deposit (wt%)

样品号	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5	Cr_2O_3	NiO	Total
CC156-0-3	36.11	2.82	23.95	0.06	33.07	0.00	0.01	0.55	1.22	0.03	0.00	0.00	97.81
CC161-1-1	36.56	5.37	21.91	0.10	33.76	0.00	0.01	0.18	0.32	0.00	0.00	0.00	98.20
CC163-1-1	38.15	8.48	16.39	0.29	34.29	0.08	0.00	0.26	1.30	0.02	0.03	0.00	99.28
CC174-1-1	38.42	10.07	14.97	0.33	34.73	0.02	0.00	0.20	0.53	0.01	0.03	0.00	99.30
CC204-0-3	36.44	3.69	23.78	0.01	33.29	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.04	97.40
CC369-0-1	37.31	4.46	23.05	0.03	33.31	0.00	0.00	0.24	0.12	0.05	0.00	0.00	98.57
CC166-3-1	38.31	8.53	17.53	0.19	34.05	0.00	0.00	0.23	0.83	0.05	0.00	0.04	99.76
CC169-0-1	37.34	12.89	11.25	0.14	34.76	0.02	0.00	0.28	1.88	0.01	0.00	0.00	98.57
CC193-0-1	38.67	12.67	11.90	0.30	34.86	0.02	0.00	0.39	0.62	0.00	0.00	0.04	99.47

样品号	Si	Ti	Al	Cr	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Mn	Mg	Ca	And	Pyr	Spe	Gro	Alm
CC156-0-3	2.99	0.08	0.28	0.00	1.66	0.00	0.04	0.01	2.93	83.48	0.24	1.30	14.98	0.00
CC161-1-1	2.99	0.02	0.52	0.00	1.48	0.02	0.01	0.01	2.95	74.12	0.39	0.42	24.50	0.55
CC163-1-1	3.03	0.08	0.79	0.00	1.09	0.00	0.02	0.03	2.92	54.99	1.16	0.60	43.18	0.00
CC174-1-1	3.03	0.03	0.94	0.00	0.99	0.00	0.01	0.04	2.94	49.61	1.29	0.45	48.57	0.00
CC204-0-3	3.02	0.00	0.36	0.00	1.63	0.02	0.01	0.00	2.95	81.90	0.05	0.36	17.09	0.60
CC369-0-1	3.04	0.01	0.43	0.00	1.54	0.03	0.02	0.00	2.91	78.26	0.10	0.56	20.12	0.96
CC166-3-1	3.03	0.05	0.79	0.00	1.15	0.00	0.02	0.02	2.88	59.25	0.76	0.52	39.35	0.12
CC169-0-1	2.95	0.11	1.20	0.00	0.74	0.00	0.02	0.02	2.94	37.43	0.57	0.64	61.36	0.00
CC193-0-1	3.02	0.04	1.17	0.00	0.78	0.00	0.03	0.03	2.92	39.15	1.17	0.86	58.82	0.00

注:0.00 为低于检测限;分析精度为 0.0n %;FeO 为 Fe^T;分析者:陈小丹、王枫

表 3 程潮铁矿床代表性辉石电子探针分析结果(wt%)

Table 3 Representative results of electron microprobe analysis of clinopyroxenes from the Chengchao Fe deposit (wt%)

样品号	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5	Cr_2O_3	NiO	Total
CC166-3-2	55.74	0.17	1.49	17.12	25.10	0.09	0.00	0.11	0.00	0.00	0.02	0.03	99.86
CC193-0-7	49.65	3.88	7.95	12.57	23.58	0.49	0.00	0.13	0.18	0.02	0.02	0.00	98.46
CC201-1-1	52.77	2.76	2.80	15.91	25.57	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	99.89
CC201-1-3	51.02	4.76	4.22	14.91	25.71	0.02	0.00	0.05	0.06	0.00	0.00	0.00	100.75
CC207-1-1	52.41	2.79	2.75	15.74	25.61	0.04	0.00	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	99.39
CC207-2-1	52.28	1.65	13.36	12.45	15.48	0.32	0.10	0.94	0.02	0.02	0.00	0.02	96.63
CC209-1-1	55.07	0.33	3.56	16.28	24.72	0.50	0.01	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	100.53
CC209-2-2	54.77	0.27	6.75	14.41	24.80	0.42	0.01	0.12	0.00	0.00	0.01	0.00	101.55
CC214-1-2	53.80	0.41	4.27	15.62	24.88	0.29	0.00	0.08	0.07	0.00	0.02	0.00	99.44

以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准计算

样品号	Si	$Al^{Ⅳ}$	$Al^{Ⅵ}$	Ti	Cr	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Mn	Mg	Ca	Na	Di	Hd	Jo
CC166-3-2	2.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.92	0.97	0.01	0.95	0.05	0.00
CC193-0-7	1.89	0.11	0.06	0.01	0.00	0.11	0.14	0.00	0.71	0.96	0.04	0.74	0.26	0.00
CC201-1-1	1.93	0.07	0.05	0.00	0.00	0.03	0.06	0.00	0.87	1.00	0.00	0.91	0.09	0.00
CC201-1-3	1.87	0.13	0.07	0.00	0.00	0.09	0.04	0.00	0.81	1.01	0.00	0.86	0.14	0.00
CC207-1-1	1.93	0.07	0.05	0.00	0.00	0.04	0.05	0.00	0.86	1.01	0.00	0.91	0.09	0.00
CC207-2-1	2.02	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.44	0.03	0.72	0.64	0.02	0.61	0.37	0.03
CC209-1-1	2.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.08	0.00	0.88	0.96	0.04	0.89	0.11	0.00
CC209-2-2	2.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.18	0.00	0.78	0.97	0.03	0.79	0.21	0.00
CC214-1-2	1.99	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.10	0.00	0.86	0.99	0.02	0.87	0.13	0.00

注:0.00 为低于检测限;分析精度为 0.0n %;FeO 为 Fe^T;分析者:陈小丹,王枫

石分布较少,仅见于矽卡岩和角岩中呈脉状产出(图 3d),多呈半自形-他形、中-细粒结构。可见脉状次透辉石切穿早期矽卡岩阶段透辉石的现象(图 3f),而这种脉状次透辉石在柿竹园 W-Sn-Mo-Bi 矿床也有报道(毛景文等,1996)。电子探针分析结果表明(表 3;图 5b),程潮铁矿辉石的透辉石端员组分变化范围在 60.5 ~ 95.0;钙铁辉石为 4.7 ~ 36.9 之间;锰钙辉石变化范围为 0.01 ~ 2.6,属于典型的透辉石-钙铁榴石固溶体系列($Di_{61\sim95}Hd_{5\sim37}Jo_{0.01\sim3}$),透辉石端员组分含量

表 4 程潮铁矿床代表性角闪石电子探针分析结果(wt%)

Table 4 Representative results of electron microprobe analysis of amphiboles from the Chengchao Fe deposit (wt%)

样品号	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	Total
CC117-0-4	53.77	3.13	8.01	17.82	12.59	0.65	0.19	0.05	0.06	96.33
CC143-0-4	40.72	11.46	20.08	8.40	11.91	1.91	1.49	0.24	0.39	96.74
CC143-1-3	40.44	11.41	20.45	8.69	11.87	1.72	1.72	0.13	0.71	97.19
CC153-0-1	39.21	16.75	7.00	15.50	12.81	2.59	1.27	0.03	0.26	95.51
CC154-1-2	39.46	16.18	9.36	15.02	12.78	2.41	1.77	0.00	0.17	97.18
CC167-0-3	51.93	8.10	4.68	10.14	18.96	0.32	3.55	0.01	0.27	97.95
CC167-1-4	52.04	2.10	15.33	13.32	11.88	0.46	0.18	0.30	0.05	95.85
CC210-3-2	39.91	15.36	8.83	15.46	12.57	2.59	1.53	0.05	0.06	96.41

以 23 个氧为基准计算的阳离子数

样品号	Si	Al^{IV}	Al^{VI}	Ti	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Mn	Mg	Ca	Na	K	阳离子总量	种属
CC117-0-4	7.70	0.30	0.22	0.01	0.86	0.10	0.01	3.80	1.93	0.18	0.04	15.14	透闪石
CC143-0-4	6.36	1.64	0.46	0.05	0.02	2.60	0.03	1.96	1.99	0.58	0.30	15.98	铁韭闪石
CC143-1-3	6.29	1.71	0.39	0.08	0.00	2.66	0.02	2.02	1.98	0.52	0.34	16.01	铁韭闪石
CC153-0-1	5.84	2.16	0.78	0.03	0.00	0.87	0.00	3.44	2.04	0.75	0.24	16.16	韭闪石
CC154-1-2	5.85	2.15	0.68	0.02	0.00	1.16	0.00	3.32	2.03	0.69	0.33	16.23	韭闪石
CC167-0-3	7.44	0.56	0.81	0.03	0.56	0.00	0.00	2.17	2.91	0.09	0.65	15.21	浅闪石
CC167-1-4	7.77	0.23	0.14	0.01	0.87	1.04	0.04	2.96	1.90	0.13	0.03	15.13	阳起石
CC210-3-2	5.94	2.06	0.64	0.01	0.00	1.10	0.01	3.43	2.01	0.75	0.29	16.22	韭闪石

注:0.00 表示低于检测限;分析精度为 0.0n %,FeO 为 Fe^T;分析者:陈小丹,王枫

表 5 程潮铁矿床代表性金云母电子探针分析结果

Table 5 Representative results of electron microprobe analysis of phlogopites from the Chengchao Fe deposit

样品号	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	Total
CC207-2-2	38.53	16.55	7.73	21.23	0.10	0.11	10.71	0.10	0.25	95.41
CC208-0-1	37.50	16.78	5.85	21.42	0.00	0.16	10.60	0.06	0.18	92.62
CC210-0-2	35.37	19.22	6.55	21.33	0.05	0.11	9.34	0.00	0.17	92.65
CC210-1-2	37.64	18.47	5.23	22.07	0.00	0.19	10.75	0.07	0.16	94.81
CC210-2-1	37.38	18.72	3.56	22.93	0.00	0.26	10.82	0.02	0.07	93.77

基于 22 个氧原子计算

样品号	Si	Al^{IV}	Al^{VI}	Ti	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Mn	Mg	Ca	Na	K	Total	OH^-
CC207-2-2	2.79	1.21	0.20	0.01	0.01	0.46	0.01	2.29	0.01	0.02	0.99	7.99	2.00
CC208-0-1	2.77	1.23	0.24	0.01	0.00	0.36	0.00	2.36	0.00	0.02	1.00	8.00	2.00
CC210-0-2	2.62	1.38	0.30	0.01	0.02	0.38	0.00	2.36	0.00	0.02	0.88	7.98	2.00
CC210-1-2	2.71	1.29	0.28	0.01	0.00	0.32	0.00	2.37	0.00	0.03	0.99	8.00	2.00
CC210-2-1	2.70	1.30	0.29	0.00	0.00	0.22	0.00	2.47	0.00	0.04	1.00	8.02	2.00

注:0.00 表示低于检测限;分析精度为 0.0n %,FeO 为 Fe^T;分析者:陈小丹,王枫

略高于国内与钙矽卡岩有关的矽卡岩型铁矿的透辉石含量范围($Di_{50\sim90}$)(赵斌和 Barton,1987)和世界上其他矽卡岩型铁矿辉石的透辉石含量范围($Di_{20\sim80}$)(Einaudi *et al.*, 1981; Meinert, 1989, 1992),结合电子探针数据可将程潮铁矿辉石表示成:

$$Na_{(0\sim0.04)}Ca_{(0.64\sim1.03)}Mg_{(0.71\sim0.92)}Fe^{2+}_{(0.02\sim0.44)}Fe^{3+}_{(0\sim0.11)}$$
$$Al_{(0.01\sim0.23)}Si_{(1.86\sim2.02)}O_6$$

早期矽卡岩阶段的辉石主要是透辉石,其端员组分变化范围在 73.7~95.0;其中与磁铁矿共生的辉石透辉石组分变化范围为 81.5~92.7,相比于与石榴石共生的辉石透辉石含量(78.9~89.0)更趋近于透辉石端员,这种现象在土耳其 Ayazman 铁铜矽卡岩矿床和罗马尼亚 Ocna de Fier-Dognecea 铁铜矽卡岩矿床也有报道(Ciobanu and Cook, 2004; Oyman, 2010);自形-半自形辉石的透辉石组分为 78.9~91.0,略低于他形辉石的透辉石含量(73.7~95.0)。晚期脉状矽卡岩阶段的辉石主要为透辉石和次透辉石,其透辉石端员组分变化范围在 60.5~83.8。此外,由接触带向外,辉石的透辉石含量有上升的趋势,但总体变化不大(图 6)。

4.3 角闪石

角闪石呈墨绿-黑色,自形-半自形、中-粗粒至伟晶结构,多呈长柱状,粒度一般在 0.08~1.4mm 之间,可见明显的两组解理。程潮铁矿角闪石主要是钙角闪石,多与磁铁矿共生,其产出位置靠近花岗岩岩体,为交代早期矽卡岩矿物的

产物。通过电子探针分析结果(表 4)并根据 Leake *et al.* (1997)的分类可知,本区角闪石主要为韭闪石、铁韭闪石、透闪石、阳起石和浅闪石(图 5c, d)。其中韭闪石在退化蚀变岩中分布广泛,且多与磁铁矿共生。在湖北铜绿山铜铁矿、江西二峰山铁矿以及国外的俄罗斯 Tardanskoe 铜矿也有韭闪石的报道(赵一鸣和李大新,2003;赵海杰,2010;Gaskov *et al.*, 2010),而区内的大冶铁铜矿、张福山铁矿和国外的土耳其 Ayvalik 铁铜矿、Hierro Indio 铁矿等矿床的角闪石却多以透闪石—阳起石为主(舒全安等,1992;赵一鸣和李大新,2003;Franchini *et al.*, 2007;Oyman., 2010)。

4.4 金云母和蛇纹石

金云母多呈深绿、黑褐色,薄片中无色至浅褐色,平行消光。绝大多数金云母与磁铁矿共生(图 4c),时间上与磁铁矿近于同时形成。Xie *et al.* (2011a)测得程潮铁矿金云母 Ar^{39}-Ar^{40} 同位素坪年龄为 131.6 ± 1.2Ma,代表了程潮铁矿的成矿时代。电子探针结果见表 5。其中与磁铁矿共生的金云母,其镁值 Mg/(Mg + Fe + Mn + Ti)介于 0.850 ~ 0.940 之间,平均为 0.90;其与铜绿山铜铁矿的金云母(赵海杰,2010)相比,镁值相对较低;在化学成分上,与中国其他矽卡岩型矿床,例如:大冶铁山、铜绿山及福建马坑等的金云母相比(赵一鸣等,1990),Al_2O_3 含量略高,FeO^T 含量基本相同。

蛇纹石分布较少,常为半自形-他形结构,多与金云母、磁铁矿等共生,其 SiO_2 含量范围是 42.12% ~ 43.14%,MgO 为 31.26% ~ 38.57%,FeO^T 为 3.32% ~ 4.71%(图 4f)。

5 讨论

5.1 矽卡岩成因及与成矿的关系

一般认为,矽卡岩矿床的形成大多经历了一个复杂的过程。矽卡岩矿物的组成与岩浆化学成分、围岩组分、形成深度和氧化条件有着密切的关系(Burton *et al.*, 1982;Meinert, 1997)。因此,通过对矽卡岩矿物的化学成分、结构构造、共生组合以及交代关系的研究,可以作为揭示矽卡岩形成过程中物理化学条件(氧逸度、酸碱度等)变化的重要依据。

5.1.1 矽卡岩阶段

在岩浆侵位的最后阶段,结晶作用使流体中开始出现高温气液(Candela and Piccoli, 1995;Jamtveit *et al.*, 1993)并在岩体及其内接触带开始了广泛的碱质交代作用,其中闪长岩中主要发生钠质交代作用,花岗岩中主要为钾质交代作用。研究表明,这个时期的流体具超临界性,但水解作用微弱。因此,早期矽卡岩阶段的流体在与灰岩等围岩发生交代作用的过程中往往形成石榴石、透辉石以及硅灰石等矽卡岩矿物。程潮铁矿的透辉石与钙铁榴石共生(图 3a)的现象表明,早期矽卡岩阶段流体呈低酸度和高氧逸度的特点(梁祥济,1994;赵一鸣等,1997;Oyman, 2010)。

晚期脉状矽卡岩阶段的矽卡岩矿物主要呈脉状分布且可见切穿早期矽卡岩阶段矿物的现象(图 3c-f),而这些脉状矽卡岩矿物相对于早期矽卡岩矿物表现出更贫 Fe、Mg 的特点。研究表明,偏向钙铁榴石端员的石榴石相比于中间成分的石榴石形成于更加氧化的条件下(赵斌等,1982)。程潮铁矿脉状石榴石端员组分介于钙铁榴石和钙铝榴石之间(图 5a),表明其生成环境的氧逸度低于早期矽卡岩阶段的石榴石,从而说明晚期脉状矽卡岩阶段流体的氧逸度低于早期矽卡岩阶段流体的氧逸度。

5.1.2 退化蚀变阶段

随着流体温度进一步降低,水解作用逐渐增强,溶液中开始富集大量的 H_2S、CO_2 和 F 等挥发分。大量的矽卡岩矿物(石榴石、透辉石等)开始被一系列退化蚀变矿物(角闪石、金云母、绿帘石、绿泥石等)和氧化物(磁铁矿)等交代(图 4d, e, j, k)。矿区绿帘石发育广泛,可见绿帘石交代石榴石和与赤铁矿共生的现象(图 4c, d),而溶液中氧逸度的升高对绿帘石的形成具有重要的作用(Berman *et al.*, 1985;Perkins *et al.*, 1986)。由此可以看出,退化蚀变阶段的流体具有较高的氧逸度。

退化蚀变阶段是主要的成矿阶段。大量的研究表明,Fe 主要以络合物的形式被运移。本阶段所形成的矿石类型主要有磁铁矿矿石、石榴石透辉石磁铁矿矿石、角闪石磁铁矿矿石、金云母磁铁矿矿石和硬石膏磁铁矿矿石等(图 2a-e)。通过对各类型矿石的矿物组成、结构构造特征以及矽卡岩矿物的观察可知,磁铁矿的形成可能主要有以下两种途径:(1)通过交代矽卡岩阶段矿物以及围岩中的硬石膏等形成磁铁矿,如石榴石透辉石磁铁矿矿石、硬石膏磁铁矿矿石等;(2)由于溶液物理化学条件的变化使铁的络合物发生沉积作用而形成磁铁矿。随着温度的降低,角闪石、金云母、绿帘石、绿泥石和蛇纹石等含 OH^- 的退化蚀变矿物大量形成,使溶液中的 H^+ 被大量消耗,从而导致溶液逐渐趋于碱性。就是在这种高氧逸度碱性的条件下,溶液中 Fe 的氯化物络合物发生水解,使磁铁矿大量沉积(艾永富和金玲年,1981;赵一鸣等,1992),从而形成磁铁矿矿石、角闪石磁铁矿矿石和金云母磁铁矿矿石等。

5.2 岩体与成矿的关系探讨

程潮铁矿的矿体主要产于花岗岩和大理岩或花岗岩与闪长岩的接触带。岩体的侵入不仅为成岩成矿带来了大量的热量和流体,同时还影响着环境的氧化还原条件。因此,环境的物理化学条件随着距离岩体远近的变化而变化,而在矽卡岩矿床中则表现在矽卡岩矿物成分的变化上。研究表明,石榴石和辉石中的钙铁榴石和透辉石端员组分含量代表了矽卡岩形成过程中的氧化还原条件。由钻孔 YK1911(图 1b)观察发现:由围岩至花岗岩岩体,石榴石钙铁榴石端员组分含量逐渐升高,钙铝榴石端员组分则逐渐降低;辉石主要为透辉石,端员组分含量变化不大(图 6)。这些都说明在矽卡岩形成过程中,距离花岗岩岩体越近,环境的氧逸度就相

对越高。研究表明,同熔型或磁铁矿型花岗岩形成于高氧逸度的环境(Ishihara, 1977)。程潮铁矿与成矿有关的花岗岩属同熔型花岗岩(常印佛等,1991),因此可以判定其形成于氧逸度较高的条件下。这恰恰表明矽卡岩的形成与花岗岩有着密切的关系,而这种高氧逸度的环境正是磁铁矿形成的最有利条件之一。此外,矿区广泛发育有大量的金云母磁铁矿,说明 Fe 的络合物中含有丰富的 K 和 F(赵一鸣等,1983),而这可能与花岗岩发生了广泛的钾质交代作用有关。总之,花岗岩与矽卡岩和矿体的形成在时间、空间和成因上都有着密切的联系。

此外,矿区闪长岩类岩石主要呈岩墙状产出并广泛发育钠化蚀变,部分矿体即产于花岗岩和闪长岩的接触带。电子探针结果显示,矿石中磁铁矿的 TiO_2(0~0.1%)和 MnO(0~0.12%)含量较低,这与国内外的一些与辉长岩和闪长岩有关的矽卡岩型矿床中的磁铁矿成分特征相一致(MnO < 0.3%)(Xu and Zhang, 1998;Sangster, 1969;Zürcher *et al.*, 2001;Schwartz and Melchor, 2004),但不具备与花岗岩有关的矽卡岩中磁铁矿的成分特征(MnO:0.38%~0.93%)(Xu and Zhang, 1998)。夏金龙等(2009)通过对闪长岩类岩石与磁铁矿矿石的稀土元素特征研究,认为程潮铁矿的成矿物质主要来源于闪长岩。但笔者认为,只通过稀土元素化学特征和探针数据不足以证明成矿物质来源。因此,对于程潮铁矿成矿物质来源问题仍需进一步研究。

6 结论

(1)程潮铁矿的矿化蚀变阶段可划分为矽卡岩阶段、退化蚀变阶段和硫化物-碳酸盐阶段,其中矽卡岩阶段可分为早期矽卡岩阶段和晚期脉状矽卡岩阶段,退化蚀变阶段是主要的成矿阶段。根据各阶段矿物组合和交代关系判断,矽卡岩阶段和退化蚀变阶段的流体具较高氧逸度和低酸度的特点,而这种高氧逸度低酸度的环境正是磁铁矿形成的最有利条件之一。

(2)电子探针分析结果表明:程潮铁矿石榴石主要为钙铁榴石,辉石主要为透辉石,角闪石主要是韭闪石,其次为铁韭闪石、透闪石、阳起石。其中,早期矽卡岩阶段的石榴石和辉石分别以钙铁榴石和透辉石为主;晚期脉状矽卡岩阶段的石榴石端员组分介于钙铁榴石和钙铝榴石之间;辉石相对于早期矽卡岩阶段的辉石更趋近于钙铁辉石端员。

(3)通过对程潮铁矿矽卡岩矿物特征研究表明,花岗岩与矽卡岩和矿体在时间、空间和成因上具有密切的联系。

致谢 野外地质工作期间得到了武汉钢铁集团矿业有限公司程潮铁矿地测科张建军科长,地质组邹健、刘茂,中国地质大学于森硕士和王建硕士等同志的大力支持和帮助;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陈小丹硕士、王枫硕士在论文实验过程中给予了热情的指导和帮助;审稿专家给论文提出了许多建设性的意见;在此一并致以谢忱!

References

Ai YF and Jin LL. 1981. The study of the relationship between the mineralization and the garnet in the skarn ore deposits. Acta Scicentiarum Naturalum Universitis Pekinesis, (1): 83 – 90 (in Chinese with English abstract)

Berman RG, Brown TH and Greenwood HJ. 1985. An internally consistent thermodynamic data base for minerals in the system Na_2O-K_2O-CaO-MgO-FeO-SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3-TiO_2-H_2O-CO_2. Atomic Energy of Canada Technical Report, TR-337: 62

Burton JC, Taylor LA and Chou IM. 1982. The f_{O_2}-T and f_{S_2}-T stability relations of hedenbergite and of hedenbergite-johannsenite solid solutions. Economic Geology, 77: 764 – 783

Cai BJ. 1981. The conditions for the formation of iron ore deposits of Daye Type: Significance of evaporite beds for the formation of iron ore deposits. Bulletin of the Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, (1): 110 – 117 (in Chinese with English abstract)

Cao GQ. 1977. The relation of iron-copper deposits and gypsolyte in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River and North China area. Geology and Prospecting, (1): 26 – 33 (in Chinese with English abstract)

Candela PA and Piccoli PL. 1995. Model ore-metal partitioning from melt into vapor and vapor/brine mixtures. In: Thompson JFH (ed.). Magmas, Fluids and Ore Deposits. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook, 23: 101 – 127

Chang YF, Liu XP and Wu CY. 1991. The Copper-iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 90 (in Chinese with English abstract)

Chen HX. 1993. Relationship of the Triassic evaporate beds with the mineralization of iron ores in Chengchao, southeastern Hubei Province. Bulletin of Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, 15: 163 – 176 (in Chinese with English abstract)

Ciobanu CL and Cook NJ. 2004. Skarn textures and a case study: the Ocna de Fier-Dognecea orefield, Banat, Romania. Ore Geology Reviews, 24: 315 – 369

Deng JF, Ye DL, Zhao HL and Tang DP. 1992. Volcanism, Deep Internal Processes and Basin Formation in the Lower Reaches of Yangtze River. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 – 184 (in Chinese with English abstract)

Einaudi MT, Meinert LD and Newberry RJ. 1981. Skarn deposits. Economic Geology, 75th Anniversary Volume, 317 – 391

Einaudi MT and Burt DM. 1982. Introduction-terminology, classification and composition of skarn deposit. Economic Geology, 77: 745 – 754

Franchini MB, Barrio de RE, Pons MJ, Schalamuk IB, Rios FJ and Meinert L. 2007. Fe skarn, iron oxide Cu-Au, and manto Cu-(Ag) deposits in the Andes Cordillera of Southwest Mendoza Province (34°~36° S), Argentina. Exploration and Mining Geology, 16: 234 – 264

Gaskov IV, Borisenko AS, Babich VV and Naumov EA. 2010. The stages and duration of formation of gold mineralization at copper-skarn deposits (Altai-Sayan folded area). Russian Geology and Geophysics, 51: 1091 – 1101

Ge C, Sun H and Zhou TF. 1990. Copper deposits of China. In: Liu N (ed.). Mineral Deposits of China, Vol. 1. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 106

Ishihara S. 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks.

Mining Geology, (27): 293 – 305
Jamtveit B, Wogelius RA and Fraser DG. 1993. Zonation patterns of skarn garnets: Records of hydrothermal system evolution. Geology, 21: 113 – 116
Leake BE, Woolley AR, Arps CES *et al*. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Mineral and Mineral Names. American Mineralogist, 82: 1019 – 1037
Li JQ, Tan QM and Li JZ. 2005. Minerogenetic Series of Hubei. Wuhan: Science and Technology Press of Hubei (in Chinese with English abstract)
Liang XJ. 1994. Garnets of grossular-andradite Series: their characteristics and metasomatic mechanism. Acta Petrologica Et Mineralogica, 13(4): 342 – 352 (in Chinese with English abstract)
Luo DW. 2008. Study on contact zone tectonic and deep exploration in Chengchao iron deposits, Hubei Province. Master Degree Thesis. Wuhan: China University of Geosciences, 1 – 59 (in Chinese with English summary)
Mao JW, Li HY, Hidehiko S, Louis R and Bernard G. 1996. Geology and metallogeny of the Shizhuyuan skarn-greisen deposit, Hunan Province, China. International Geology Review, 39: 1020 – 1039
Mao JW, Li HY, Louis R and Bernard G. 1996. Geology and metallogeny of the Shizhuyuan skarn-greisen W-Sn-Mo-Bi deposit, Hunan Province. Mineral Deposits, 15(1): 1 – 14 (in Chinese with English abstract)
Mao JW, Wang YT, Lehmann B, Yu JJ, Du AD, Mei YX, Li YF, Zang WS, Stein HJ and Zhou TF. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Changjiang valley and metallogenic implications. Ore Geology Reviews, 29: 307 – 324
Mao JW, Xie GQ, Guo CL, Yuan SD, Cheng YB and Chen YC. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings. Geological Journal China Universities, 14(4): 510 – 526 (in Chinese with English abstract)
Mao JW, Franco P and Nigel C. 2011a. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings: An introduction to the special issue. Ore Geology Reviews, 43(1): 1 – 7. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.003
Mao JW, Xie GQ, Duan C, Franco P, Dazio I and Chen YC. 2011b. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, Eastern China. Ore Geology Reviews, 43(1): 294 – 314
Meinert LD. 1989. Gold skarn deposits: Geology and exploration criteria. In: Keays R, Ramsay R and Groves D (eds.). The Geology of Gold Deposits. Economic Geology, 6: 537 – 552
Meinert LD. 1992. Skarns and skarn deposits. Geoscience Canada, 19(4): 145 – 162.
Meinert LD. 1993. Igneous petrogenesis and skarn deposits. Special Paper-Geological Association of Canada, 40: 569 – 583
Meinert LD. 1997. Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration. Exploration and Mining Geology, 6: 185 – 208
Min HL, Xu BJ, Ji A, Yang Z, Wang L and Xia JL. 2008. Factor analysis of trace elements of Chengchao iron ore. Metal Mine, (9): 93 – 96 (in Chinese with English abstract)
Misra KC. 2000. Understanding Mineral Deposits. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 414 – 449
Oyman T. 2010. Geochemistry, mineralogy and genesis of the Ayazmant Fe-Cu skarn deposit in Ayvalik, (Balikesir), Turkey. Ore Geology Reviews, 37: 175 – 200
Pei RF. 1995. Chinese Deposit Modeling. Beijing Geological Publishing House, 1 – 357 (in Chinese with English abstract)
Pei RF and Hong DW. 1995. The granites of South China and their metallogeny. Episodes, 18: 77 – 86
Perkins EH, Brown TH and Berman RG. 1986. *PTX*-SYSTEM: Three programs for calculation of pressure-temperature-composition phase diagrams. Computers and Geoscience, 12: 749 – 755
Sangster DF. 1969. The contact metasomatic magnetite deposits of south-western British Columbia. Geological Survey of Canada, Bulletin, 172: 85
Schwartz MO and Melchor F. 2004. The Falémé iron district, Senegal. Economic Geology, 99: 917 – 939
Shu QA, Chen PL and Cheng JR. 1992. Geology of Iron-Copper Deposits in Eastern Hubei Province, China. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1 – 532 (in Chinese with English abstract)
Tang YC, Wu YC, Chu GZ, Yin FM, Wang YM, Cao FY and Chang YF. 1998. Geology of Copper-gold Polymetallic Deposits in the along Changjiang Area of Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 60 – 85 (in Chinese with English abstract)
Wang L, Hu MA, Zhang WS, Ji A, Min HL, Yang Z and Xia JL. 2009. Structural ore-controlling characteristic and prospecting direction in Chengchao iron deposit in Southeast Hubei. Metal Mine, (4): 74 – 77 (in Chinese with English abstract)
Wang Y, Li LT and Su SM. 2007. Geological features and mineralization forecast of iron deposits in the eastern Hubei. Geology and Prospecting, 43(1): 17 – 25 (in Chinese with English abstract)
Xia JL, Hu MA, Xu BJ, Zhang WS, Yang Z and Wang L. 2009. Geochemistry constraint on the ore-forming Materials of the Chengchao iron deposit, Hubei Province. Geoscience, 23(2): 285 – 291 (in Chinese with English abstract)
Xie GQ, Mao JW, Li RL, Zhang ZS, Zhao WC, Qu WJ, Zhao CS and Wei SK. 2006a. Metallogenic epoch and geodynamic framework of Cu-Au-Mo-(W) deposits in southeastern Hubei Province: Constraints from Re-Os molybdenite ages. Mineral Deposits, 25(1): 43 – 50 (in Chinese with English abstract)
Xie GQ, Mao JW, Li RL and Zhao CS. 2006b. Geological characteristics and mineral model of skarn Fe deposits from southeastern Hubei Province, China. Mineral Deposits, 25(Suppl.): 147 – 150 (in Chinese with English abstract)
Xie GQ, Mao JW, Li RL, Zhou SD, Ye HS, Yan QR and Zhang ZS. 2006c. SHRIMP zircon U-Pb dating for volcanic rocks of the Dasi Formation in southeast Hubei Province, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River and its implications. Chinese Science Bulletin, 51(19): 2283 – 2291 (in Chinese)
Xie GQ, Mao JW, Li RL and Bierlein FP. 2008. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting. Lithos, 104: 216 – 230
Xie GQ, Li RL, Jiang GH, Zhao CS and Hou KJ. 2008. Geochemistry and petrogenesis of Late Mesozoic granitoids in southeastern Hubei Province and constrains on the timing of lithospheric thinning, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, eastern China. Acta Petrologica Sinica, 24(8): 1703 – 1714 (in Chinese with English abstract)
Xie GQ, Mao JW, Zhao HJ, Duan C and Yao L. 2011a. Zircon U-Pb and phlogopite ^{40}Ar-^{39}Ar age of the Chengchao and Jinshandian skarn Fe deposits, southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, China. Mineralium Deposita, 10.1007/s00126 – 011 – 0367 – 2
Xie GQ, Mao JW and Zhao HJ. 2011b. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Late Mesozoic intrusions in the southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt (MLYRB), East China. Lithos, 125: 693 – 710
Xu JH and Zhang XF. 1998. Mineralogic, isotopic, and fluid inclusion study of the Qinglongshan iron skarn deposit at the south margin of the Binjiang granite, south Anhui, China. Nith Quadrennial IAGOD Symposium. Beijing, 1994; Stuttgart, Schweizerbartsche Verlagshandlung, Proceedings, 427 – 439
Yao PH, Wang KN, Du CL, Lin ZT and Song X. 1993. Records of

Chinese Iron Ore Deposits. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1 – 662 (in Chinese with English abstract)
Yu BD. 2008. The relationship of the Early Triassic strata and Cu, Fe, Au, polymetallic mineralization in southeastern Hubei Province. West-China Exploration Engineering, (1): 91 – 94 (in Chinese with English abstract)
Zhai YS, Shi ZL, Lin XD, Xiong PF, Wang DY, Yao SZ and Jin ZM. 1982. Genesis of "Daye Type" iron ore deposits in eastern Hubei, China. Earth Science-Journal of Wuhan College of Geology, (18): 239 – 251 (in Chinese with English abstract)
Zhai YS, Yao SZ, Lin XD, Zhou XN, Wan TF, Jin FQ and Zhou YG. 1992a. Fe-Cu (Au) Metallogeny of the Middle-Lower Changjiang Region. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 120 (in Chinese with English abstract)
Zhai YS, Yao SZ, Lin XD, Jin FQ, Zhou XR, Wan TF and Zhou ZG. 1992b. Metallogenic regularity of iron and copper deposits in the Middle and Lower Valley of the Yangtze River. Mineral Deposits, 11 (1): 1 – 10 (in Chinese)
Zhao B, Li TJ, Li ZP and Wu HO. 1982. A study on garnet from some skarn deposits in China. Acta Mineralogica Sinica, (4): 296 – 304 (in Chinese with English abstract)
Zhao B and Barton MD. 1987. Compositional characteristics of garnets and pyroxenes in contact-metasomatic skarn deposits and their relationship to metallization. Acta Mineralogica Sinica, 7(1): 1 – 8 (in Chinese with English abstract)
Zhao HJ. 2010. The mineralization mechanism and geochemistry of the Tonglushan skarn Cu-Fe deposit, southeastern Hubei, China. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 66 – 85 (in Chinese with English summary)
Zhao YM, Bi CS and Li DX. 1983. The characteristics of volatile components and alkaline metasomatism in main skarn-type iron deposit formation. Geological Review, 29(1): 66 – 74 (in Chinese with English abstract)
Zhao YM, Lin WW, Bi CS *et al*. 1990. Skarn Deposit of China. Beijing: Geological Publishing House, 164 – 171 (in Chinese with English abstract)
Zhao YM. 1991. Skarn deposits in the Circum Pacific belt. Mineral Deposits, 10(1): 41 – 51 (in Chinese)
Zhao YM, Lin WW, Zhang DQ, Li DX, Zhao GH and Chen RY. 1992. Metasomatic Mineralization: Study of Some Ore-bearing Metasomatic Formations. Beijing: Beijing Science & Technology Press, 1 – 47 (in Chinese with English abstract)
Zhao YM, Zhang YN and Lin WW. 1997. Characteristics of pyroxenes and pyroxenoids in skarn deposits of China and the relationship with metallization. Mineral Deposits, (4): 318 – 329 (in Chinese with English abstract)
Zhao YM and Li DX. 2003. Amphiboles in skarn deposits of China. Mineral Deposits, (4): 345 – 359 (in Chinese with English abstract)
Zhou TF, Fan Y and Yuan F. 2008. Advances on petrogensis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area. Acta Petrologica Sinica, 24(8): 1665 – 1678 (in Chinese with English abstract)
Zürcher L, Ruiz J and Barton MD. 2001. Paragenesis, elemental distribution, and stable isotopes at the Peña Colorada iron skarn, Colima, Mexico. Economic Geology, 96: 535 – 557

附中文参考文献

艾永富, 金玲年. 1981. 石榴石成分与矿化关系的初步研究. 北京大学学报(自然科学版),1: 83 – 90
蔡本俊. 1981. 鄂东大冶式铁矿床形成条件——蒸发岩对铁矿床形成的意义. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 第1号: 111 – 117
草广金. 1977. 长江中下游及华北地区内生铁铜矿床与膏盐的关系. 地质与勘探, (1): 26 – 33
常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1 – 90
陈洪新. 1993. 鄂东南程潮铁矿区矿化与三叠系蒸发岩的关系. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 15: 163 – 176
邓晋福, 叶德隆, 赵海岭, 汤德平. 1992. 下扬子地区火山作用深部过程盆地形成. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 – 184
李均权, 谭秋明, 李江洲. 2005. 湖北省矿床成矿系列. 武汉:湖北科学技术出版社
梁祥济. 1994. 钙铝-钙铁系列石榴石的特征及其交代机理. 岩石矿物学杂志, 13(4): 342 – 352
骆地伟. 2008. 程潮铁矿接触带构造研究与深部找矿. 硕士学位论文. 武汉:中国地质大学, 1 – 59
毛景文, 李红艳, Guy B, Raimbault L. 1996. 湖南柿竹园矽卡岩-云英岩型 W-Sn-Mo-Bi 矿床地质和成矿作用. 矿床地质, 15(1): 1 – 14
毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510 – 526
闵厚禄, 徐伯骏, 季翱, 杨振, 王磊, 夏金龙. 2008. 程潮铁矿矿石微量元素因子分析. 金属矿山, (9): 93 – 96
裴荣富. 1995. 中国矿床模式. 北京: 地质出版社, 1 – 357
舒全安, 陈培良, 程建荣等. 1992. 鄂东铁铜矿产地质. 北京: 冶金工业出版社, 1 – 532
唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 60 – 85
王磊, 胡明安, 张旺生, 季翱, 闵厚禄, 杨振, 夏金龙. 2009. 鄂东南程潮铁矿构造控矿特征及找矿方向. 金属矿山, (4): 74 – 77
王瑜,李朗田,苏绍明. 2007. 鄂东铁矿成矿地质特征与找矿预测. 地质与勘探, 43(1): 17 – 25
夏金龙, 胡明安, 徐伯骏, 张旺生, 杨振, 王磊. 2009. 湖北程潮铁矿成矿物质来源的地球化学制约. 现代地质, 23(2): 285 – 291
谢桂青,毛景文,李瑞玲,张祖送,赵维超,屈文俊,赵财胜,魏世昆. 2006a. 鄂东南地区 Cu-Au-Mo-(W)矿床的成矿时代及其成矿地球动力学背景探讨:辉钼矿 Re-Os 同位素年龄. 矿床地质, 25(1): 43 – 50
谢桂青,毛景文,李瑞玲,赵财胜. 2006b. 鄂东南地区矽卡岩铁矿床的地质特征和矿床模式讨论. 矿床地质, 25(增刊): 147 – 150
谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 周少东, 叶会寿, 闫全人, 张祖送. 2006c. 长江中下游鄂东南地区大寺组火山岩 SHRIMP 定年及其意义. 科学通报, 51(19): 2283 – 2291
谢桂青,李瑞玲,蒋国豪,赵财胜,侯可军. 2008. 鄂东南地区晚中生代侵入岩的地球化学和成因及对岩石圈减薄时限的制约. 岩石学报, 24(8): 1703 – 1712
姚培慧, 王可南, 杜春林, 林镇泰, 宋雄. 1993. 中国铁矿志. 北京: 冶金工业出版社, 1 – 662
余宝岛. 2008. 鄂东南早三叠世地层与铜铁金等多金属成矿关系. 西部探矿工程, (1): 91 – 94

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. 地球科学-武汉地质学院学报, (18): 239 - 251

翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周永桂. 1992a. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社, 1 - 120

翟裕生, 姚书振, 林新多, 金福全, 周珣若, 万天丰, 周宗桂. 1992b. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究. 矿床地质, 11(1): 1 - 10

赵斌, 李统锦, 李昭平, 吴海鸥. 1982. 我国一些矿区矽卡岩中石榴石的研究. 矿物学报, (4): 296 - 304

赵斌, Barton MD. 1987. 接触交代夕卡岩型矿床中石榴子石和辉石成分特点及其与矿化的关系. 矿物学报, 7(1): 1 - 8

赵海杰. 2010. 湖北铜绿山夕卡岩型铜铁矿床地球化学及成矿机制. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 66 - 85

赵一鸣, 毕承思, 李大新. 1983. 中国主要矽卡岩铁矿床的挥发组份和碱质交代特征及其在成矿中的作用. 地质论评, 29(1): 66 - 74

赵一鸣, 林文蔚, 毕承思等. 1990. 中国矽卡岩矿床. 北京: 地质出版社, 164 - 171

赵一鸣. 1991. 环太平洋地区的矽卡岩矿床. 矿床地质, 10(1): 41 - 51

赵一鸣, 林文蔚, 张德全, 李大新, 赵国红, 陈仁义. 1992. 交代成矿作用及其找矿意义——几个重要含矿交代建造的研究. 北京: 北京科学技术出版社, 1 - 47

赵一鸣, 张轶男, 林文蔚. 1997. 我国夕卡岩矿床中的辉石和似辉石特征及其与金属矿化的关系. 矿床地质, (4): 318 - 329

赵一鸣, 李大新. 2003. 中国夕卡岩矿床中的角闪石. 矿床地质, (4): 345 - 359

周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(8): 1665 - 1678