

# 新疆西天山查岗诺尔铁矿床矿物学特征及其地质意义

洪 为<sup>1</sup>, 张作衡<sup>1</sup>, 赵 军<sup>2</sup>, 王志华<sup>3</sup>, 李凤鸣<sup>3,4</sup>, 石福品<sup>5</sup>, 刘兴忠<sup>5</sup>

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 5. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队, 新疆 库尔勒 841000)

**摘要:** 查岗诺尔大型磁铁矿床位于西天山阿吾拉勒东段, 矿体赋存于下石炭统大哈拉军山组安山质火山碎屑岩或凝灰岩中, 主要呈层状、似层状、透镜状, 受 NW、NWW、NE 断裂及环形断裂构造控制。矿区发育石榴石、透辉石、方柱石、阳起石、钾长石、绿帘石、绿泥石、方解石等蚀变矿物, 矿石矿物主要为磁铁矿和赤铁矿, 伴生的金属矿物以黄铁矿和黄铜矿为主。电子探针分析结果表明, 石榴石和辉石分别为钙铁石榴石-钙铝石榴石系列和透辉石-钙铁辉石系列, 其化学组成可表示为  $\text{Adr}_{37.97-97.89}\text{Grs}_{0.19-57.21}(\text{Alm} + \text{Sps})_{0.84-4.38}$  和  $\text{Di}_{28.68-87.46}\text{Hd}_{10.46-70.13}\text{Jo}_{0.24-5.53}$ , 与典型的矽卡岩型铁矿中石榴石和辉石的端员组分相似。在磁铁矿和赤铁矿的  $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn} - \text{Ti} + \text{V}$  图解中, 多数样品落入矽卡岩型铁矿的区域, 在磁铁矿的  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$  图解中, 多数样品落入或趋近于沉积变质-接触交代磁铁矿区域。结合矿床地质特征和矿物学研究, 认为该矿床的形成与矽卡岩化紧密相关, 矽卡岩化对铁成矿有重要的贡献。

**关键词:** 西天山, 查岗诺尔, 铁矿床, 电子探针分析, 矽卡岩, 磁铁矿

中图分类号: P618.31; P588.31<sup>+2</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)02-0191-21

## Mineralogy of the Chagangnuoer iron deposit in Western Tianshan Mountains, Xinjiang, and its geological significance

HONG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Zuo-heng<sup>1</sup>, ZHAO Jun<sup>2</sup>, WANG Zhi-hua<sup>3</sup>, LI Feng-ming<sup>4</sup>, SHI Fu-pin<sup>5</sup>  
and LIU Xing-zhong<sup>5</sup>

(1. MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. College of Earth Science and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi 830000, China; 5. No. 3 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Korla 841000, China)

**Abstract:** Located in the eastern Awulale metallogenic belt of Western Tianshan Mountains, the large-size Chagangnuoer iron deposit is hosted in andesitic volcanoclastic rocks or andesitic tuff of the Lower Carboniferous Dahalajunshan Formation, with a lenticular marble beneath the main ore body. The ore bodies occur as lamellar, stratoids and lenses, controlled by NW-, NWW- and NEE- striking faults and circular faults. Mineralizations occur along the fissures and fractures in the wall rocks. This ore deposit is composed of two major ore bodies, i. e., FeI and FeII. The FeI ore body strikes NE-SW, about 2 900 m in length, 63 m in average thickness, with Fe average grade of 36.87% and ore reserves of more than 190 million tons. Wall rock alterations include

收稿日期: 2011-11-20; 修订日期: 2012-02-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB416803), 国家科技支撑计划(2011BAB06B02), 地质矿产调查评价项目(1212011085060)

作者简介: 洪 为(1986-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: hongwei\_86@hotmail.com.

chiefly garnetization, actinolitization, chloritization, epidotization etc. Ore minerals consist mainly of magnetite and subordinately pyrite and chalcopyrite while gangue minerals are composed of garnet, actinolite, chlorite, epidote, tremolite, and calcite. Electron microprobe analyses show that the end member of garnet is andradite (Adr) with an average content of 61.58%, grossularite (Grs) with an average content of 35.45%, and almandite (Alm) with an average content of 2.48%. The composition of pyroxene is dominated by diopside (Di, 54.22% on average) and hedenbergite (Hd, 44.22% on average), with a small amount of johannsenite (Jo, less than 5.53%). Components of garnet and pyroxene are  $Adr_{37.97-97.89}Grs_{0.19-57.21}(Alm + Sps)_{0.84-4.38}$ ,  $Di_{28.68-87.46}Hd_{10.46-70.13}Jo_{0.24-5.53}$ , which indicates that ① characteristics of these two skarn minerals are quite similar to those in calcic skarn from the major large iron deposits, suggesting that they probably resulted from skarnization; ② their wide and different compositions reveal that skarns were not formed under a wholly closed equilibrium condition. Epidote is rich in Al and Ca but poor in Fe and Mg, implying that Fe and Mg were separated from each other at the time when pyroxene was converted into epidote. The chemical compositions of magnetite are rich in Mg, Mn, Ca, Si but poor in Al, Ti, Ni, exhibiting a similar feature to those formed in calcic skarn iron deposits. In the Ca + Al + Mn versus Ti + V discriminant diagram showing spot analyses of magnetite and hematite, almost all data from the Chagangnuoer ore deposit fall into the region of the skarn type iron deposit. In addition, in the ternary plot of  $TiO_2 - Al_2O_3 - MgO$  of magnetite, many data from the Chagangnuoer ore deposit tend to be seated in the sedimentary metamorphogenic and contact metasomatic region while less data drop into magmatic mafic-ultramafic region. These two diagrams may suggest that the formation mechanism of magnetite from this ore deposit may be similar to that of magnetite from skarn iron deposits. Combining the geological characteristics with the study of mineralogy, the authors hold that iron mineralization was related to skarnization, and that skarnization might have played an quite important role in the formation of the Chagangnuoer iron ore deposit.

**Key words:** Western Tianshan; Chagangnuoer; iron deposit; electron microprobe analysis; skarn mineral; magnetite

近年来西天山阿吾拉勒成矿带铁矿勘查工作取得了突破性进展,2004年以来新疆地矿局新发现和评价了查岗诺尔(大型)、备战(大型)、智博(大型)、敦德(中型)、松湖(中型)及尼新塔格-阿克萨依(中型)等多个铁矿床,新增资源量约6.7亿吨。查岗诺尔大型磁铁矿床位于西天山阿吾拉勒东段,发现于1968年,1979~1980年的普查工作获得M1~M5磁异常,2004~2008年新疆地矿局第三地质大队开展了详查工作,查明该矿为超过2亿吨资源量的大型铁矿<sup>①</sup>。前人在火山岩地球化学和年代学、矿床地质特征、矿石组构、矿床地球化学等方面做了较多的研究工作,如矿床赋存的围岩由次火山岩相的中基性杂岩体(徐祖芳,1984)重新厘定为安山质凝灰岩和晶屑岩屑凝灰岩以及安山岩(冯金星等,2010;汪邦耀等,2011)。地球化学特征表明,矿区内的火山岩形

成于大陆型岛弧或活动大陆边缘构造环境,大哈拉军山组顶部流纹岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb和谐年龄为 $321.2 \pm 1.5 Ma$ (冯金星等,2010;汪邦耀等,2011);虽然成矿期次的划分各不相同,但矿体呈层状、似层状、透镜状产出,发育石榴石、透辉石、阳起石、钾长石、绿帘石、绿泥石等蚀变矿物却是不争的事实,成矿具有复杂性、多阶段性。目前对矿床成因的认识仍存在较大分歧,有火山岩型、火山沉积改造型<sup>②</sup>、矽卡岩型、岩浆矿床(主要)和热液矿床(次要)的复合型等多种观点(徐祖芳,1984;王庆明等,2001;田敬全等,2009;冯金星等,2010;汪邦耀等,2011)。而对于矿体周围及内部广泛发育的矽卡岩矿物的形成机制及矽卡岩与矿体的关系研究相对薄弱,本文在野外地质调查和矿相学的基础上,利用电子探针针对主要的矽卡岩矿物以及磁铁矿和赤铁矿进

① 新疆维吾尔自治区地质调查院. 2008. 新疆西天山查岗诺尔-备战一带铜铁矿资源评价报告.

② 新疆地质矿产开发局地质研究所. 1998. 新疆西天山查岗诺尔地区矿床成矿系列和成矿模式研究报告.

行了系统的研究,讨论矽卡岩的形成机制及其与铁矿的关系,旨在为进一步研究阿吾拉勒成矿带中铁矿床的成矿机制及成矿规律提供信息。

## 1 区域地质背景

西天山位于新疆西段北部,北以依连哈比尔逊断裂带(北天山缝合带)为界,南以长阿吾子-乌瓦门缝合带(南天山缝合带)为界,向西延入哈萨克斯坦,

向东止于库米什北东,总体上向东呈楔形展布(图1a)。西天山地区经历了复杂的构造演化过程,古、中元古代“Pangea-1”泛大陆的增生与裂解、新元古代Rodinia超大陆的形成与裂解(左国朝等,2008),并可能出露早元古代或中元古代变质结晶基底(高俊等,1995;钱青等,2006;李继磊等,2009);早古生代进入多陆块(微板块)及多岛弧古亚洲洋演化阶段(左国朝等,2008),先后发生过向南、向北两次碰撞增生活动(Allen *et al.*, 1992);早石炭世末可能结束

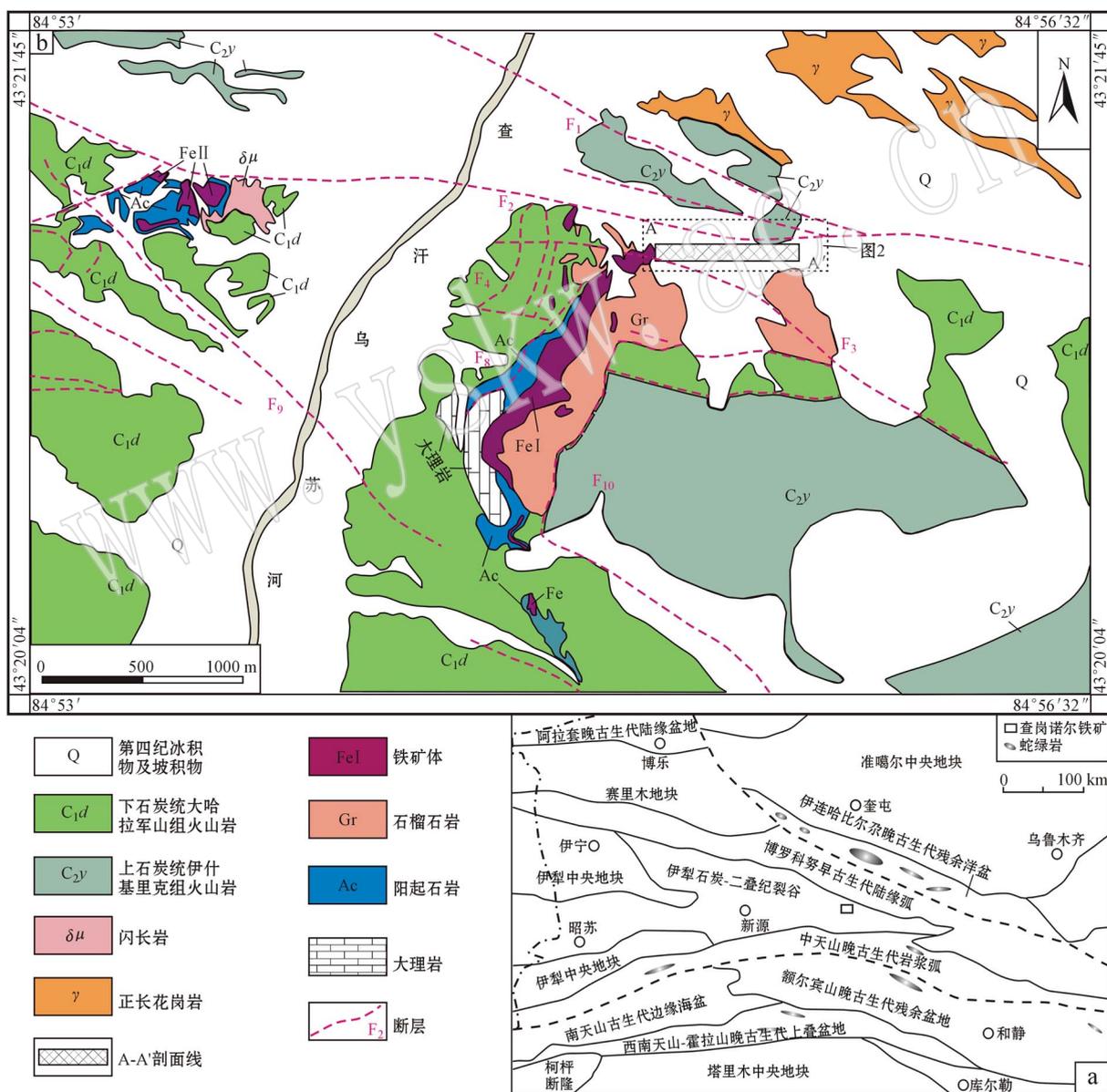


图1 西天山大地构造纲要图(a,引自何国琦等,2004)和查岗诺尔铁矿矿区地质图(b,改自冯金星等,2010)

Fig.1 Simplified tectonic outline map of West Tianshan Mountains (a, modified after He Guoqi *et al.*, 2004) and geological map of the Chaganuoer iron ore district (b, modified after Feng Jinxing *et al.*, 2010)

增生造山,二叠纪时期西天山至整个中亚地区进入后碰撞演化阶段,属于晚古生代增生造山带(高俊等,2009)。

查岗诺尔铁矿床地理位置位于西天山东段,大地构造位置为伊犁石炭-二叠纪裂谷(图 1a)。区域内出露元古宇、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系和第四系等地层,其中以石炭系大哈拉军山组、伊什基里克组分布最为广泛。大哈拉军山组是一套厚度大、分布广、岩性和岩相复杂的火山-沉积岩系。关于该组火山岩形成的沉积-构造环境存在较多的争议,有陆相喷发(杨金中等,2003)、大陆裂谷环境(车自成等,1996)与地幔柱有关的大火成岩省(夏林圻等,2002)、海相岛弧钙碱性火山岩建造(姜常义等,1993,1995;朱永峰等,2005,2006;李注仓等,2006;邵铁全等,2006;刘静等,2006;钱青等,2006;龙灵利等,2008;李永军等,2009;李继磊等,2010)等几种认识。伊什基里克组为一套火山角砾岩、凝灰岩及熔岩,局部夹正常沉积岩和灰岩。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿区地质

矿区出露的地层主要为石炭系的安山质火山碎屑岩,包括下石炭统大哈拉军山组( $C_1d$ )和上石炭统伊什基里克组( $C_{2y}$ ),其间夹少量基性-酸性熔岩、凝灰质砂砾岩及碳酸盐岩等,李永军等(2009)将阿吾拉勒地区这部分的凝灰质砂砾岩、碳酸盐岩厘定为阿克沙克组( $C_{1a}$ ),与下伏的大哈拉军山组和上覆的伊什基里克组均呈角度不整合。石炭系大哈拉军山组地层的划分方案存在不同的意见,本文仅简单介绍矿区内的情况。矿区大哈拉军山组分布广泛,但底部出露不全(未见第一亚组),可细分为 2 个亚组、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,该亚组第一段( $C_1d^{b-1}$ )为灰绿色-暗绿色安山质晶屑凝灰岩、安山质晶屑岩屑凝灰岩、安山质含细角砾晶屑凝灰岩和中-基性熔岩等,第二段( $C_1d^{b-2}$ )主要为浅灰色层状安山质晶屑凝灰岩和安山质火山灰凝灰岩,第三段( $C_1d^{b-3}$ )主要为灰白色浅灰色透闪石透辉石大理岩、石榴石大理岩夹层状凝

灰岩和流纹质(角砾)熔岩;第三亚组地层( $C_1d^c$ )出露厚度约为 450 m,该亚组第一段( $C_1d^{c-1}$ )主要为灰绿色、深绿色安山质(含)火山角砾晶屑凝灰岩、安山质火山灰凝灰岩、安山岩和凝灰质火山角砾岩夹辉绿玢岩、大理岩,第二段( $C_1d^{c-2}$ )由绿色、深绿色流纹质(角砾)熔岩、层状流纹质熔结凝灰岩、流纹岩、淡红色英安岩和英安质晶屑凝灰岩组成<sup>①</sup>。

查岗诺尔铁矿床主要赋存于该组中-上部的火山碎屑岩和火山熔岩,以安山质晶屑岩屑凝灰岩为主,局部夹碳酸盐岩(大理岩透镜体),偶见玄武岩、粗面安山岩和流纹岩等。主矿体 Fe I 产在大哈拉军山组第三亚组第一段灰绿色安山质火山碎屑岩与透镜状碳酸盐岩(大理岩)之间(图 3a),火山碎屑岩多为安山质凝灰岩和晶屑凝灰岩(图 3b),前者在镜下呈安山结构或玻基交织结构(图 4a),后者肉眼即能见到许多长石晶屑(30%~40%),镜下呈碎屑结构(图 4b)。围岩中亦有少量的玄武质安山岩,镜下呈间粒间隐结构(图 4c)。而在安山质凝灰岩与磁铁矿体的接触带产出的蚀变岩则具有交代残余结构,出现透辉石、放射状的阳起石及不规则状的斜长石等(图 4d)。

矿体受 NW、NWW、NE 断裂及环形断裂构造控制(图 1b),如矿区北部的  $F_1$  呈 NW 分布,与 NWW 向的  $F_2$  相交成锐角,两组断裂的规模均较大,延伸较远,控制北部地层、岩体及矿体的展布; $F_8$  和  $F_{10}$  为环状断裂,前者位于 Fe I 矿体之西侧,走向为 NNE~NE,后者分布于 Fe I 矿体的南东侧,呈弧形展布,两者在 Fe I 矿体两侧近平行延伸,形成一个较大的半环形的破碎带,可能是火山气液流体运移的通道;另发育一些分布密集、规模小、延伸短的南北向或北东向的断裂裂隙。岩浆岩出露面积较小,见正长花岗岩、闪长岩等岩体及煌斑岩、英安岩、英安斑岩等岩脉,其中正长花岗岩、闪长岩等岩体明显受到矿区北部的 NW 向  $F_1$  断裂或 NWW 向  $F_2$  断裂的控制,其周围发育绿泥石化、绿帘石化、钾长石化、碳酸盐化等蚀变。

### 2.2 矿床地质

矿区已圈定矿体 6 个,总资源量约为 2.1 亿吨。位于矿区东部的 Fe I 和西部的 Fe II 是最大的两个矿体,其中 Fe I 是最主要的矿体,占矿石总资源量的 95% 以上。Fe I 矿体位于南北向断裂  $F_8$  和  $F_{10}$  之

① 新疆维吾尔自治区地质调查院. 2008. 新疆西天山查岗诺尔-备战一带铜铁矿资源评价报告.

间,平面上总体呈 NE~SW 向,矿体中部微向东南凸出并显著膨大,向北被第四系覆盖,向南逐渐尖灭,且南段明显凹向西北(图 1b)。矿体长约 2 900 m,总体向东倾,倾向为 105°~153°,倾角 15°~36°,局部水平产出,或稍微向北倾。矿体底板的大理岩的倾向大致为 95°~101°,倾角 15°~23°,单工程见矿厚度最小为 3.65 m,最大为 218 m,平均厚度为 64.2 m。矿石品位最高 64.2%,最低 20.2%,平均品位为 35.6%。矿体形态比较规则,呈层状、似层状、透镜状展布,具分枝复合、膨大狭缩、尖灭再现的

特征(图 2)。矿体在地表出露部分,自东向西依次为石榴石蚀变带、磁铁矿体、阳起石蚀变带及大理岩蚀变带(图 1b)。矿体顶板为安山质凝灰岩,底板为透镜状的大理岩(图 3a),由顶板到底板,自上而下,发育安山质凝灰岩、石榴石岩、石榴石化阳起石岩、磁铁矿体、石榴石化阳起石岩、石榴石岩、绿泥石化绿帘石化安山岩及大理岩(图 2)。与大理岩接触的上覆安山岩发育青磐岩化及少量的磁铁矿化,而大理岩发育透辉石化、方柱石化,二者呈渐变过渡关系。因钻孔未穿透大理岩,与下伏的安山岩接触关系不清楚。

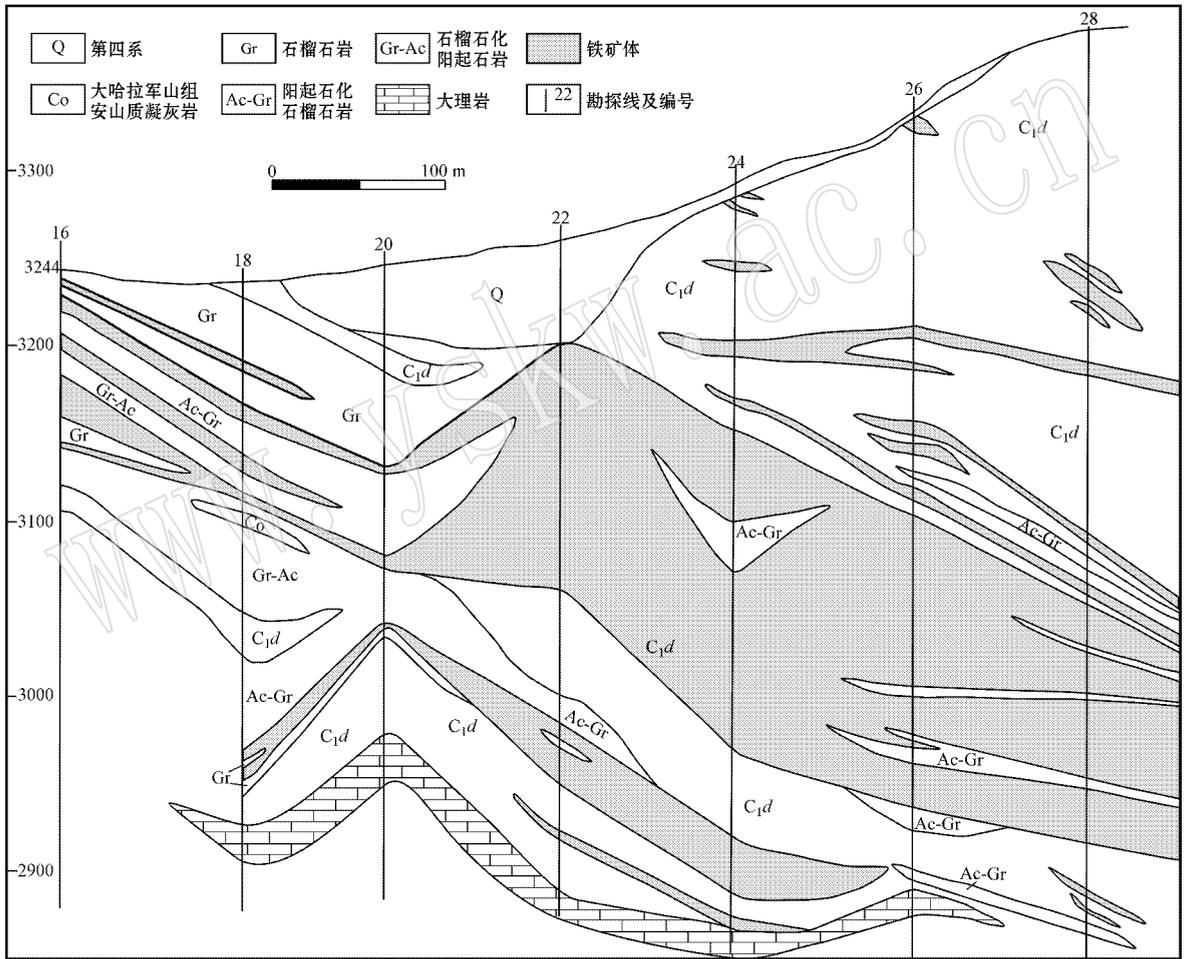


图 2 查岗诺尔铁床 A-A'勘探线剖面图(改自冯金星等, 2010)

Fig. 2 Simplified cross section along A-A' exploration line of the Chagangnuoer iron ore deposit(modified after Feng Jinxing et al., 2010)

矿石矿物主要为磁铁矿,伴生黄铁矿、黄铜矿、赤铁矿、镜铁矿等金属矿物,脉石矿物发育石榴石、阳起石、绿帘石、绿泥石、透辉石、透闪石、方解石、石英等。在靠近大理岩的接触带中则出现方柱石,透辉石、透闪石亦相应增多。氧化矿石矿物则有褐铁矿、蓝铜矿、孔雀石等。

矿石构造有角砾状、斑点状、斑杂状、豹纹状、块状、浸染状、对称条带状及脉状、网状脉(图 3),其中角砾状、斑点状、斑杂状、豹纹状、浸染状构造分布较为普遍,其次是块状或致密块状构造(图 3c)。角砾状矿石可以分为两种:一种是磁铁矿呈角砾状,粒径大小不一,被石榴石、阳起石,或晚期的磁铁矿所胶

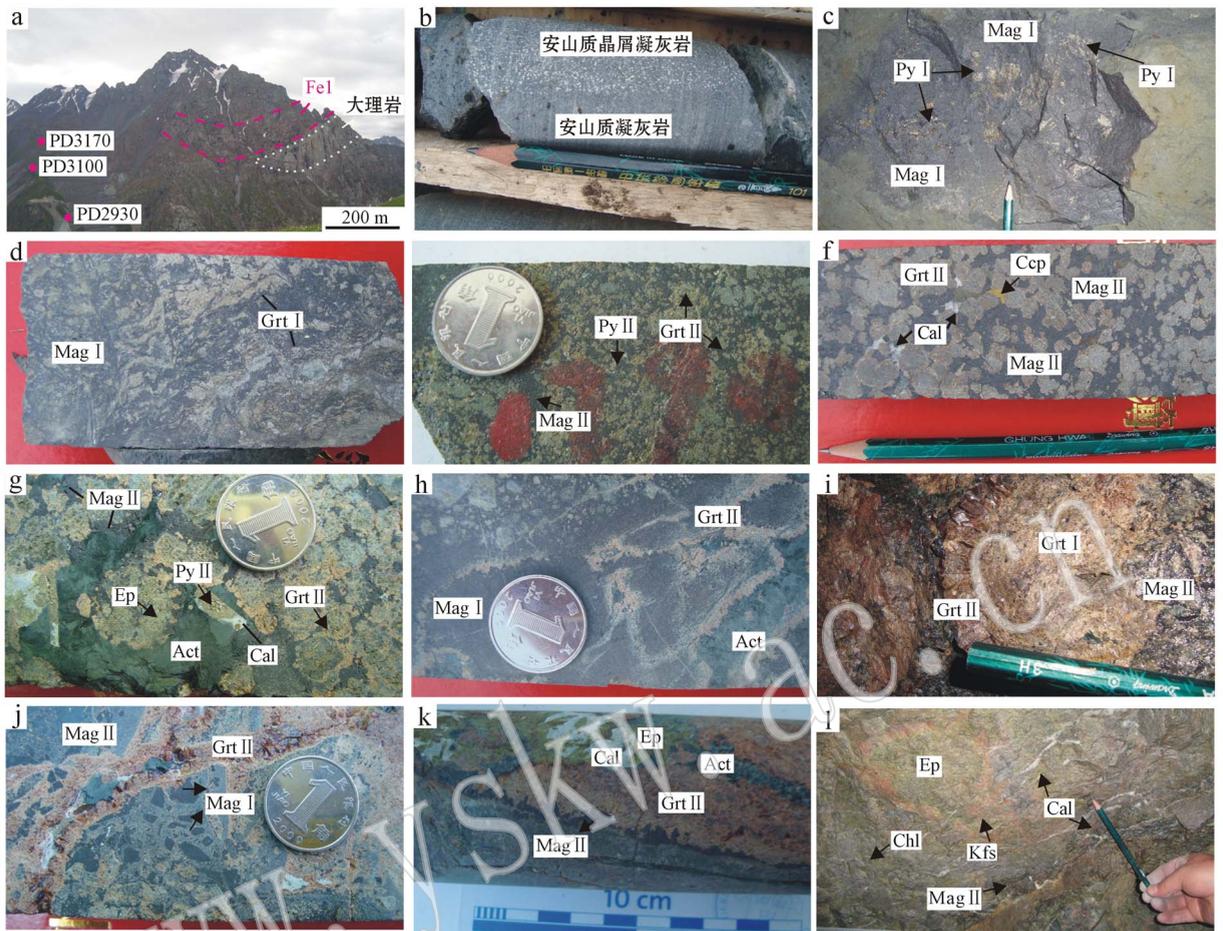


图 3 查岗诺尔铁矿床的围岩和矿石特征

Fig. 3 Features of wall rocks and ores in the Chaganguoer iron deposit

a—Fe I 矿体露头, 底板为透镜状大理岩, 红色圆点为中段位置; b—安山质晶屑凝灰岩(上, 白色斑点为斜长石晶屑)和安山质凝灰岩(下); c—块状矿石中早期的磁铁矿和浸染状黄铁矿; d—石榴石在磁铁矿呈似流动状构造; e—石榴石、绿帘石等在磁铁矿中呈斑点状、星点状, 矿物缝隙间充填黄铁矿; f—豹纹状矿石中磁铁矿交代石榴石, 使后者呈孤岛状, 黄铜矿、方解石充填在缝隙间; g—浸染状矿石中交代形成的磁铁矿与粒状或环状石榴石、环状阳起石、绿帘石密切共生, 部分磁铁矿与上述矿物呈锯齿状接触, 黄铁矿、方解石充填于缝隙间; h—石榴石、阳起石呈环状充填于磁铁矿的间隙中, 磁铁矿边角具圆化特征; i—两期石榴石, 早期石榴石为砖红色、细粒, 褐红色晚期石榴石呈粗粒状、晶形较好, 发育浸染状的后期磁铁矿; j—早期的磁铁矿呈角砾状被晚期的磁铁矿或石榴石所胶结, 方解石(白色)充填在石榴石的内部; k—一条带状矿石中, 依次为安山质凝灰岩、磁铁矿、石榴石、阳起石、绿帘石、方解石, 磁铁矿与石榴石呈锯齿状接触, 两者交代成因同时形成; l—PD2930 中段发育的绿帘石被钾长石包裹, 脉状分布的方解石以及浸染状的磁铁矿; Mag I—早期磁铁矿; Py I—早期黄铁矿; Grt I—早期石榴石; Mag II—晚期磁铁矿; Py II—晚期黄铁矿; Grt II—晚期石榴石; Cep—黄铜矿; Act—阳起石; Ep—绿帘石; Kfs—钾长石; Cal—方解石

a—Fe I ore body exposure, with the foot wall rock being lenticular marble; b—andesitic crystalloclastic tuff (upper, the white spots being plagioclase crystal fragments) and andesitic tuff (lower); c—early magnetite and disseminated pyrite in massive ore; d—garnet as flowing structure in magnetite; e—garnet and epidote in spotted and mottled forms in magnetite, and pyrite filled in the crevices of these minerals; f—in the “leopard pattern” ore, magnetite replacing garnet occurring as insular structure, and chalcopyrite and calcite filled in the fissure; g—metasomatic magnetite, garnet, actinolite and epidote formed in the disseminated ore; h—crevices of magnetite filled with annular garnet and actinolite, and the magnetite becoming a bit rounded; i—early garnet assuming brick-red color fine grains and late garnet assuming maroon and coarse crystal form; j—early magnetite occurring as brecciated form cemented by late magnetite or garnet; k—in the banded iron ore, from the inner to outer, andesitic tuff, magnetite, garnet, actinolite, epidote, calcite etc. appearing successively and magnetite assuming zigzag form with garnet, indicating their formation at the same time by metasomatism; l—at the 2 930 exploratory level, epidote enclosed by K-feldspar, and veined calcite and disseminated magnetite well developed; Mag I—early magnetite; Py I—early pyrite; Grt I—early garnet; Mag II—late magnetite; Py II—late pyrite; Grt II—late garnet; Cep—chalcopyrite; Act—actinolite; Ep—epidote; Kfs—K-feldspar; Cal—calcite

结,有的边部具有圆化特征(图 3h, j),有的棱角分明(图 3j);另一种是磁铁矿胶结安山质岩屑,使残留的安山质岩屑呈角砾状。在“豹纹状”矿石中(图 3f),黑色的磁铁矿交代石榴石等矿物,使得石榴石、阳起石、绿帘石等矿物呈椭圆状、不规则状、孤岛状,其核部残留安山质岩屑,石榴石、阳起石、绿帘石多呈褐红色、褐绿色,且发育反应边,在黑色的磁铁矿中宛如豹纹,因之得名。斑点状的矿石中(图 3e),石榴石、绿帘石等在磁铁矿中呈斑点状、星点状,粒径较小(1 mm 左右)。条带状矿石中(图 3k),磁铁矿在安山质碎屑岩中呈条带状、脉状分布,与石榴石的接触面呈锯齿状,自外侧向安山岩依次为阳起石条带、石榴石条带、磁铁矿条带、含浸染状磁铁矿的安山岩。

矿石结构以他形-半自形粒状结构(图 4h)、半自形-自形粒状结构(磁铁矿呈他形粒状或半自形粒状)为主,交代结构(磁铁矿交代石榴石,在石榴石中呈细小乳滴状,部分石榴石处在核部,图 4f)、充填结构(他形的磁铁矿充填于粒状的石榴石的周围缝隙中,图 4g)、包含结构(粒状的磁铁矿处于核部,其外侧为环状的赤铁矿,而黄铜矿则包裹二者,图 4i)、共生边结构(磁铁矿与石榴石的边界平整,图 4e)等次之。

### 2.3 围岩蚀变

矿床广泛发育石榴石化、阳起石化、透辉石化、透闪石化、绿帘石化、绿泥石化以及碳酸盐岩化和硅化等围岩蚀变,在平面上按不同岩石组合,自东而西可大致分出石榴石(-阳起石)蚀变带、磁铁矿体、阳起石(-绿帘石-绿泥石)蚀变带及大理岩蚀变带(图 1b)。在纵剖面上,也呈现石榴石化、阳起石化、绿帘石化、绿泥石化等,大致在磁铁矿体两侧呈对称分布(图 2)。其中石榴石化几乎在整个矿体周围发育,与磁铁矿体的关系最为密切,至少可以区分出两期的石榴石化,早期的石榴石为土黄色、褐黄色,晶形细小( $<0.2$  mm),呈纤维状,多分布在下部矿体的周围,与细粒的磁铁矿共存(图 3d);晚期的石榴石呈褐色、红褐色,晶形完整、粒径粗大,可达 2 mm~2 cm,具有环带结构,多分布在矿体的上部(图 3i)。大理岩附近的接触带中发育透辉石、透闪石、方柱石等矽卡岩矿物。辉石-阳起石化多分布于石榴石的外侧,或呈条带状,或呈环状包裹石榴石(图 3g, h, k)。在斑杂状的矿石中,绿帘石呈细粒状产出,磁铁矿分

布在它的外侧。绿帘石-绿泥石化作为中低温蚀变阶段的产物,是常见的蚀变组合,但其周围少见磁铁矿化(图 3l)。而方解石脉、碳酸盐脉和石英脉常穿插于上述各种矿物之中,是晚期低温成矿流体活动的遗迹。简而言之,查岗诺尔铁矿强烈发育以石榴石、透辉石为代表的矽卡岩化、中低温的绿帘石-绿泥石化以及晚期的低温碳酸盐化和硅化。

## 3 电子探针分析

### 3.1 样品采集及分析方法

对采自 FeI 矿体的 27 件样品中的石榴石、辉石、绿帘石和磁铁矿、赤铁矿进行了电子探针分析,这些样品主要形成于矽卡岩成矿期的石榴石-磁铁矿阶段和退蚀变成矿期的磁铁矿-石榴石-阳起石阶段、钾长石-绿帘石-绿泥石阶段。详细的样品名称和取样位置见表 1。

电子探针分析在中国地质科学院矿产资源所电子探针实验室完成,仪器型号为 JXA-8230,硅酸盐、氧化物分析条件为加速电压 5 kV、电流 20 nA、束斑直径 5  $\mu$ m,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 矽卡岩矿物分析结果

#### 3.2.1 石榴石

查岗诺尔铁矿床 35 件石榴石电子探针分析结果、阳离子数及端员组分见表 2,计算得到的端员组分如图 5 所示。石榴石的端员组分以钙铁榴石(Adr)为主,其变化范围为 37.97%~97.89%,平均 61.58%;其次是钙铝榴石(Gr<sub>s</sub>),其变化范围为 0.19%~57.21%,平均 35.45%。铁铝榴石(Alm)和锰铝榴石(Sps)的含量较低,两者之和的变化范围为 0.84%~4.38%,平均 2.48%。而镁铝榴石和钙铝榴石的含量更低,平均含量分别只有 0.42%和 0.06%,因含量太低故没有在表 2 中列出来。石榴石的端员组分图解(图 5)表明,查岗诺尔铁矿床的石榴石为钙铁榴石-钙铝榴石系列,钙铁榴石比钙铝榴石的含量高一些,绝大多数的石榴石集中在两者的过渡部位。但在不同类型的矿石中,石榴石含量的端员组分有一些差别,如在稀疏浸染状磁铁矿石、角砾状矿石、磁铁矿化、石榴石化凝灰岩及部分块状磁铁矿石中,这些早期形成的石榴石多为钙铝榴石,而在晚期形成的一些豹纹状磁铁矿石、含石榴石化阳

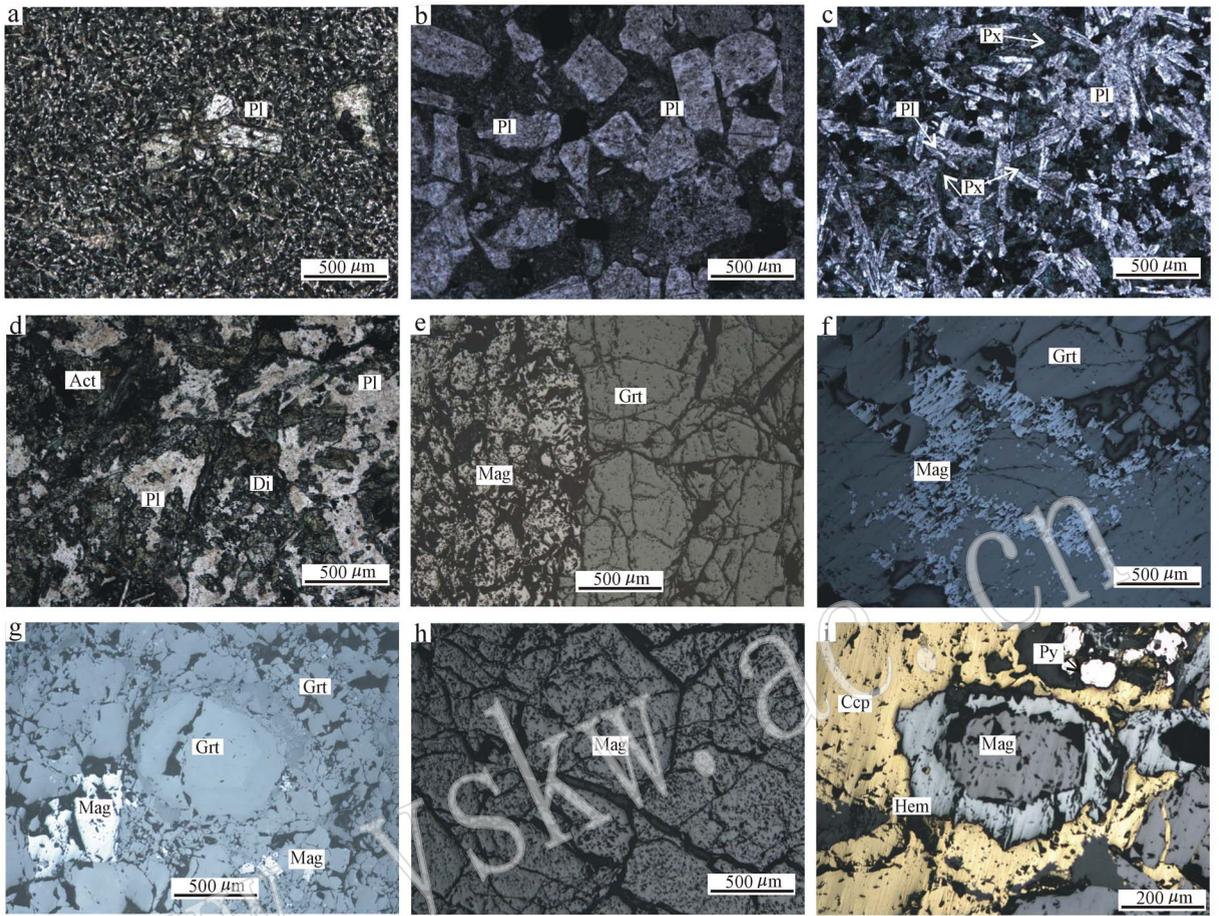


图 4 查岗诺尔铁矿床岩石、矿石镜下显微特征

Fig. 4 Photomicrographs of host rocks and ores from the Chagangnuoer iron ore deposit

a—斜长石斑晶(5%左右),基质具有安山结构或玻基交织结构,长英质微晶呈半定向排列(-); b—碎屑结构,斜长石晶屑(30%~40%)呈短柱状、棱角状、不规则状,自形与他形混杂(-); c—玄武质安山岩,镜下呈间粒-间隐结构,在不规则排列的长条状斜长石间隙中,充填着粒状辉石颗粒及隐晶质(-); d—他形粒状的透辉石,放射状的阳起石及交代残余的不规则状斜长石(-); e—共结边结构,磁铁矿与石榴石的边界较为平整,几乎同时形成(反射光); f—交代结构,磁铁矿交代石榴石,在石榴石中呈细小乳滴状,石榴石被交代呈孤岛状(反射光); g—填隙结构,他形的磁铁矿充填于粒状的石榴石的周围缝隙中,石榴石晶形较好,早于磁铁矿(反射光); h—磁铁矿呈他形-半自形粒状结构,晶形较好(反射光); i—包含结构,粒状的磁铁矿(棕色)处于核部,其外侧为环状的赤铁矿(灰白色),而黄铜矿(黄铜色)则包裹二者,黄铁矿呈他形充填(黄白色),生成顺序:磁铁矿>赤铁矿>黄铜矿、黄铁矿(反射光); Pl—斜长石; Px—辉石; Act—阳起石; Di—透辉石; Mag—磁铁矿; Grt—石榴石; Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Hem—赤铁矿

a—plagioclase phenocrysts (about 5%) matrix assuming hyalopilitic texture (-); b—fragmental texture, plagioclase mineral shards (about 30%~40%) assuming short prismatic, angular and irregular forms (-); c—basaltic andesite assuming tholeiitic texture, with granular pyroxene and cryptocrystalline filled in the fissures of stripped plagioclase (-); d—anhedral diopside, radial actinolite and irregular plagioclase of replacement remnant (-); e—magnetite and garnet in flattened contact relationship, indicating that they were formed at the same time (reflected light); f—metasomatic texture, fine-grained magnetites replacing garnets, making the latter isolated (reflected light); g—intersertal texture, anhedral magnetite packed in the crevices of granular garnet, implying that the latter was formed earlier than the former (reflected light); h—magnetites occurring as allotriopyhedral texture and in relatively good crystal form (reflected light); i—poikilitic texture, granular magnetite in core, ring hematite and outer chalcopyrite containing the two minerals, and anhedral pyrite filled in the fissure, indicating the mineral sequence of magnetite-hematite-chalcopyrite or pyrite (reflected light); Pl—plagioclase; Px—pyroxene; Act—actinolite; Di—diopside; Mag—magnetite; Grt—garnet; Py—pyrite; Ccp—chalcopyrite; Hem—hematite

表 1 查岗诺尔铁矿床电子探针分析的样品名称和采样位置

Table 1 Name and location of samples for electron microprobe analyses from the Chagangnuoer iron deposit

序号	样号	岩石名称	采样位置
1	CG002	阳起石化、石榴石化稀疏浸染状磁铁矿石	钻孔 ZK3001 395 m
2	CG005	致密块状磁铁矿石	钻孔 ZK3001 394 m
3	CG007	磁铁矿化石榴石化凝灰岩	钻孔 ZK3002 74.5 m
4	CG008	豹纹状磁铁矿石	钻孔 ZK3002
5	CG011	中粗粒石榴石岩	钻孔 ZK3002
6	CG014	块状磁铁矿石	钻孔 ZK2201 218 m
7	CG021	稀疏浸染状夹团块状磁铁矿石	钻孔 ZK3001 424 m
8	CG023	豹纹状磁铁矿石	钻孔 ZK2201 309 m
9	CG024	角砾状磁铁矿石	具体位置不明
10	CG026	含透闪石的块状磁铁矿石	具体位置不明
11	CG028	含团块状黄铁矿的阳起石化凝灰岩	平硐 PD2930 硐口处 645 m
12	CG031	含磁铁矿脉的绿帘石化凝灰岩	平硐 PD2930 硐口处 645 m
13	CG042	石榴石化、阳起石化磁铁矿石	平硐 PD2930 硐口处 725 m
14	CG043	浸染状黄铁矿化石榴石化磁铁矿石	平硐 PD2930 硐口处 725 m
15	CG045	角砾状磁铁矿石石榴石化绿帘石化凝灰岩	平硐 PD2930 硐口处 744 m
16	CG053	安山质凝灰岩	钻孔 K11002 198 m
17	CG065	含方解石细脉安山质凝灰岩	钻孔 ZK11002 414 m
18	CG076	安山质熔结角砾凝灰岩	钻孔 ZK11002 531 m
19	CG119	绿帘石化稀疏浸染状磁铁矿石	钻孔 ZK11401 667 m
20	CG173	致密块状磁铁矿,含少量黄铁矿及黄铜矿	钻孔 ZK4001 395 m
21	CG174	石榴石蚀变带附近的磁铁矿石	钻孔 ZK4001 392 m
22	CG182	致密块状磁铁矿,含稀疏浸染状黄铁矿	钻孔 ZK4001 411 m
23	CG183	豹纹状磁铁矿石	钻孔 ZK4001 412 m
24	CG193	角砾状磁铁矿	钻孔 ZK3802 521 m
25	CG228	块状磁铁矿石	平硐 PD3170
26	CG245	石榴石化、阳起石化磁铁矿石	平硐 PD3170
27	CG247	磁铁矿化的安山岩	平硐 PD3170

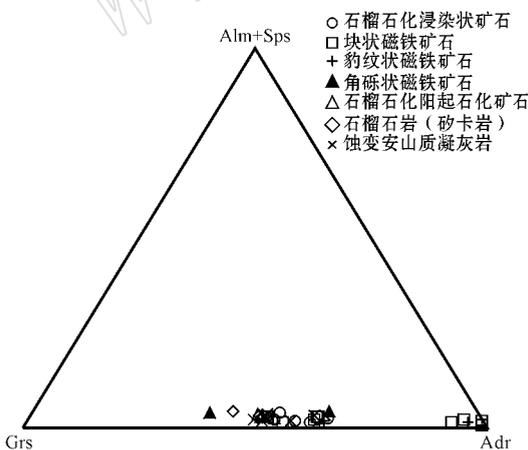


图 5 查岗诺尔铁矿石石榴石端员组分三角图解

Fig. 5 Ternary plot of garnet compositions in the

Chagangnuoer iron deposit

Adr—钙铁榴石;Grs—钙铝榴石;Alm—铁铝榴石;

Sps—锰铝榴石

Adr—andradite;Grs—grossularite;Alm—almandine;

Sps—spessartine

起石榴磁铁矿石和块状磁铁矿石中,石榴石的端员组分偏向钙铁榴石。石榴石的成分与其形成作用密切相关,钙铝榴石或钙铁铝榴石主要是流体的扩散交代形成的,钙铁榴石则受岩浆流体的影响较大(Gaspar *et al.*, 2008)。所以,查岗诺尔大部分的石榴石(钙铁榴石与钙铝榴石比例相当)可能是通过热液流体(大气降水与岩浆热液的混合)从大理岩中萃取Ca质等成分,并与安山质地层发生扩散交代反应,萃取铁镁质成分,生成稀疏浸染状磁铁矿石、角砾状矿石及部分块状磁铁矿石;而块状矿石和豹纹状矿石中的石榴石(主要是钙铁榴石)的形成可能与岩浆热液(起主导作用)的影响较大有关,渗滤交代反应较为强烈。

### 3.2.2 辉石

12件辉石电子探针分析的结果、阳离子数及端员组分见表3。辉石的端员组分以透辉石(Di)和钙铁辉石(Hd)为主,锰钙辉石(Jo)含量较低(图6),其中透辉石含量变化范围为28.68%~87.46%,平均

表 2 查岗诺尔铁石榴石电子探针分析结果( $w_B/\%$ )、阳离子数及端员组分  
Table 2 Electron microprobe analyses ( $w_B/\%$ ), ion proportions and end members of representative garnets from the Chaganuoer iron deposit

样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NiO	Total	Si	Ti	Al	Cr	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn	Mg	Ca	Adr	Grs	Alm	Sps
CG002-1	38.29	0.11	9.86	0.01	16.49	1.06	0.05	33.43	0.00	0.00	0.00	0.00	99.29	3.035	0.006	0.921	0.000	1.051	0.042	0.071	0.006	2.840	53.29	42.68	1.42	2.39
CG002-3	34.87	0.13	8.74	0.09	15.98	0.90	0.00	34.56	0.01	0.03	2.57	0.00	97.86	2.920	0.008	0.862	0.006	1.119	0.000	0.064	0.000	3.100	53.04	44.66	0.00	2.02
CG002-9	37.88	0.00	7.30	0.00	19.23	0.49	0.05	33.05	0.02	0.00	0.05	0.06	98.14	3.062	0.000	0.696	0.000	1.263	0.037	0.034	0.006	2.862	64.48	32.92	1.26	1.15
CG005-3	36.27	0.00	8.04	0.04	18.86	0.72	0.00	33.66	0.01	0.00	0.00	0.00	97.59	2.963	0.000	0.774	0.002	1.248	0.040	0.050	0.000	2.947	61.66	35.26	1.33	1.63
CG007-2	37.58	0.09	10.51	0.00	16.00	0.92	0.10	33.73	0.00	0.01	0.00	0.03	98.95	2.993	0.005	0.986	0.000	1.015	0.050	0.062	0.011	2.878	50.72	45.15	1.68	2.08
CG007-3	37.46	1.16	9.02	0.02	16.69	0.77	0.18	33.80	0.00	0.00	0.01	0.00	99.10	2.983	0.069	0.847	0.002	1.111	0.000	0.052	0.021	2.884	56.39	41.07	0.00	1.77
CG008-2	35.66	0.00	0.15	0.00	28.10	0.37	0.15	33.11	0.00	0.00	0.00	0.00	97.53	2.996	0.000	0.015	0.000	1.974	0.000	0.026	0.018	2.980	97.89	0.64	0.00	0.87
CG008-3	37.09	0.04	7.50	0.00	18.71	0.46	0.10	34.22	0.00	0.00	0.02	0.02	98.15	3.004	0.002	0.716	0.000	1.267	0.000	0.032	0.011	2.970	63.08	35.48	0.00	1.05
CG008-5	36.73	0.01	1.03	0.04	27.76	0.26	0.08	33.35	0.00	0.02	0.02	0.04	99.34	3.016	0.000	0.100	0.002	1.887	0.020	0.018	0.010	2.935	94.86	3.40	0.68	0.61
CG011-2	38.11	0.37	10.87	0.02	15.36	0.80	0.13	33.90	0.00	0.00	0.05	0.00	99.61	3.004	0.222	1.010	0.001	0.972	0.041	0.054	0.016	2.864	49.01	47.22	1.37	1.81
CG011-5	38.28	0.00	12.28	0.02	13.92	0.98	0.09	33.83	0.01	0.00	0.00	0.00	99.41	3.011	0.000	1.138	0.001	0.854	0.062	0.065	0.010	2.851	42.84	52.51	2.08	2.19
CG011-6	37.31	0.24	10.21	0.00	15.71	0.71	0.09	33.60	0.03	0.00	0.00	0.00	97.91	2.999	0.015	0.967	0.000	1.024	0.032	0.048	0.011	2.894	51.42	45.50	1.09	1.62
CG014-2	38.66	0.19	10.50	0.00	15.65	0.90	0.15	34.09	0.01	0.00	0.05	0.00	100.19	3.029	0.011	0.970	0.000	1.004	0.022	0.060	0.017	2.861	50.86	45.80	0.74	2.02
CG014-4	36.03	0.00	0.07	.02	28.19	0.36	0.12	33.27	0.00	0.02	0.00	0.00	98.09	3.009	0.000	0.007	0.002	1.969	0.000	0.025	0.015	2.976	97.87	0.70	0.00	0.84
CG014-5	37.95	0.15	9.51	0.02	16.46	0.54	0.15	34.17	0.00	0.01	0.02	0.00	98.97	3.019	0.009	0.892	0.001	1.088	0.006	0.036	0.017	2.912	54.93	42.99	0.22	1.22
CG021-2	37.58	0.23	8.98	0.00	17.26	0.69	0.08	34.11	0.00	0.00	0.01	0.00	98.95	3.002	0.014	0.846	0.000	1.144	0.009	0.047	0.010	2.919	57.50	40.31	0.29	1.57
CG024-3	38.35	0.02	13.26	0.00	12.05	1.15	0.22	33.56	0.00	0.00	0.00	0.00	98.61	3.022	0.001	1.231	0.000	0.753	0.041	0.077	0.026	2.833	37.97	57.21	1.37	2.58
CG026-1	37.20	0.20	8.06	0.03	18.46	0.57	0.07	33.66	0.05	0.04	0.04	0.00	98.37	3.003	0.012	0.767	0.002	1.221	0.026	0.039	0.008	2.912	61.35	36.13	0.87	1.29
CG026-4	37.52	0.12	7.90	0.00	18.87	0.67	0.03	33.41	0.01	0.00	0.01	0.00	98.54	3.021	0.007	0.750	0.000	1.231	0.040	0.046	0.003	2.882	62.15	34.85	1.34	1.55
CG028-1	37.72	0.46	8.11	0.00	18.67	0.56	0.02	33.24	0.04	0.00	0.00	0.05	98.87	3.024	0.027	0.766	0.000	1.199	0.053	0.038	0.003	2.856	61.01	35.84	1.79	1.28
CG031-1	35.08	0.90	7.48	0.09	18.62	0.91	0.06	32.56	0.00	0.00	0.08	0.03	95.80	2.929	0.056	0.736	0.006	1.269	0.031	0.064	0.007	2.913	63.11	33.19	1.04	2.14

续表 2

Continued Table 2

样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NiO	Total	Si	Ti	Al	Cr	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn	Mg	Ca	Adr	Grs	Alm	Sps
CG045-1	37.29	0.03	7.53	0.00	20.03	0.53	0.01	32.72	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	98.14	3.023	0.002	0.719	0.000	1.264	0.094	0.036	0.001	2.843	63.72	31.85	3.17	1.21
CG119-4	37.05	1.22	8.12	0.05	17.81	0.67	0.05	33.67	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	98.70	2.976	0.074	0.769	0.003	1.195	0.001	0.045	0.006	2.897	60.76	37.30	0.04	1.54
CG183-1	37.28	0.27	7.68	0.00	19.15	0.58	0.08	34.25	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	99.32	2.986	0.016	0.725	0.000	1.273	0.010	0.040	0.009	2.939	63.71	34.34	0.32	1.32
CG228-1	34.79	0.00	0.55	0.11	27.66	0.58	0.15	32.32	0.05	0.00	0.00	0.07	0.00	96.27	2.969	0.000	0.655	0.007	1.959	0.015	0.042	0.020	2.955	96.93	0.19	0.49	1.39
CG228-3	35.35	0.01	1.33	0.00	27.27	0.56	0.11	32.70	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	97.37	2.971	0.001	0.132	0.000	1.887	0.030	0.040	0.014	2.945	93.45	3.78	1.00	1.32
CG228-5	35.79	0.00	1.87	0.02	26.35	0.55	0.17	33.04	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	97.86	2.982	0.000	0.184	0.002	1.827	0.009	0.038	0.021	2.950	90.78	6.88	0.30	1.27
CG245-2	38.17	0.36	11.14	0.00	15.52	0.88	0.11	34.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.36	2.989	0.021	1.029	0.000	0.965	0.051	0.058	0.013	2.868	48.41	47.50	1.71	1.94
CG245-4	37.15	0.40	9.98	0.00	16.09	0.75	0.10	33.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	98.32	2.980	0.024	0.943	0.000	1.054	0.025	0.051	0.012	2.909	52.79	44.29	0.83	1.70
CG245-6	37.84	0.26	10.65	0.03	15.76	0.53	0.08	33.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.01	3.004	0.016	0.996	0.002	0.989	0.057	0.035	0.009	2.879	49.77	46.70	1.92	1.19
CG245-8	37.62	0.08	10.73	0.03	15.46	0.69	0.15	33.96	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	98.72	2.996	0.005	1.007	0.002	0.991	0.038	0.046	0.018	2.897	49.57	46.93	1.28	1.55
CG247-1	37.98	0.61	10.54	0.04	14.99	0.67	0.26	33.99	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	99.11	3.004	0.036	0.983	0.003	0.988	0.004	0.045	0.030	2.881	50.06	47.14	0.14	1.51
CG247-5	37.97	0.24	10.39	0.00	15.72	0.71	0.18	33.93	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	99.17	3.009	0.014	0.970	0.000	1.014	0.027	0.048	0.021	2.881	51.11	45.67	0.92	1.61
CG247-7	38.40	0.39	11.01	0.02	14.83	0.59	0.20	33.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.42	3.021	0.023	1.021	0.001	0.949	0.027	0.039	0.024	2.866	48.15	48.75	0.91	1.33
CG247-10	37.90	0.13	10.47	0.01	15.51	0.84	0.14	33.79	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	98.82	3.014	0.008	0.981	0.000	1.004	0.027	0.057	0.016	2.878	50.56	46.06	0.91	1.90

注: FeO<sup>T</sup>—全铁; Adr—钙铁榴石; Grs—钙铝榴石; Alm—铁铝榴石; Sps—锰铝榴石; 其单位均为%。

表 3 查岗诺尔铁矿辉石电子探针分析结果(  $w_B/\%$  )、阳离子数及端员组分Table 3 Electron microprobe analyses (  $w_B/\%$  ), ion proportions and end members of representative clinopyroxenes from the Chaganuoer iron deposit

样号	CG002-8	CG005-1	CG007-4	CG011-4	CG026-8	CG042-2	CG045-2	CG053-1	CG065-1	CG182-4	CG182-5	CG183-2
SiO <sub>2</sub>	46.82	53.96	52.58	51.21	54.992	46.13	51.96	52.53	49.71	52.29	45.82	50.18
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.00	0.12	0.05	0.000	0.09	0.00	0.17	0.42	0.05	0.08	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.19	0.30	1.51	1.38	0.214	5.35	0.28	3.75	6.51	2.47	6.79	4.29
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.02	0.03	0.13	0.189	0.05	0.056	0.02	0.04	0.04	0.06	0.08
FeO <sup>T</sup>	24.74	3.73	6.95	7.29	16.712	25.13	12.70	10.03	15.87	17.11	21.69	20.62
MnO	0.41	0.66	0.30	0.57	2.275	0.49	0.45	0.11	1.05	0.33	0.29	0.29
MgO	7.17	16.01	13.40	12.77	12.553	6.66	9.88	16.61	11.77	12.81	9.05	10.01
CaO	11.74	25.29	25.09	24.80	12.361	11.63	23.85	12.61	11.77	12.32	11.98	12.14
Na <sub>2</sub> O	0.41	0.09	0.13	0.09	0.214	0.54	0.23	0.48	0.71	0.23	0.62	0.30
K <sub>2</sub> O	0.90	0.02	0.00	0.00	0.131	0.94	0.00	0.24	0.15	0.23	1.14	0.52
NiO	0.00	0.00	0.04	0.06	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.03	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01
以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准计算												
Si	1.90	1.98	1.96	1.95	2.08	1.88	2.00	1.98	1.90	2.01	1.83	1.95
Al <sup>IV</sup>	0.10	0.00	0.04	0.05	0.00	0.12	0.00	0.02	0.10	0.00	0.17	0.05
Al <sup>VI</sup>	0.14	0.00	0.02	0.01	0.01	0.14	0.01	0.14	0.20	0.11	0.15	0.15
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.05	0.04	0.03	0.05	0.00	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00
Fe <sup>2+</sup>	0.78	0.08	0.19	0.18	0.54	0.77	0.40	0.32	0.51	0.56	0.55	0.68
Mn	0.01	0.02	0.01	0.02	0.07	0.02	0.01	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01
Mg	0.43	0.88	0.74	0.73	0.71	0.41	0.57	0.93	0.67	0.73	0.54	0.58
Ca	0.51	1.00	1.00	1.01	0.50	0.51	0.98	0.51	0.48	0.51	0.51	0.51
Na	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02	0.04	0.05	0.02	0.05	0.02
K	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	0.01	0.01	0.01	0.06	0.03
Di	30.46	87.46	74.88	73.56	53.66	28.68	56.62	66.54	47.18	52.15	38.36	41.05
Hd	68.55	10.48	24.17	24.58	40.81	70.13	41.91	33.22	50.43	47.10	60.94	58.28
Jo	0.99	2.06	0.95	1.86	5.53	1.19	1.48	0.24	2.39	0.76	0.70	0.67

注: FeO<sup>T</sup>—全铁; Di—透辉石; Hd—钙铁辉石; Jo—锰钙辉石; 其单位均为%。

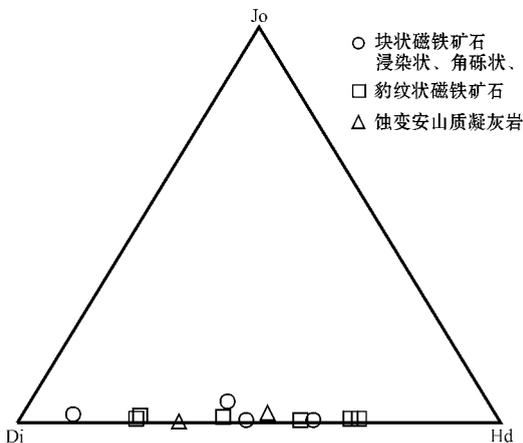


图 6 查岗诺尔铁矿辉石端员组分三角图解

Fig. 6 Ternary plots of pyroxene compositions from the Chaganuoer iron deposit

Hd—hedenbergite; Di—diopside; Jo—johannsenite

54.22%, 钙铁辉石含量变化范围为 10.46% ~ 70.13%, 平均 44.22%, 而锰钙辉石含量变化则为 0.24% ~ 5.53%, 平均为 1.57%, 属于透辉石—钙铁辉石固溶体系列, 透辉石和钙铁辉石的含量相当, 前者略高。在与铁矿体接触带附近的安山质凝灰岩、浸染状磁铁矿中, 钙铁辉石的含量稍高, 而在块状磁铁矿、稠密浸染状磁铁矿和含黄铁矿的浸染状磁铁矿以及石榴石岩中, 透辉石的含量增高(图 6), 显示从成矿的早期至晚期, 辉石中铁质含量有析出的趋势。

### 3.2.3 绿帘石

7 件绿帘石的电子探针分析结果见表 4。绿帘石的主要化学成分: SiO<sub>2</sub> 平均 38.65%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 平均 11.81%, FeO<sup>T</sup> 平均 20.09%, CaO 平均 22.64%, MgO 平均 2.89%, 而 Ti、Ni、Cr、Mn 等微量元素的含量很低, 总体表现为富 Al、Ca, 贫 Fe、Mg 的特点。

表 4 查岗诺尔铁矿绿帘石电子探针分析结果

$\omega_B/\%$

Table 4 Electron microprobe analyses of representative epidote from the Chaganguoer iron deposit

样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total
CG002-10	37.33	0.00	10.66	0.00	15.25	0.76	0.14	33.96	0.01	0.01	0.01	0.05	98.20
CG023-2	35.60	0.00	0.41	0.03	28.32	0.99	0.08	32.26	0.00	0.01	0.09	0.00	97.77
CG023-3	43.90	0.29	7.91	0.11	26.86	0.58	5.50	11.86	0.70	1.64	0.00	0.00	99.34
CG119-1	37.39	0.05	20.88	0.01	14.04	0.04	0.03	23.13	0.01	0.01	0.01	0.00	95.58
CG119-6	37.76	0.02	21.08	0.00	14.08	0.03	0.01	23.23	0.00	0.00	0.00	0.01	96.22
CG173-3	40.68	0.03	10.22	0.22	27.54	2.31	10.75	0.11	0.02	0.03	0.00	0.00	91.88
CG247-3	37.89	0.20	11.52	0.03	14.56	0.94	0.21	33.91	0.01	0.02	0.00	0.00	99.28

注：表中 FeO<sup>T</sup> 为全铁。

在野外的岩矿石和显微镜下都观察到绿帘石由石榴石、辉石蚀变而来的现象，与阳起石、绿泥石等都是中低温退蚀变的产物。绿帘石的电子探针分析结果，从化学成分上的变化验证了上述现象，表明该矿物形成时析出了 Fe、Mg 物质。

综上，查岗诺尔铁矿床的石榴石为钙铁榴石-钙铝榴石系列，其端员组分的变化与世界大型矽卡岩型铁矿的石榴石端员组分(图 7a)变化相似(Meinert, 1992)，与国内的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, 2007; 周振华等, 2011)。辉石属于透辉石-钙铁辉石系列，与世界上矽卡岩型铁矿中辉石的端员组分特征近似(图 7b)，但国外矽卡岩型铁矿钙铁辉石含量一般超过 80%(Meinert, 1992)；然而中国的矽卡岩型铁矿以富透辉石为特征，其含量一般是 50%~

90% 属于钙质矽卡岩(赵斌等, 1987; 赵一鸣等, 1997)，查岗诺尔铁矿中的辉石端员组分特征与这些特点一致。石榴石和辉石的矿物组成分别是  $Adr_{37.97-97.89} Grs_{0.19-57.21} (Alm + Sps)_{.84-4.38}$  和  $Di_{28.68-87.46} Hd_{10.46-70.13} Jo_{0.24-5.53}$ ，显示成分变化较大的特征。

### 3.3 矿石矿物分析结果

48 件磁铁矿电子探针分析结果见表 5，其中主要成分为 FeO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，全铁 FeO<sup>T</sup> 含量 88.64%~95.25%，平均 92.00%；SiO<sub>2</sub> 含量 0~1.93%，平均 0.95%；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 0.01%~1.61%，平均 0.65%；TiO<sub>2</sub> 含量 0~0.08%，平均含量不足 0.01%；MnO 含量 0~0.19%，平均 0.05%；MgO 含量 0~0.73%，平均 0.15%；CaO 含量 0~0.65%，平均 0.24%；Na、K、P、Ni 含量很低，大多低于检测限。

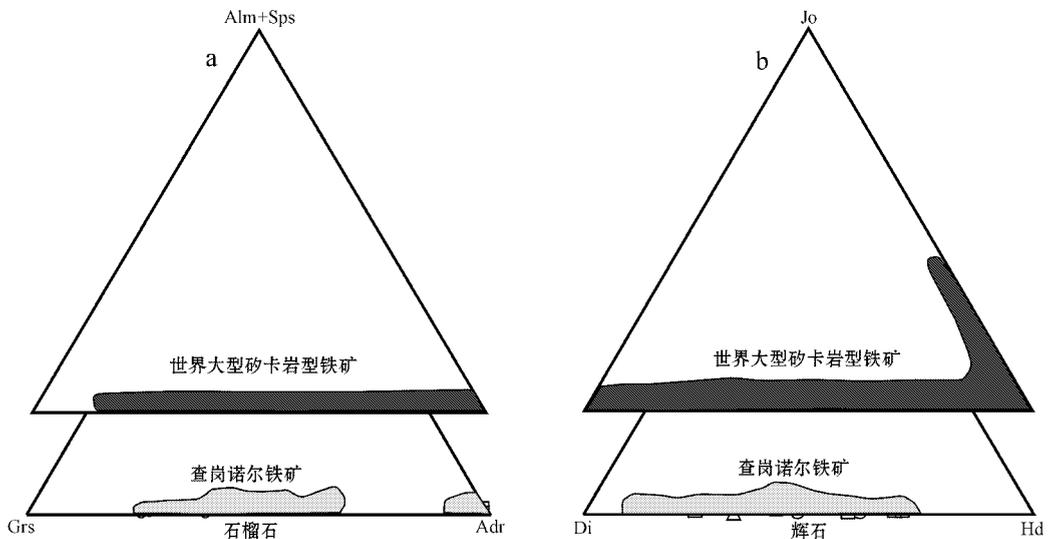


图 7 查岗诺尔铁矿与世界大型矽卡岩型铁矿的石榴石和辉石端员组分对比(引自 Meinert, 1992)

Fig. 7 Ternary plot comparisons of garnet and pyroxene compositions between the Chaganguoer iron deposit and major large skarn deposits in the world(modified after Meinert, 1992)

表 5 查岗诺尔铁矿磁铁矿电子探针分析结果

 $w_B/\%$ 

Table 5 Electron microprobe analyses of representative magnetite from the Chaganuoer iron deposit

样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NiO	Total
CG005-2	0.11	0.00	0.11	0.09	94.25	0.01	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	94.63
CG005-4	1.90	0.01	0.29	0.08	91.91	0.05	0.15	0.37	0.05	0.00	0.01	0.00	94.82
CG005-5	1.93	0.05	1.26	0.07	91.27	0.07	0.40	0.52	0.16	0.10	0.01	0.00	95.83
CG007-1	0.32	0.01	0.24	0.00	94.64	0.07	0.07	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	95.36
CG007-5	0.32	0.06	0.32	0.09	93.52	0.00	0.01	0.11	0.05	0.02	0.03	0.03	94.54
CG008-1	1.59	0.00	1.56	0.03	90.98	0.07	0.32	0.45	0.09	0.05	0.02	0.00	95.15
CG008-4	1.72	0.00	1.44	0.06	90.27	0.03	0.18	0.63	0.10	0.02	0.02	0.00	94.46
CG011-1	0.63	0.03	0.36	0.06	92.92	0.00	0.03	0.11	0.10	0.00	0.00	0.02	94.27
CG014-1	1.11	0.01	1.17	0.06	91.61	0.08	0.20	0.33	0.16	0.02	0.01	0.00	94.75
CG014-3	1.36	0.01	1.35	0.04	90.20	0.00	0.16	0.45	0.12	0.00	0.00	0.01	93.69
CG014-6	1.71	0.00	0.98	0.13	89.91	0.09	0.11	0.65	0.05	0.04	0.00	0.00	93.66
CG021-1	0.56	0.03	0.35	0.09	93.64	0.08	0.06	0.13	0.05	0.02	0.00	0.00	95.00
CG021-3	0.29	0.02	0.13	0.03	93.74	0.07	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.02	94.37
CG021-4	0.00	0.00	0.05	0.04	94.35	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	94.48
CG023-1	1.33	0.08	1.04	0.22	90.24	0.08	0.12	0.43	0.11	0.05	0.00	0.01	93.71
CG023-4	1.55	0.01	1.13	0.04	90.92	0.08	0.20	0.41	0.11	0.03	0.00	0.00	94.47
CG026-2	1.33	0.06	0.66	0.01	91.23	0.01	0.26	0.34	0.23	0.03	0.00	0.07	94.22
CG026-3	0.48	0.00	0.48	0.06	93.36	0.07	0.24	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	94.82
CG026-5	0.50	0.01	0.53	0.04	92.70	0.13	0.15	0.08	0.00	0.03	0.00	0.02	94.18
CG026-6	0.05	0.00	0.02	0.06	93.76	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	93.90
CG031-2	1.17	0.06	0.16	0.07	92.18	0.19	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	93.97
CG042-1	0.93	0.02	0.06	0.00	92.61	0.18	0.03	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	93.89
CG043-1	1.50	0.00	0.26	0.13	91.35	0.07	0.10	0.27	0.02	0.00	0.02	0.00	93.71
CG076-3	1.24	0.04	0.67	0.00	91.64	0.05	0.11	0.25	0.03	0.11	0.00	0.00	94.14
CG119-3	0.18	0.00	0.01	0.06	92.66	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	93.02
CG119-5	0.04	0.02	0.01	0.07	93.46	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	93.65
CG173-1	1.85	0.06	1.12	0.37	89.61	0.11	0.29	0.56	0.04	0.00	0.00	0.00	94.01
CG173-4	0.94	0.04	0.69	0.06	91.79	0.10	0.23	0.34	0.08	0.01	0.00	0.01	94.29
CG174-1	0.09	0.06	0.09	0.04	94.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	94.33
CG174-2	0.58	0.06	0.30	0.07	91.54	0.00	0.02	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	92.70
CG182-2	0.10	0.03	0.30	0.05	95.24	0.09	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	95.89
CG182-7	0.90	0.05	0.99	0.01	92.37	0.03	0.19	0.23	0.05	0.02	0.00	0.00	94.85
CG182-9	0.92	0.08	0.75	0.01	91.19	0.04	0.09	0.21	0.14	0.04	0.00	0.07	93.52
CG182-10	1.05	0.01	0.07	0.00	90.14	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	91.57
CG183-3	1.68	0.03	1.56	0.00	90.10	0.00	0.31	0.56	0.12	0.02	0.00	0.00	94.37
CG193-1	0.89	0.07	0.10	0.08	92.19	0.03	0.02	0.12	0.00	0.01	0.00	0.00	93.50
CG228-2	1.28	0.00	0.94	0.05	91.38	0.03	0.13	0.44	0.14	0.00	0.00	0.00	94.39
CG228-4	1.41	0.02	1.30	0.03	90.26	0.02	0.41	0.50	0.11	0.00	0.02	0.00	94.07
CG228-6	1.10	0.00	0.96	0.03	91.32	0.04	0.19	0.34	0.13	0.06	0.01	0.00	94.19
CG245-1	1.52	0.02	1.57	0.04	88.79	0.02	0.73	0.42	0.13	0.08	0.00	0.00	93.29
CG245-3	0.80	0.01	0.53	0.02	93.86	0.14	0.15	0.18	0.07	0.03	0.00	0.00	95.78
CG245-5	0.22	0.00	0.32	0.05	94.12	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	94.76
CG245-9	0.30	0.00	0.15	0.06	93.51	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	94.06
CG247-2	1.23	0.00	1.04	0.03	92.12	0.04	0.22	0.26	0.05	0.11	0.00	0.00	95.10
CG247-4	0.65	0.00	0.42	0.35	93.04	0.07	0.05	0.16	0.02	0.02	0.00	0.00	94.77
CG247-6	1.31	0.00	0.73	0.28	90.76	0.05	0.07	0.30	0.07	0.02	0.00	0.00	93.59
CG247-8	1.25	0.00	1.02	0.08	90.70	0.06	0.09	0.40	0.00	0.05	0.00	0.03	93.68
CG247-9	1.63	0.03	1.61	0.44	88.64	0.12	0.48	0.3	0.18	0.06	0.01	0.00	93.79

注：表中 FeO<sup>T</sup> 为全铁。

磁铁矿的化学成分表现出 Mg、Mn、Ca、Si 的含量相对较高,而 Al、Ti、Ni 的含量较低,与钙质矽卡岩型铁矿中的磁铁矿组成类似(徐国凤等,1979;真允庆等,1984;贾群子,1991)。

5 件赤铁矿电子探针分析结果见表 6,其主要成

分 FeO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 87.13%~92.56%,SiO<sub>2</sub> 含量 0.10%~1.21%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 0~0.24%,MnO 含量 0~0.03%,MgO 含量 0~0.20%,而 Ti、Cr、Ni、Ca、Na、K、P 等元素的含量很低,基本位于检测限以下。

表 6 查岗诺尔铁矿床赤铁矿电子探针分析结果

w<sub>B</sub>/%

Table 6 Electron microprobe analyses of representative hematite from the Chagangnuoer iron deposit

样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NiO	Total
CG182-1	1.21	0.01	0.01	0.03	87.13	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	88.44
CG182-3	0.10	0.00	0.24	0.04	92.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	92.95
CG182-6	1.04	0.01	0.00	0.00	89.23	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	90.33
CG182-8	0.14	0.00	0.00	0.02	91.12	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	91.32
CG182-10	1.05	0.01	0.07	0.00	90.14	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	91.57

注：表中 FeO<sup>T</sup> 为全铁。

查岗诺尔铁矿床中的磁铁矿与赤铁矿中,全铁(FeO<sup>T</sup>)含量与其他次要组分的关系见图 8,可见,FeO<sup>T</sup> 与 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO 均呈负相关。在 Ca

+Al+Mn vs Ti+V 图解(图 9),绝大多数的样品落入矽卡岩型铁矿的区域,而在磁铁矿的 TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 成因图解(图 10)中,大多数的样品落入沉积

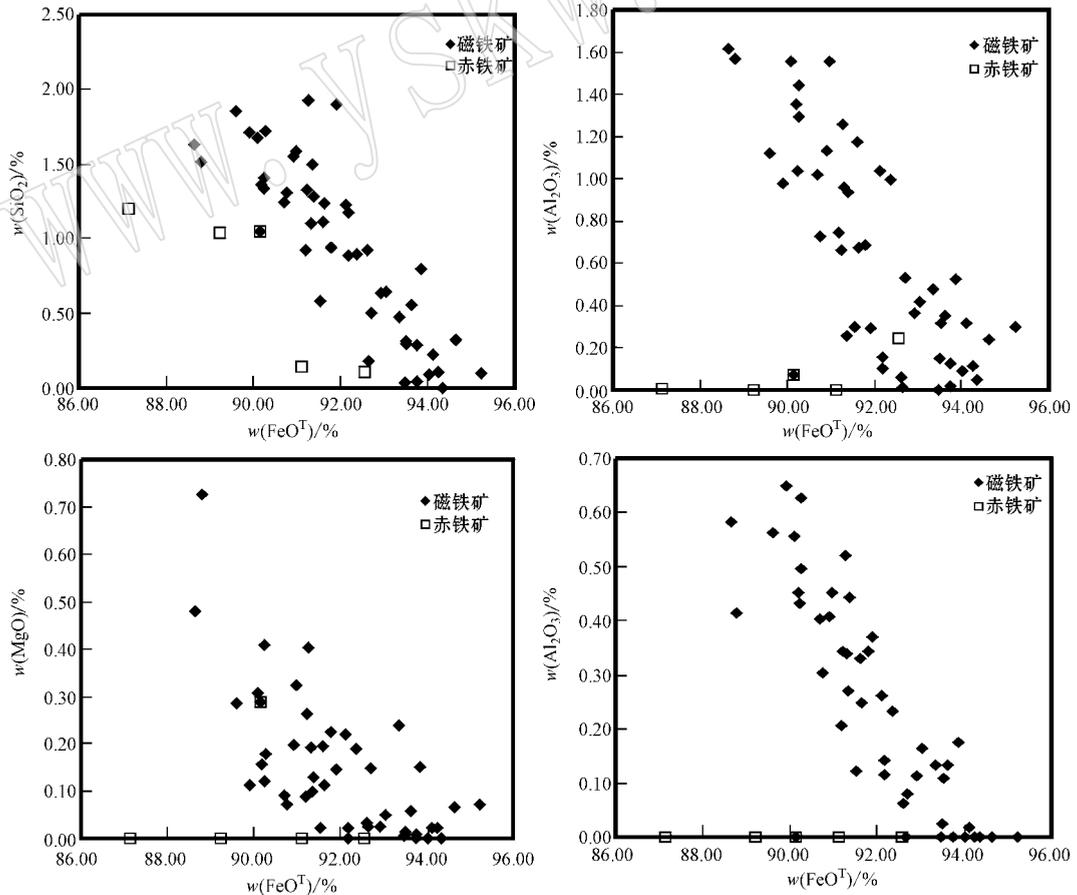


图 8 查岗诺尔铁矿床磁铁矿中氧化物相关图解

Fig. 8 Oxides relationship diagram of magnetite from the Chagangnuoer iron deposit

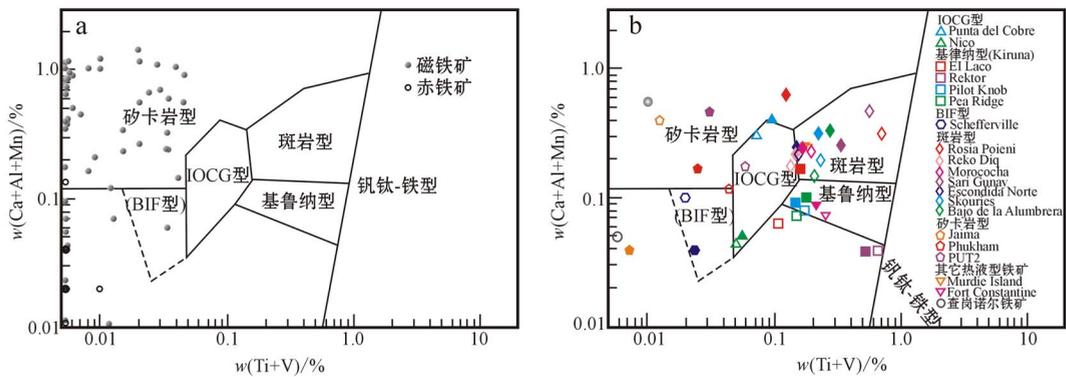


图 9 查岗诺尔的铁氧化物成分的  $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$  vs  $\text{Ti} + \text{V}$  图解(a)和世界不同成因类型铁矿的铁氧化物成分的平均组成  $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$  vs  $\text{Ti} + \text{V}$  图解(b)

Fig. 9 Fe-oxides from the Chagangnuoer iron ore deposit (a) and average compositions of Fe-oxides in various deposit types in the world (b)

实心符号代表磁铁矿,空心符号代表赤铁矿,底图和除查岗诺尔以外的数据均引自 Dupuis 和 Beaudoin(2011) magnetite (solid symbol) and hematite (hollow symbol), base map and other data from Dupuis & Beaudoin (2011)

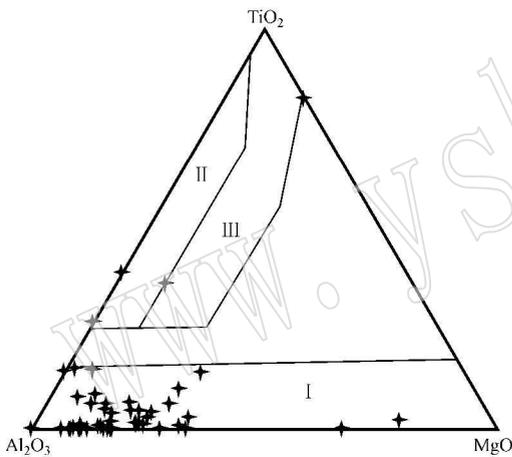


图 10 查岗诺尔铁矿磁铁矿  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$  成因图解(据陈光远,1987)

Fig. 10 Ternary plot of  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$  of magnetite from the Chagangnuoer iron deposit (modified from Chen Guangyuan, 1987)

I—沉积变质-接触交代区; II—超基性-基性-中性岩浆区; III—酸性-碱性岩浆区

I—sedimentary metamorphic-contact metasomatic region; II—ultramafic-mafic-intermediate magmatic region; III—acidic-alkali magmatic region

变质-接触交代磁铁矿趋势区,少部分落入基性-超基性磁铁矿的趋势区内。

## 4 讨论

### 4.1 砂卡岩形成机制

查岗诺尔铁矿以前的地质资料(冯金星等,

2010; 陈文革等, 2011; 汪邦耀等, 2011)均将石榴石化十分强烈的岩石称之为石榴石岩(石榴石含量  $> 80\%$ ), 阳起石化非常强烈的岩石称之为阳起石岩(阳起石含量  $> 80\%$ ), 石榴石化和阳起石化比较强烈的岩石称之为石榴石-阳起石岩或阳起石-石榴石岩(石榴石 + 阳起石  $> 80\%$ ), 本文也大致沿用了前人的这些岩石命名。但是通过对查岗诺尔铁矿典型的蚀变矿物进行电子探针分析研究, 发现石榴石的端员组分属于钙铁榴石-钙铝榴石系列(图 5), 辉石的端员组分属于透辉石-钙铁辉石系列(图 6), 另外该铁矿还发育方柱石、阳起石、绿帘石、绿泥石、钾长石、方解石等矿物, 且矿区产出透镜状大理岩, 这些矿物组合与 Einaudi 等(1982)、赵一鸣等(1990)所定义的钙质砂卡岩的矿物组成特征非常相似, 故笔者认为查岗诺尔铁矿发育以钙铁榴石-钙铝榴石、透辉石-钙铁辉石、方柱石、透辉石等矿物为代表的钙质砂卡岩, “石榴石岩”、“阳起石岩”、“石榴石-阳起石岩”等即为石榴石砂卡岩、阳起石砂卡岩、石榴石阳起石砂卡岩等, 而产于铁矿体之中发育的石榴石化、透辉石化、阳起石化、绿帘石化、绿泥石、钾长石化等蚀变, 从广义来说, 都属于砂卡岩化的范畴。

陈文革等(2011)认为“铁矿蚀变类型与砂卡岩化无关”, 其依据主要为矿体底部赋矿围岩中的透镜状大理岩与安山质碎屑岩没有交代关系, 也无特征蚀变和矿化现象。在平硐 PD3100(图 3a)中段的大理岩附近的确没有观察到石榴石化等蚀变, 但发育方柱石, 产出 5~10 cm 宽的方解石脉。而在上部

的平硐 PD3170 中段(图 3a)发育结晶较粗的石榴石化浸染状磁铁矿体(图 3i),在远离 PD3100 中段下方的 PD2930 中段(图 3a)发育钾长石化、绿帘石化、绿泥石化等蚀变(图 3l),这种矿体上部发育高温蚀变、下部发育中低温蚀变的分带现象,反映成矿热液活动的强度和方向。此外,蚀变带附近常发育层间裂隙或断裂,往往裂隙或断裂愈是发育的部位,石榴石化、阳起石化、钾长石化、绿帘石化、绿泥石化等蚀变愈是强烈,磁铁矿体也较为富集。所以,底盘大理岩附近不发育石榴石化等特征蚀变,或许与断裂或裂隙发育的强弱程度,或者是与成矿流体运移的强度和方向有关。这种现象不足以判定铁矿蚀变类型与矽卡岩化是否无关。

石榴石和辉石的组成可以反映矽卡岩体系的氧化还原状态,如以钙铁榴石为主的石榴石组分和以透辉石为主的辉石组分指示矽卡岩化处于氧化的成矿环境下(Einaudi *et al.*, 1981; Misra, 2000; Lu *et al.*, 2003),且氧逸度可能比较高。而变化较大的石榴石成分和辉石组分则显示成矿处于非完全封闭的平衡条件下(赵劲松等, 1996)。这些均与查岗诺尔铁矿体发育不同类型、不同走向的断裂构造的客观事实是一致的,也表明成矿流体可能是沿着裂隙与围岩发生交代作用,与新疆阿尔泰的蒙库铁矿的矽卡岩成矿机制有某种相似性(徐林刚等, 2007)。

#### 4.2 矽卡岩化与铁成矿

查岗诺尔铁矿的成因主要有以下几种观点:①多成因的火山岩型铁矿床(徐祖芳, 1984);②火山(喷气)沉积改造型矿床<sup>①</sup>(王庆明等, 2001);③矽卡岩型(田敬全等, 2009)矿床;④岩浆矿床(主要)和热液矿床(次要)的复合型矿床(冯金星等, 2010;

汪邦耀等, 2011)。这些认识或来自野外的地质调查,或来自岩石的地球化学特征,鲜有矿物学方面的研究。通过对石榴石和辉石的端员组分的分析,表明属于钙质矽卡岩的钙铁榴石-钙铝榴石系列、透辉石-钙铁辉石系列,将该铁矿发育的石榴石和辉石与世界主要的大型矽卡岩型铁矿的石榴石和辉石端员组分进行对比(图 7),显示出它们在这两种矽卡岩矿物成分组成上的相似性,而且与国内典型的矽卡岩型铁矿中产出的矽卡岩特征矿物亦具有一致性(赵斌等, 1982; 赵一鸣等, 1990; 徐林刚等, 2007; 周振华等, 2011; 张志欣等, 2011)。此外,该矿床中还发育类似于退蚀变作用的阳起石化、钾长石化、绿帘石化、绿泥石化、碳酸盐岩化、硅化等蚀变,这些蚀变矿物与磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿、黄铜矿密切共生,矿床发育的角砾状、豹纹状、条带状、浸染状、块状矿石均具有热液交代成矿的特点。因此,从矿物组合、围岩蚀变和矿石组构的特征来看,铁成矿与矽卡岩化关系密切。

不同成因类型的铁矿石中的磁铁矿成分组成具有标型特征(徐国凤等, 1979),磁铁矿中的  $TiO_2$ 、 $V_2O_5$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Cr_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $MnO$ 、 $CaO$  等化学组分有一定的成因指示意义(表 7)。查岗诺尔的磁铁矿中  $TiO_2$ 、 $Cr_2O_3$ 、 $NiO$  等的含量很低,与岩浆型矿床的差别较大,  $MgO$ 、 $MnO$ 、 $CaO$ 、 $Al_2O_3$  等含量与接触交代型、热液型矿床的含量相当。磁铁矿中的  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $CaO$  含量与全铁( $FeO^T$ )含量呈现负相关性(图 8),张志欣等(2011)认为  $FeO^T$  与  $SiO_2$ 、 $MgO$  这种负相关性表现出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。其实  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$  含量作为为硅铝矿物的指

表 7 不同成因类型铁矿床中磁铁矿的特征元素含量对比

Table 7 Comparison of representative elements in magnetite between different genetic types of iron deposits

	接触交代型			火山沉积变质型		火山沉积—热液叠加型			岩浆型		玢岩型	热液型	查岗诺尔
	邯郸	涞源	黄岗	鞍山	冀东	霍邱	潘田	阳山	攀枝花	冀北	宁芜	大顶	
$TiO_2$	0.08(76)	0.1(4)	0.04(29)	0.070(5)	0.10(21)	0.00(3)	0.0(11)	0.06(26)	12.83	5.43(13)	0.67(9)	0.2(11)	0.02(48)
$V_2O_5$	0.04(79)		0.3(12)	0.0(5)	0.00(21)	0.001(3)	0.00(11)	0.00(26)	0.6	0.85(13)	0.26(9)		
$Al_2O_3$	0.30(73)	(4)	0.24(29)	0.3(5)	0.23(10)	0.2(3)	0.5(11)	0.4(26)	4.53	1.51(12)		1.4(11)	0.64(48)
$Cr_2O_3$	<0.001			0.03(5)	0.00(19)	0.001(8)			0.02	0.52(13)			0.07(48)
$MgO$	1.36(73)	2.06(4)	0.11(29)	0.22(5)	0.14(10)	0.26(3)	0.3(11)	0.4(26)	2.2	1.46(13)	0.52(9)	1.8(11)	0.14(48)
$CaO$	0.30(87)	0.59(4)	1.03	0.59(5)	0.03(21)	0.30(3)	0.4(11)	1.1(26)			0.17(9)	0.4(11)	0.24(48)
$MnO$	0.31(68)		0.2(29)		0.04(20)	0.04(3)	1.6(11)	0.5(26)	0.51	0.11(13)		2.3(11)	0.05(48)

注:除查岗诺尔以外的矿点的资料来自于真允庆等(1984),含量值(%均为平均值,括号里面的数字为样品数。

标,常用来指示酸性环境,因此  $\text{FeO}^{\text{T}}$  与  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  的负相关性反映磁铁矿易于在中基性环境下形成,这与矽卡岩型铁矿的赋矿围岩常是中基性岩石的观点是一致的(Meinert, 1992)。另一方面这些组分与全铁( $\text{FeO}^{\text{T}}$ )含量呈现负增长的关系,可能是因为在成矿过程中,热液流体从地层或其他矿物中不断地萃取铁质,并使之聚集沉淀,导致磁铁矿纯度逐渐升高,而 Si、Al、Mg、Ca 等元素进入石榴石、阳起石、绿帘石和绿泥石等矿物之中。

Dupuis 和 Beaudoir(2011)对铁氧化物中微量元素的研究表明,  $\text{Ni} + \text{Cr} - \text{Si} + \text{Mg}$  图解能够区分含 Ni-Cu-PGE 型铁矿床,  $\text{Al}/(\text{Zn} + \text{Ca}) - \text{Cu}/(\text{Si} + \text{Ca})$  图解则能判别 VMS 型的铁矿床,而  $\text{Ni}/(\text{Cr} + \text{Mn}) - \text{Ti} + \text{V}$  或  $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn} - \text{Ti} + \text{V}$  则能很好区分铁氧化物-铜-金型(IOCG)、基鲁纳型(Kiruna)、斑岩型、矽卡岩型、BIF 型和钒钛-铁型的铁矿床。查岗诺尔磁铁矿和赤铁矿的  $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$  和  $\text{Ti} + \text{V}$  值大都落入矽卡岩型矿床的区域(图 9a)。由于 Ti、V 的含量较低(V 的平均值为  $45.36 \times 10^{-6}$ , 另文发表),使得一部分的数据十分靠近纵坐标轴,但是大多数的数据还是很好地投入了矽卡岩型矿床区域,在世界不同类型矿床的磁铁矿和赤铁矿的平均值  $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn} - \text{Ti} + \text{V}$  图解中(图 9b),查岗诺尔铁氧化物的平均组分也较好地落入矽卡岩型区域,暗示矽卡岩化对成矿有一定的贡献。而在磁铁矿的  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$  成因图解(图 10)中,大部分样品点落入沉积变质-接触交代磁铁矿趋势区,结合查岗诺尔矿区没有明显沉积变质成矿的特点,显示磁铁矿多数是接触交代作用所形成的。但也不排除少数磁铁矿由安山质岩浆分异结晶而来,正如很少的一部分数据分布在超基性-基性-中性岩浆趋势区。

查岗诺尔铁矿床底盘发育有透镜状的大理岩、含钙的石榴石和辉石以及其他常见的蚀变矿物,另一方面矿体几乎全部产在安山岩中,在大理岩附近仅有矿化、够不成矿体规模,所以该矿床的地质特征与典型的矽卡岩型矿床有较大的区别,尤其是矿体周围无明显矿化的岩体,这也是矿床成因存在较大分歧的重要原因。在矿区平面图上(图 1b),从右至左,蚀变分带依次为石榴石矽卡岩、石榴石-阳起石矽卡岩、铁矿体、阳起石-绿帘石矽卡岩,蚀变带的范围不仅比矿体的表面积大很多,而且这种分带也携带矿物生成温度逐渐降低的信息,因此猜测与岩体有关成矿热液流体可能是通过断裂从右侧运移到左

侧。在矿区地质图的右上方出露正长花岗岩,周围发育绿泥石化、绿帘石化蚀变却无矽卡岩化,少见磁铁矿化。另一方面,石榴石的三角图解表明(图 5),石榴石虽然属于钙铁石榴石-钙铝石榴石系列,然而纯的钙铁石榴石很少,大部分的石榴石中钙铁石榴石与钙铝石榴石成分相当,即 Al 的含量比一般钙质矽卡岩中石榴石的含量高, Gaspar 等(2008)认为钙铝石榴石或钙铁铝石榴石主要是受流体的扩散交代形成的,而钙铁石榴石则受岩浆流体的影响较大,再者,这些石榴石的 REE 配分曲线呈 HREE 富集、LREE 亏损、弱正 Eu 异常的左倾分布型式(另文发表),可能代表了受岩体影响非常微弱的石榴石 REE 曲线特征,表明成矿受到大气降水的影响,REE 和成矿物质主要来自围岩地层。简言之,虽然矿体与正长花岗岩体没有直接接触,但是笔者认为该矿床矽卡岩型的成矿受远源岩体(岩体较远)的影响较小,可能提供热源、热液流体及少量的成矿物质,而大部分的成矿物质可能是通过大气降水与岩浆热液的混合流体,在断裂或裂隙发育的部位,从大理岩和安山质地层萃取而来,发生扩散交代反应形成铁矿体及矽卡岩。矽卡岩化对成矿有较大的贡献,但并不排除其他成矿类型的可能性,如一些磁铁矿的 Ti、Mg、Ni 等微量元素含量较高,与岩浆分异结晶的磁铁矿比较接近。对于其他的矿化类型(如矿浆型),本文矿物学研究方面能够提供的信息有限,无法展开讨论。

## 5 结论

(1) 查岗诺尔铁矿床赋存于下石炭统大哈拉军山组安山质火山碎屑岩、凝灰岩之中,主体矿体底盘夹一个透镜状大理岩,矿体主要为层状、似层状、透镜状,受断裂构造控制明显,发育石榴石、透辉石、方柱石、阳起石、绿帘石、绿泥石、钾长石等蚀变矿物,是一个大型的磁铁矿床。

(2) 通过对石榴石和辉石的端员组分的研究,表明该铁矿床发育以钙铁石榴石-钙铝石榴石和透辉石-钙铁辉石为组合的钙质矽卡岩,磁铁矿中的氧化物组分及微量元素图解,均指示其形成与矽卡岩型铁矿具有相似性。铁矿化与矽卡岩化关系密切,暗示矽卡岩化对铁成矿有重要的贡献。

致谢 野外期间得到新疆地矿局第三地质大队和新疆和静县和合矿业有限公司的领导和职工给予

的支持和帮助,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陈晓丹硕士等的指导,在此表示衷心的感谢。

## References

Allen M B, Windley B F and Zhang Chi. 1992. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia [ J ]. *Tectonophysics*, 220 : 89~115.

Che Zicheng, Liu Liang, Liu Hongfu, *et al.* 1996. Review on the ancient Yili gift, Xinjiang, China [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3) : 478~490( in Chinese with English abstract ).

Chen Guangyuan. 1987. *Genetic and Prospecting Mineralogy* [ M ]. Chongqing : Chongqing Publishing House( in Chinese ).

Chen Wenge, Zhang Haijun and Liu Minfeng. 2011. Alteration of wall rock of ore body Fe I in Changanuoer iron deposit, Hejing county of Xinjiang [ J ]. *China Mining Magazine*, 20 : 145~150( in Chinese with English abstract ).

Dupuis C and Beaudoin G. 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types [ J ]. *Miner Deposita*, 46 : 319~335.

Einaudi M T and Burt D M. 1982. Introduction-terminology, classification, and composition of skarn deposits [ J ]. *Economic Geology*, 77 : 745~754.

Einaudi M T, Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits [ J ]. *Economic Geology*, 75th Anniv., 317~391.

Feng Jinxing, Shi Fupin, Wang Bangyao, *et al.* 2010. *Volcanic Iron Ore Deposits in Awulale Metallogenic Belt in Western Tianshan* [ M ]. Beijing : Geological Publishing House, 1~92( in Chinese ).

Gao Jun, Qian Qing, Long Lingli, *et al.* 2009. Accretionary orogenic process of Western Tianshan, China [ J ]. *Geological Bulletin of China*, 28(12) : 1 804~1 816( in Chinese with English abstract ).

Gao Jun, Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, *et al.* 1995. Preliminary research on the tectonostratigraphy in the Southwestern Tianshan Mountain [ J ]. *Journal of Stratigraphy*, 19(2) : 122~128( in Chinese with English abstract ).

Gaspar M, Knaack C, Meinert L D, *et al.* 2008. REE in skarn systems : a LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(1) : 185~205.

He Guoqi, Cheng Shoude, Xu Xin, *et al.* 2004. *An Introduction to the Explanatory Text the Map of Tectonics of Xinjiang and Its Neighbouring Area* [ M ]. Beijing : Geological Publishing House, 1~65( in Chinese with English abstract ).

Jia Qunzi. 1991. The origin of Tianhu iron deposit : evidence from the typomorphic characteristics of magnetite [ J ]. *Northwestern Geology*, 12(1) : 19~25( in Chinese ).

Jiang Changyi, Wu Wenkui, Xie Guangcheng, *et al.* 1993. Characteristics of Carboniferous volcanic rocks and the trench-arc basin system in the Northern part of west Tianshan Mountain [ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(4) : 289~300( in Chinese with English abstract ).

Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xuren, *et al.* 1995. The change from island arc to rift valley—Evidence from volcanic rocks in Awulale area [ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(3) : 224~231( in Chinese with English abstract ).

Li Jilei, Qian Qing, Gao Jun, *et al.* 2010. Geochemistry, zircon U-Pb ages and tectonics settings of the Dahalajunshan volcanics and granitic intrusions from the Adengtao area in southeast Zhaosu, western Tianshan Mountain [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10) : 2 913~2 924( in Chinese with English abstract ).

Li Jilei, Su Wen, Zhang Xi, *et al.* 2009. Zircon Cameca U-Pb dating and its significance for granulite-facies gneisses from the western Awulale Mountain, West Tianshan, China [ J ]. *Geological Bulletin of China*, 28(12) : 1 852~1 862( in Chinese with English abstract ).

Li Yongjun, Li Zhucang, Zhou Jibing, *et al.* 2009. Diversion of the Carboniferous lithostratigraphic units in Awulale area, western Tianshan [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6) : 1 332~1 340( in Chinese with English abstract ).

Li Zhucang, Li Yongjun, Li Jinghong, *et al.* 2006. Geochemical characteristics of the Dahalajunshan Formation volcanic rocks and their implications on the tectonic setting in Awulale area [ J ]. *Xinjiang Geology*, 24(2) : 120~124( in Chinese with English abstract ).

Liu Jing, Li Yongjun, Wang Xiaogang, *et al.* 2006. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Yishijilike Formation volcanic rocks in the Awulale area of western Tianshan [ J ]. *Xinjiang Geology*, 24(2) : 105~108( in Chinese with English abstract ).

Long Lingli, Gao Jun, Qian Qing, *et al.* 2008. Geochemical characteristics and tectonic setting of Carboniferous volcanic rocks from Yili region, western Tianshan [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4) : 699~710( in Chinese with English abstract ).

Lu Huangzhang, Liu Yimao, Wang Changlie, *et al.* 2003. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China [ J ]. *Economic Geology*, 98 : 955~974.

Meinert L D. 1992. Skarns and skarn deposits [ J ]. *Geoscience Canada*, 19 : 145~162.

Misra K C. 2000. *Understanding Mineral Deposit* [ M ]. Dordrecht, the Netherlands : Kluwer Academic Publishers.

Qian Qing, Gao Jun, Xiong Xianming, *et al.* 2006. Petrogenesis and tectonic setting of Carboniferous volcanic rocks from north Zhaosu, western Tianshan Mountains : constrains from petrology and geochemistry [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5) : 1 307~1 323( in Chinese with English abstract ).

Shao Tiequan, Shi Ying, Jin Hong, *et al.* 2006. Volcanic rock petrochemical characteristics of the Dahalajunshan Formation in the western Tianshan, Xinjiang and their geological significance [ J ]. *Xinjiang Geology*, 24(3) : 218~222( in Chinese with English abstract ).

Tian Jingquan, Hu Jingtao, Yi Xizheng, *et al.* 2009. Metallogenic condition and prospect of Changanuoer-Beizhan belt in Western Tianshan [ J ]. *West-China Exploration Engineering*, 8 : 88~91( in Chinese ).

Wang Bangyao, Hu Xiujun, Wang Jiangtao, *et al.* 2011. Geological

- characteristics and genesis of Chagangnuoer iron deposit in Western Tianshan, Xinjiang[ J ]. *Mineral Deposits*, 30(3): 385~402( in Chinese with English abstract ).
- Wang Qingming, Lin Zhuobin, Huang Cheng, *et al.* 2001. Metallogenic series and prospecting target of ore deposits at Chagangnuoer region of the Western Tianshan[ J ]. *Xinjiang Geology*, 19(4): 263~267( in Chinese with English abstract ).
- Xia Linqi, Zhang Guowei, Xia Zuchun, *et al.* 2002. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: Evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks[ J ]. *Geological Bulletin of China*, 21(2): 55~62( in Chinese with English abstract ).
- Xu Guofeng and Shao Jieliang. 1979. The typomorphic characteristics of magnetite and its significance[ J ]. *Geology and Prospecting*, 3: 30~37( in Chinese ).
- Xu Linggang, Mao Jingwen, Yang Fuquan, *et al.* 2007. Skarn mineral characteristics of Mengku iron deposit in Xinjiang and their geological significance[ J ]. *Mineral Deposits*, 26(4): 455~463( in Chinese with English abstract ).
- Xu Zufang. 1984. Petrogenetic study of the ore-bearing rock from main body of the Cha iron ore, Xinjiang[ J ]. *Xinjiang Geology*, 2(2): 30~47( in Chinese with English abstract ).
- Yang Jinzhong, Zhao Yuling, Wang Yongjiang, *et al.* 2003. Sedimentary environment and mineralization of Dabalajunshan Formation in West Tianshan orogenic belt, Xinjiang[ J ]. *Geology and Prospection*, 39(2): 1~5( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Zhixin, Yang Fuquan, Luo Wucang, *et al.* 2011. Skarn mineral characteristics of the Wutubulake iron deposit in Altay, Xinjiang, and their geological significance[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(2): 267~280( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Bin and Barton M D. 1987. Compositional characteristics of garnets and pyroxenes in contact metasomatic skarn deposits and their relations to mineralization[ J ]. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(1): 1~8( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Bin, Li Tongjin, Li Zhaoping, *et al.* 1982. A study on garnets from some skarn deposits in China[ J ]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2(4): 296~304( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Jingsong and Newberry R J. 1996. Novel knowledge on the origin and mineralization of skarn from Shizhuyuan[ J ]. *Acta Mineralogica Sinica*, 16(4): 442~449( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Yiming, Lin Wenwei, Bi Chengsi, *et al.* 1990. Skarn Deposits of China[ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 1~351( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Yiming, Zhang Yinan, Lin Wenwei, *et al.* 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 ).
- Zhen Yunqing, Ma Lihua and Li Zhongsheng. 1984. A probable correlation between the iron deposits of Anshan type and Hanxing typ[ J ]. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 27(4): 71~80( 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 metallogenic indicating significance[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(1): 97~112( in Chinese with English abstract ).
- Zhu Yongfeng, Zhang Lifei, Gu Libing, *et al.* 2005. SHRIMP geochronology and trace element geochemistry of Carboniferous volcanic rocks in the Western Tianshan area[ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2004~2014( in Chinese ).
- Zhu Yongfeng, Zhou Jing and Guo Xuan. 2006. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1341~1350( in Chinese with English abstract ).
- Zuo Guochao, Zhang Zuoheng, Wang Zhiliang, *et al.* 2008. Tectonic division, stratigraphical system and the evolution of Western Tianshan Mountains, Xinjiang[ J ]. *Geological Review*, 54(6): 731~751( in Chinese with English abstract ).

## 附中文参考文献

- 车自成, 刘良, 刘洪福, 等. 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.
- 陈文革, 张海军, 刘铭锋. 2011. 新疆和静县查岗诺尔铁矿 Fe 围岩蚀变特征[ J ]. *中国矿业*, 20(增刊): 145~150.
- 冯金星, 石福品, 汪邦耀, 等. 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, 1~92.
- 高俊, 钱青, 龙灵利, 等. 2009. 西天山的增生造山过程[ J ]. *地质通报*, 28(12): 1804~1816.
- 高俊, 肖序常, 汤耀庆, 等. 1995. 西南天山构造地层学初步研究[ J ]. *地层学杂志*, 19(2): 122~128.
- 何国琦, 成守德, 徐新, 等. 2004. 中国新疆及邻区大地构造图(1:2500000)说明书[ M ]. 北京: 地质出版社, 1~65.
- 贾群子. 1991. 从磁铁矿的标型特征论天湖铁矿的成因[ J ]. *西北地质*, 12(1): 19~25.
- 姜常义, 吴文奎, 谢广成, 等. 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, 等. 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.
- 李继磊, 钱青, 高俊, 等. 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.
- 李继磊, 苏文, 张喜, 等. 2009. 西天山阿吾拉勒西段麻粒岩相片麻岩锆石 Cameca U-Pb 年龄及其地质意义[ J ]. *地质通报*, 28(12): 1852~1862.
- 李永军, 李注仓, 周继兵, 等. 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, 等. 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 静,李永军,王小刚,等. 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,等. 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.
- 钱 青,高 俊,熊贤明,等. 2006. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的岩石地球化学特征、成因及形成环境[J]. 岩石学报, 22(5): 1307~1323.
- 邵铁全,石 莹,靳 红,等. 2006. 新疆西天山大哈拉军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,等. 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.
- 汪邦耀,胡秀军,王江涛,等. 2011. 西天山查岗诺尔铁矿床地质特征及矿床成因研究[J]. 矿床地质, 30(3): 385~402.
- 王庆明,林卓斌,黄 诚,等. 2001. 西天山查岗诺尔地区矿床成矿系列和找矿方向[J]. 新疆地质, 19(4): 263~267.
- 夏林圻,张国伟,夏祖春,等. 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.
- 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.
- 徐林刚,毛景文,杨富全,等. 2007. 新疆蒙库铁矿床矽卡岩矿物学特征及其意义[J]. 矿床地质, 26(4): 455~463.
- 徐祖芳. 1984. 新疆查铁矿主体矿赋矿岩石的成因探讨[J]. 新疆地质, 2(2): 30~47.
- 杨金中,赵玉灵,王永江,等. 2003. 新疆西天山大哈拉军山组的沉积环境与成矿的关系[J]. 地质与勘探, 39(2): 1~5.
- 张志欣,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): 276~280.
- 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与矿化的关系[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, 16(4): 442~449.
- 赵一鸣,林文蔚,毕承思,等. 1990. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京:地质出版社, 1~351.
- 赵一鸣,张铁男,林文蔚,等. 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.
- 真允庆,马丽华,李中生. 1984. 鞍山式铁矿与邯邢式铁矿的可能联系[J]. 武汉地质学院学报, 27(4): 71~80.
- 周振华,刘宏伟,常帼雄,等. 2011. 内蒙古黄岗铁矿床夕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.
- 朱永峰,张立飞,古丽冰,等. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究[J]. 科学通报, 50(18): 2004~2014.
- 朱永峰,周 晶,郭 璇. 2006. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22(5): 1341~1350.
- 左国朝,张作衡,王志良,等. 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): 731~751.