

新疆北山小常山铁矿矿物电子探针分析及矿床成因探讨

张 博^{1,2}, 吕新彪^{2,3}, 刘月高^{3,4}

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学 地质调查研究院, 湖北 武汉 430074; 4. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘 要: 小常山铁矿位于新疆北山裂谷带西段, 矿体赋存于辉长岩、辉长岩和大理岩接触带中, 部分赋存于花岗闪长岩和大理岩接触带。前人研究辉长岩年龄为 276 ± 1.2 Ma, 与坡北铜镍硫化物岩浆矿床形成年龄一致, 同属早二叠世。小常山铁矿中可见有明显的岩浆贯入现象。矿体主要呈透镜状、块状、脉状、薄层状。金属矿物主要为磁铁矿, 含极少量的褐铁矿和黄铁矿; 近矿围岩蚀变较弱, 主要有石榴子石化、绿帘石化、大理岩化。电子探针研究表明, 磁铁矿 FeO_T 含量范围较大, 主要分布在 85% 范围以上, Al_2O_3 含量相对较高, $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$ 图解、 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 图解均显示热液接触交代成因特点, 表明小常山铁矿的形成和岩浆热液的交代作用有关。石榴子石属于钙铝榴石-钙铁榴石系列, 与典型矽卡岩矿床的石榴子石端员组分组成有一定差别。结合小常山铁矿体地质特征以及电子探针分析测试等研究, 认为小常山铁矿是多成因的复合型矿床, 具有岩浆成因和热液成因特征, 但后者是主要成因。

关键词: 新疆北山; 小常山铁矿; 电子探针; 岩浆成因; 热液成因; 早二叠世

中图分类号: P575.1; P618.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)03-0517-14

Electron microprobe analysis of minerals and genesis of the Xiaochangshan iron deposit in Beishan area, Xinjiang

ZHANG Bo^{1,2}, LÜ Xin-biao^{2,3} and LIU Yue-gao^{3,4}

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education; School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China)

Abstract: Located in the west of the Beishan metallogenic belt in Xinjiang, the Xiaochangshan iron deposit is hosted in gabbro and the contact zone of the gabbro and marble. Parts of the orebodies are hosted in the contact zone of the granodiorite and the marble. Previous researchers hold that the age of gabbro in the mining area is (276 ± 1.2) Ma, similar to the age of gabbro in the Pobei copper-nickel-sulfide orebodies, so they both belong to Early Permian. The magma injection is an obvious phenomenon in the Xiaochangshan iron deposit. The orebodies occur as lenses, lumps, veins and thin layers. Metal minerals are mainly magnetite, with very little limonite

收稿日期: 2015-11-30; 接受日期: 2016-01-30

基金项目: 新疆地矿局重点研究项目(XGMB2012012); “十二五”国家科技支撑计划(国家 305 项目)(2011BAB06B04); 中国博士后科学基金(2015M582762XB)

作者简介: 张 博(1991-), 男, 博士研究生, 矿床学专业, E-mail: zhangbo5015@foxmail.com; 通讯作者: 吕新彪(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事矿床学、矿产普查与勘探研究, E-mail: luxb@cug.edu.cn。

and pyrite. The country rock alteration in the Xiaochangshan iron deposit is weak, comprising mainly garnetization, epidotization and marbleization. The electron microprobe analyses of magnetite show that the content of FeO_T in different iron ores has a large distribution range, and the content of Al_2O_3 is relatively higher. The ternary plot of $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$ and $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ suggest that the formation of the Xiaochangshan iron deposit was associated with hydrothermal metasomatism of magmatic-hydrothermal fluid. The electron microprobe analyses of garnet show that the garnets from the Xiaochangshan iron deposit belong to andradite-grossular solid solution series, somewhat different from things of the typical skarn deposits. Combining the geological characteristics of the Xiaochangshan iron deposit with the study of the electron microprobe analyses, the authors believe that the Xiaochangshan iron deposit belongs to the polygenetic and compound deposit with magnetic and hydrothermal genesis, with the latter factor probably playing the major role.

Key words: Beishan area, Xinjiang; Xiaochangshan iron deposit; electron microprobe; magmatic genesis; hydrothermal genesis; Early Permian

Fund support: Key Research Project of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources (XGMB2012012); State Program Supporting Science and Technology during Twelve Five-year Plan (2011BAB06B04); China's Science Foundation for Post-doctoral Research (2015M582762XB)

新疆北山成矿带位于罗布泊洼地北东侧,是我国重要的铁、铜、镍、金、磷、钒、铀、稀有金属、宝石成矿带,其中的坡北基性-超基性岩带又是新疆重要的铜镍成矿远景区之一(孙燕等,2009)。区内构造活动强烈,成矿条件优越,具有很好的找矿前景。目前新疆北山的成型矿床有磁海大型铁矿、红十井金矿、大青山金矿、白石滩金矿、八一泉金矿、坡十铜镍矿、石门铜矿、平梁子金矿等^①。小常山铁矿处于新疆北山成矿带之中,位于坡十镍矿北东约 18 km 处,是新疆地质矿产勘察开发局第六地质大队近年来新发现的矿床,目前进行的地质研究工作很少,研究程度很低,仅新疆地质六队进行过一定物探磁测面积的研究^②,目前对其矿床地质特征以及成因类型尚不清楚。本文在前人研究的基础上,通过野外宏观地质观察和室内岩矿石光薄片的研究,结合主要的矿石矿物磁铁矿和矽卡岩矿物石榴子石的电子探针分析,初步对矿床成因进行了探讨。这些研究对小常山铁矿进一步的深入研究以及勘查具有一定的指导意义。

1 区域地质背景

北山裂谷带属于塔里木陆壳板块内的次一级构

造单元(陈哲夫等,1981,1991;左国朝等,1990,2003),小常山铁矿工作区大地构造位置即位于北山裂谷带的西段,地处白地洼大断裂的南侧。北山裂谷带是在新疆塔里木板块基础上形成的一个晚古生代北东东向陆缘裂谷(张旺生,1992),内部断裂构造尤其是深大断裂十分发育,构造单元内褶皱构造、断裂构造、韧性剪切带发育(图1)。北山地区构造线方向呈北东向,构造格局受红十井大断裂和白地洼-淤泥河大断裂以及红柳河-依格孜塔格大断裂的联合控制,其中白地洼-淤泥河大断裂是其中最主要的一个,是区内重要的控矿构造,沿白地洼-淤泥河大断裂南侧分布一系列坡北基性-超基性杂岩体,其中形成的大型矿床有坡一镍矿、坡十铜镍矿等。小常山铁矿即位于坡一镍矿、坡十铜镍矿的北东向,沿白地洼-淤泥河大断裂南侧分布。

区域内出露的地层主要有古元古界北山群、中元古界古铜井群,下古生界寒武系双鹰山组、志留系土什布拉克组,上古生界石炭系红柳园组、石板山组、胜利泉组、干泉组和二叠系红柳河组、骆驼沟组,新生界古近系-新近系桃树园组、新近系苦泉组和第四系更新统、全新统松散堆积物(校培喜,2004)^③。北山群可划分为4个岩组:第1岩组为基性火山岩,第2岩组为中基性-中酸性火山碎屑岩组合,局部含

① 冯京,吕新彪,邓刚,等. 2012 新疆坡北铜镍矿成矿规律与富矿定位预测项目设计书.

② 新疆地质矿产勘察开发局第六地质大队. 2009. 新疆若羌县小常山铁矿一带物探工作设计书.

③ 校培喜. 2004. 笔架山幅 1:25 万区域地质调查(修测). 西安地质矿产研究所基础地质调查研究室.

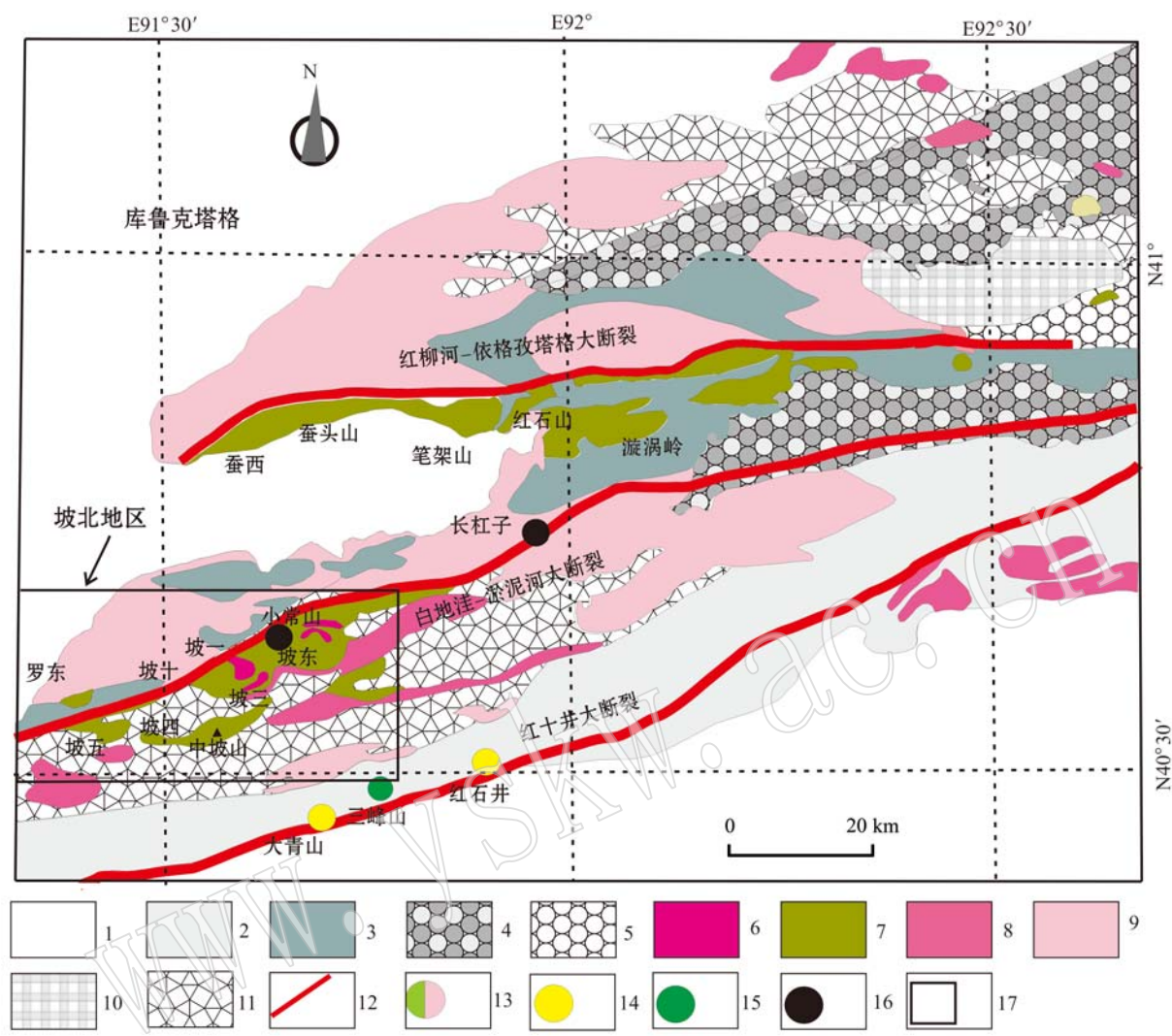


图 1 北山裂谷 1:200 000 区域地质图[据校培喜(2004)^①修改]

Fig.1 1:200 000 regional geological map of the Beishan rift valley(modified after Xiao Peixi, 2004)^①

- 1—第四系；2—下石炭统(主要为红柳园组)；3—石炭系；4—下二叠统；5—上二叠统；6—超基性岩；
7—基性岩；8—闪长岩；9—花岗岩；10—寒武系；11—中元古界与下元古界；12—断裂；13—铜镍矿；14—金矿；15—铜矿；
16—铁矿；17—坡北地区范围
- 1—Quaternary; 2—Lower carboniferous (mainly Hongliuyuan Formation); 3—Carboniferous; 4— Lower Permian; 5—Upper Permian; 6—ultra-
basic rocks; 7—basic rock; 8—diorite; 9—granite; 10—Cambrian; 11—Mesoproterozoic and Paleoproterozoic; 12—fault; 13—Cu-Ni deposit;
14—gold deposit; 15—copper ore deposit; 16—iron deposit; 17—Pobei area

凝灰质及硅质；第 3 岩组为中酸性火山碎屑岩-凝灰岩组合；第 4 岩组为火山沉积岩-硅铁质岩组合。古铜井岩群主要为黑云石英片岩、黑云母片岩，属于中、浅变质岩系。下古生界双鹰山组主要为灰岩、含炭灰岩，土什布拉克组主要为砂岩，属于陆源碎屑岩；上古生界为一套和陆源碎屑岩、火山碎屑岩有关

的沉积岩系。由于受到后期的岩体改造，地层均有一定程度的缺失(校培喜，2004)。

本区华力西期的岩浆活动十分频繁，二叠纪是最活跃的时期。侵入岩在本区十分发育，主要为基性-超基性岩，区域内有两条重要的基性-超基性岩带，一是笔架山基性-超基性岩带，红石山镍矿、漩涡

① 校培喜. 2004. 笔架山幅 1:25 万区域地质调查(修测). 西安地质矿产研究所基础地质调查研究室.

岭等铜镍矿分布其中;二是坡北基性-超基性岩带,坡一、坡十、坡东等铜镍矿以及小常山铁矿、长杠子铁矿均分布其中(Liu *et al.*, 2015, 2016)。本区的火山活动主要发生在晚古生代,主要发育有早石炭世红柳园组、晚石炭世石板山组、胜利泉组、干泉组和早二叠世红柳河组,根据火山岩的岩石组合、岩相组合以及分布特点,将北山地区火山活动划分为4个旋回,即红柳园旋回、石板山旋回、干泉旋回和印尼喀拉塔格旋回(肖渊甫等, 2004)。

前人对北山地区岩体年龄做过很多研究。姜常义等(2006)、李华芹等(2009)对坡十辉长岩进行过锆石 U-Pb 测年研究,结果分别为 274 ± 4 Ma 和 289 ± 13 Ma; Qin 等(2011)通过锆石 SIMS U-Pb 原位分析测得坡十辉长岩年龄为 284 ± 2.2 Ma;前人(苏本勋等, 2010; Su *et al.*, 2011, 2012)对红石山、漩渦岭、笔架山以及坡一岩体也进行了定年研究,测得年龄分别为 286、261、279 和 251 Ma。Liu 等(另文发表)测得的小常山铁矿含磁铁辉长岩年龄(276 ± 1.2 Ma)与上述年代学数据相近,表明小常山铁矿赋矿岩石与区域上其它主要基性-超基性岩体是同源岩浆演化的产物。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

小常山铁矿区出露的地层岩性主要为中元古界长城系白湖群上岩组的矽卡岩化大理岩、下岩组黑云母石英片岩、绿帘阳起片岩(图2)。上岩组矽卡岩化大理岩在矿区内零星分布,规模很小,主要呈条带状、近东西向分布于矿区西北部,均产于华力西晚期第一次侵入的辉长岩之中,大部分矽卡岩产在断裂带附近。下岩组黑云母石英片岩、绿帘阳起片岩主要分布于矿区西北部,规模较大,平面上主要呈楔状分布于华力西晚期第一次侵入的辉长岩和华力西中期第一次侵入的花岗岩之间。地层也分布在断裂 F₁ 附近,受到了断裂构造的影响。

矿区侵入岩发育,早二叠世辉长岩分布广泛,遍布全区,同时也是坡北地区主要分布的侵入岩和小常山铁矿的主要赋矿岩性。区内发育的一系列橄榄辉长岩呈扇状分布于辉长岩之中,部分受到断裂构造的影响发生了错动。华力西晚期花岗岩、肉红色花岗岩在矿区内均有分布,大型岩体主要分布于矿区北西侧和南东侧,其同样受到断裂构造的影响。

矿区内的脉岩主要有安山玢岩脉、花岗闪长岩脉,整体呈近南北向分布,规模不大。区内断裂构造十分发育,并具有多期活动的特点,小常山铁矿及 Fe1、Fe2、Fe3、Fe4、Fe5 等铁矿化点均沿断层构造分布。

2.2 矿体特征

小常山铁矿规模不大,但矿体数目较多,形态各异,主要有透镜状、块状、脉状、薄层状,主要产于辉长岩和大理岩的交界部位(图 3a、3b、4c),呈透镜状分布,各矿体规模大小不等,宽约 0.5~20 m,长约 10~50 m,主矿体倾向 335°,倾角 45°,大多数矿体和坡北与铜镍矿有关的岩体产状大致相同,矿石类型主要为块状磁铁矿,不紧邻辉长岩的大理岩缝隙中可见稠密浸染状的磁铁矿矿石。在大理岩中也有磁铁矿矿体产出(图 4a),可见有脉状的含磁铁矿花岗闪长岩以及近层状的花岗闪长岩产于大理岩之中(图 3c、4b)。磁铁矿体另一产出部位为大理岩与花岗闪长岩交界处(图 3d),此处产出的为薄层状的磁铁矿矿体,厚度 20~50 cm 不等。虽然此处的矿体厚度很小,但是延伸较长。小常山铁矿围岩蚀变种类较少,强度相对较弱,主要为石榴子石化、绿帘石化、大理岩化。绿帘石、石榴子石主要呈浸染状分布,绿帘石化、石榴子石化与磁铁矿紧密伴生。

2.3 矿石特征

小常山铁矿的矿石类型有块状(图 5a)、浸染状(图 5b)、薄层状和条带状矿石(图 5c)。块状矿石在矿区分布较多,主要位于主矿体 1 号采坑之中,磁铁矿含量在 80% 左右,磁铁矿颗粒多为中粗粒,呈自形-半自形(图 5d);浸染状矿石在矿区分布较少,常见于主矿体的边缘,磁铁矿含量范围在 30%~50% 之间,磁铁矿颗粒较块状矿石要小,多为中粒,亦多呈自形-半自形。条带状矿石主要产于大理岩中,厚度约 5~10 cm 不等,矿石由于接近地表,部分风化或受到雨水的淋滤氧化。薄层状的矿石分布较少,主要呈层状分布于大理岩与花岗闪长岩交界处,单层厚度较小,大多为 15~30 cm,具有热液交代作用的特征。

矿石结构主要为半自形粒状结构和交代结构,矿石构造主要为块状构造、浸染状构造。磁铁矿是小常山铁矿矿石中最主要的金属矿物,含有极少量的褐铁矿、赤铁矿以及黄铁矿。脉石矿物主要为斜长石、单斜辉石、斜方辉石、方解石、角闪石,蚀变矿物主要有石榴子石、绿帘石(图 6a~6e)。

磁铁矿作为小常山铁矿最主要的金属矿物,主

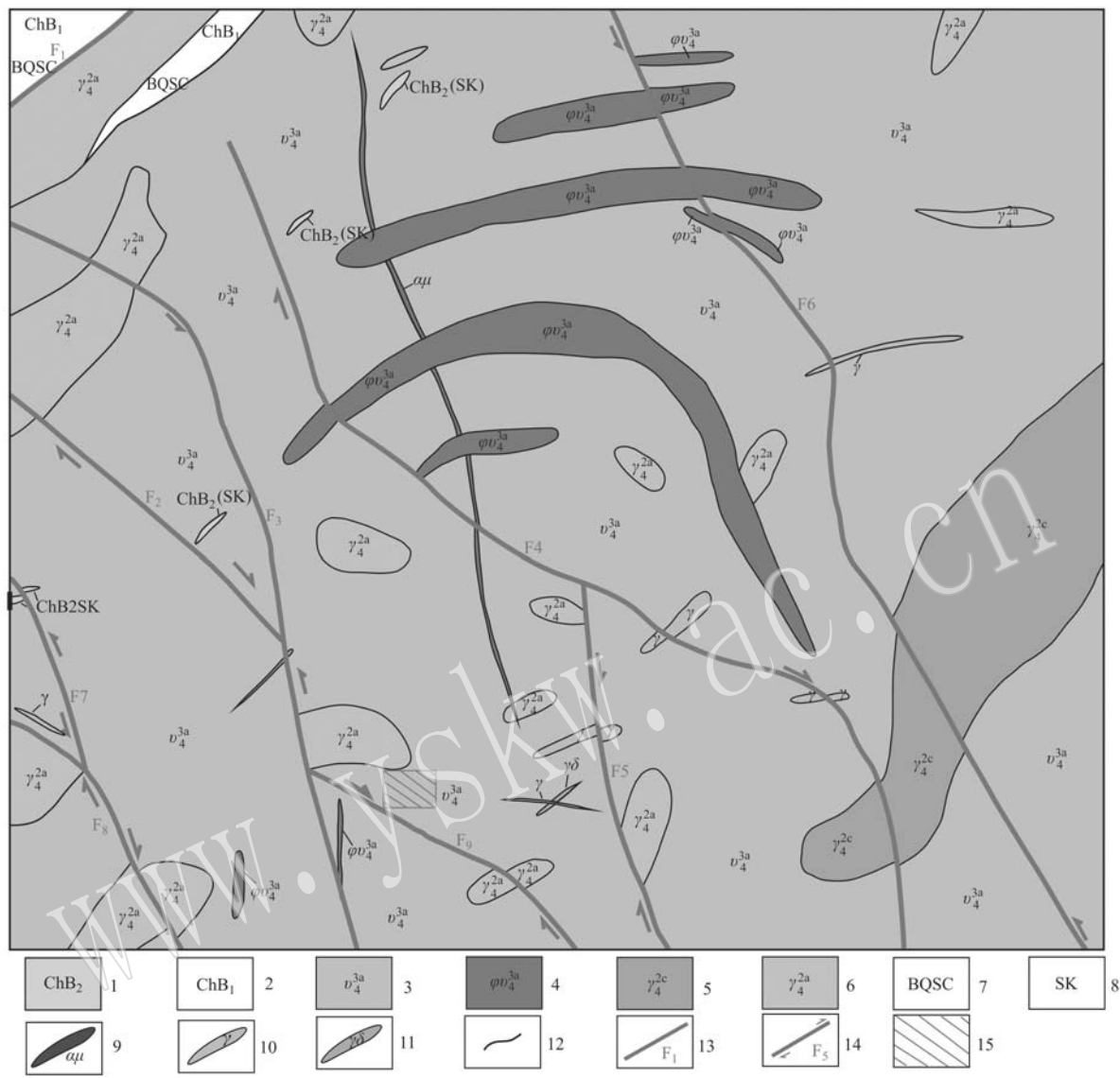


图 2 新疆北山地区小常山铁矿地质图(底图据新疆地矿局第六地质大队, 2009)^①

Fig. 2 Geological map of the Xiaochangshan iron deposit, Beishan area, Xinjiang (modified after No. 6 Geological Party of Xinjiang Bureau of Geology and Mining, 2009)^①

1—中元古界白湖群砂卡岩; 2—中元古界白湖群下岩组黑云母石英片岩; 3—华力西期辉长岩; 4—华力西期橄榄辉长岩; 5—华力西期肉红色花岗岩; 6—华力西期花岗岩; 7—黑云母石英片岩; 8—砂卡岩; 9—安山玢岩脉; 10—花岗岩脉; 11—花岗闪长岩脉; 12—地质界线; 13—性质不明断层及编号; 14—平移断层及编号; 15—小常山铁矿

1—skarn of Mesoproterozoic Baihu Group; 2—biotite-quartz schist of Mesoproterozoic Baihu Group; 3—gabbro of Variscan; 4—olivine gabbro of Variscan; 5—fleshy red granite of Variscan; 6—granite of Variscan; 7—biotite-quartz schist; 8—skarn; 9—andesitic porphyrite dykes; 10—granite dykes; 11—granodiorite dykes; 12—geological boundary; 13—unknown fault and its serial number; 14—strike-slip fault and its serial number; 15—Xiaochangshan iron deposit

要呈半自形粒状, 多与石榴子石、绿帘石等硅酸盐矿物共生(图 6f), 具有热液交代的特点。可见普通辉石边缘发育角闪石, 他形磁铁矿分布于普通辉石内

部和角闪石边缘, 具有岩浆结晶分异的特点(图 6g)。另可见磁铁矿被辉石包裹。磁铁矿具有不同特征, 部分表面可见有 1 组或 3 组的裂纹, 部分表面可见

① 新疆地质矿产勘察开发局第六地质大队. 2009. 新疆若羌县小常山铁矿一带物探工作设计书.

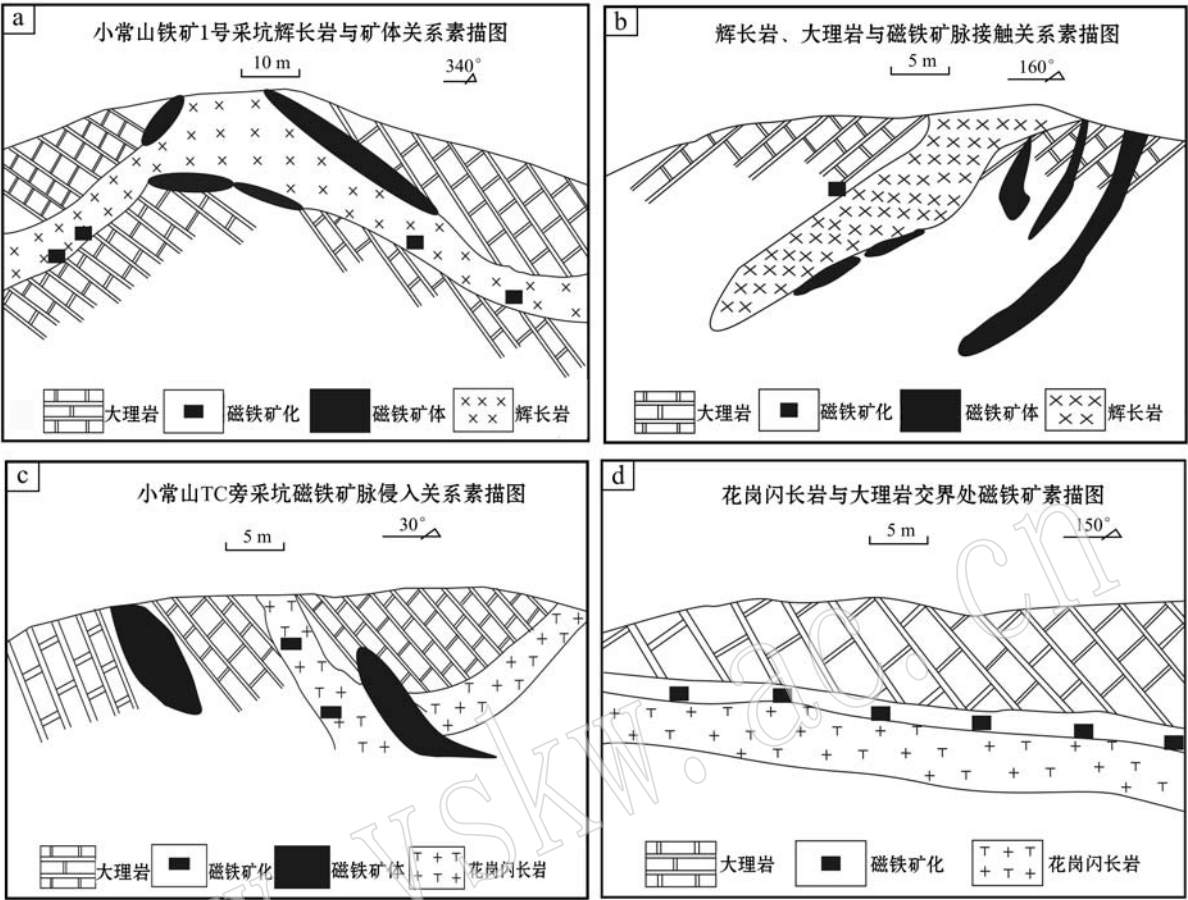


图 3 小常山铁矿矿体特征素描图

Fig. 3 Sketches of geological characteristics of the Xiaochangshan iron deposit



图 4 小常山铁矿矿体野外产出照片

Fig. 4 Field photos of orebodies in the Xiaochangshan iron deposit

a—磁铁矿脉产于大理岩中; b—磁铁矿产于大理岩与近层状花岗闪长岩交界处; c—大型磁铁矿脉产于大理岩与辉长岩接触带
a—magnetite vein in marble; b—magnetite orebody in the contact zone of the layered granodiorite and marble; c—large magnetite vein in the contact zone of the gabbro and marble

大量麻点。部分磁铁矿由于接近地表受到了风化作用以及雨水的淋滤氧化而变成褐铁矿。

方解石多呈半自形粒状分布, 粒径约 0.25 ~

0.75 mm, 蚀变很弱, 常充填至石榴子石间隙(图 6f)。另可见磁铁矿呈脉状穿插方解石, 构成脉状穿插结构。

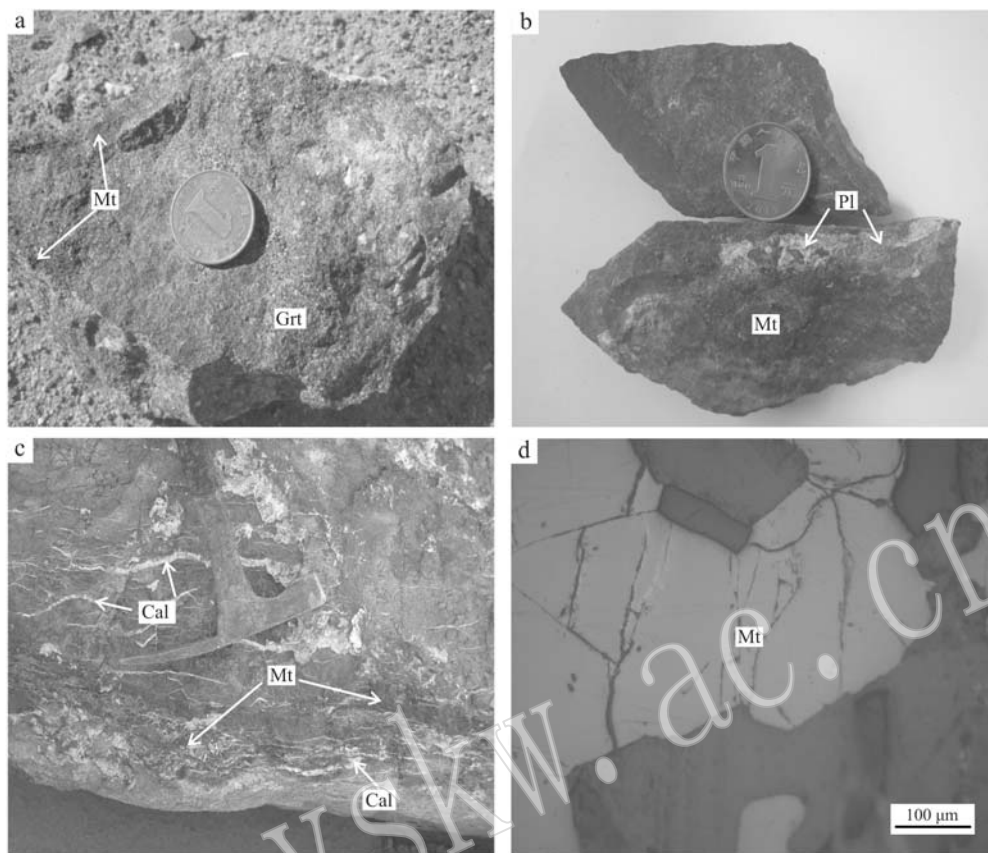


图5 小常山铁矿矿石特征

Fig. 5 Characteristics of ores from the Xiaochangshan iron deposit

a—块状磁铁矿石, 伴随有石榴子石化; b—浸染状磁铁矿石; c—大理岩中条带状磁铁矿石, 矿石中充填方解石脉; d—半自形粒状磁铁矿(反射光); Mt—磁铁矿; Grt—石榴子石; Pl—斜长石; Cal—方解石

a—dense massive iron ore associated with garnetization; b—disseminated iron ore; c—banded iron ore in marble, calcite filling the iron; d—hypidiomorphic-granular magnetite (under reflected light); Mt—magnetite; Grt—garnet; Pl—plagioclase; Cal—calcite

透辉石主要呈半自形粒状, 粒径约 0.2~0.5 mm, 含量较少, 多和石榴子石、方解石共生(图 6d)。

石榴子石作为主要的蚀变矿物, 呈褐色, 半自形粒状, 粒径约 0.13~0.76 mm, 部分呈集合体形态产出, 少数石榴子石发生了碳酸盐化, 石榴子石常与磁铁矿和绿帘石共生, 由于区域上构造作用强烈, 石榴子石受到应力作用普遍产生了碎裂(图 6d、6f)。

绿帘石主要产在大理岩中, 呈半自形-他形粒状, 粒径约 0.1~0.3 mm, 和石榴子石化关系密切, 主要分布于石榴子石和方解石边部, 部分充填于石榴子石粒间, 少数呈集合体分布, 在石榴子石的边部和内部发生了轻微的交代作用(图 6f)。

3 分析及测试结果

3.1 样品位置

本文测试样品均采自小常山铁矿, 块状矿石和

浸染状磁铁矿石采自小常山铁矿 1 号采坑中, 细脉状矿石采自矿区大理岩和花岗闪长岩交界部位层状磁铁矿矿体, 其余岩石均采自小常山铁矿区。在进行电子探针分析前期, 将所采样品磨制成探针片、光片在室内进行了光学显微镜观察, 在此基础上选取了样品中的典型矿物进行了电子探针的测试分析。

电子探针测试分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室电子探针实验室完成, 所用仪器型号为 JXA-8100, 磁铁矿测试加速电压为 20 kV, 其余矿物为 15 kV, 电流为 20 nA, 束斑直径为 5 μm。

3.2 测试结果

3.2.1 磁铁矿

样品中磁铁矿的电子探针测试数据见表 1。分析数据显示, 矿石中磁铁矿的 FeO_T (表 1 中已经将 FeO_T 转化为 FeO 和 Fe_2O_3) 含量为 73.66%~90.51%,

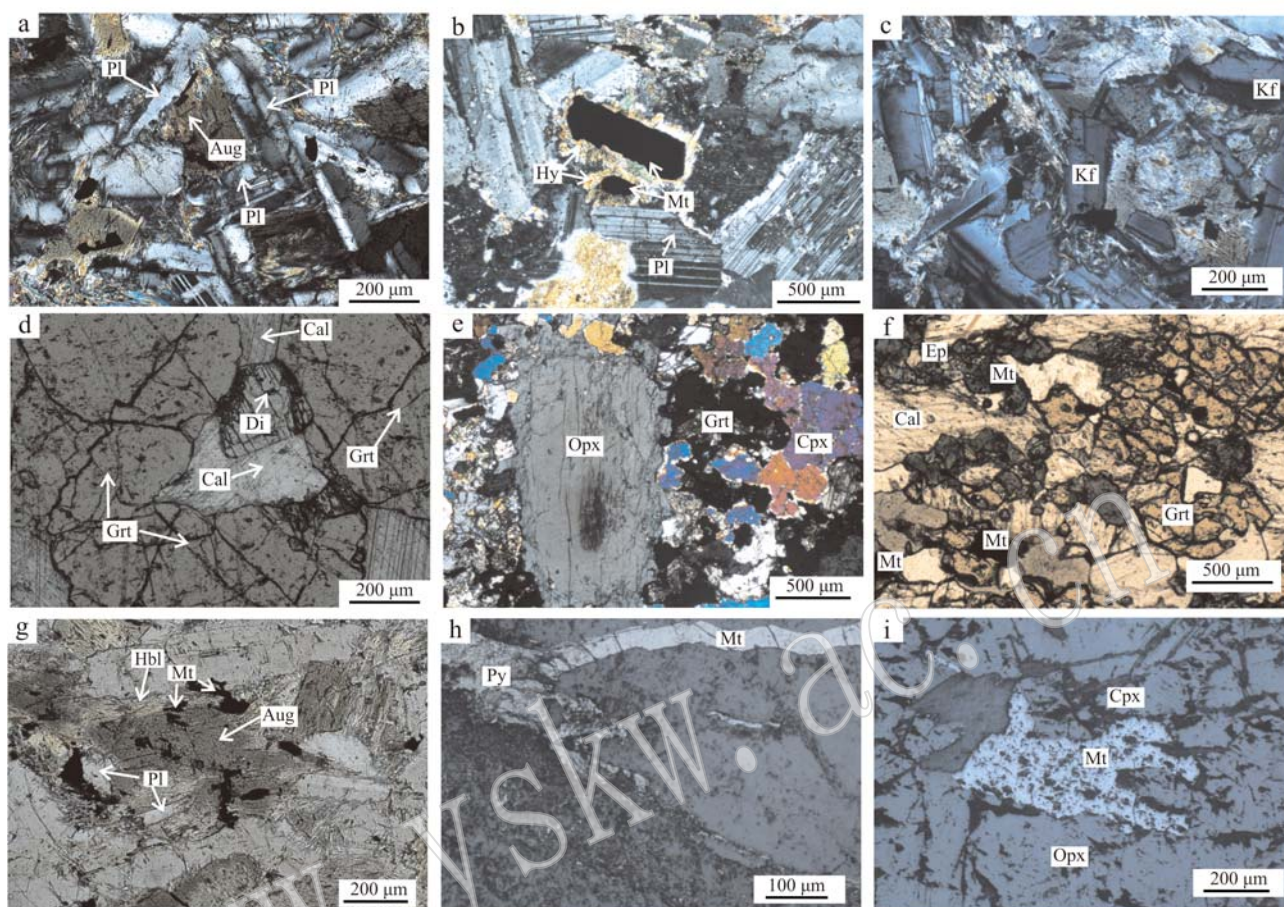


图 6 小常山铁矿的主要矿物组成及其特征

Fig. 6 Composition and characteristics of main minerals in the Xiaochangshan iron deposit

a—辉长岩中普通辉石和斜长石,岩石为辉绿结构(正交偏光); b—辉长岩中环绕磁铁矿周围分布有他形的斜方辉石(正交偏光); c—围岩中钾长石,表面蚀变较弱(正交偏光); d—他形石榴子石包裹透辉石和方解石(单偏光); e—发育有环带的斜方辉石(正交偏光); f—围岩中磁铁矿与石榴子石、绿帘石、方解石共生,石榴子石呈集合体分布,绿帘石呈他形粒状(单偏光); g—普通辉石边缘发育角闪石,他形磁铁矿分布于普通辉石内部和边缘(单偏光); h—脉状磁铁矿与他形黄铁矿共生(反射光); i—磁铁矿被斜方辉石和单斜辉石包裹(反射光); Mt—磁铁矿; Py—黄铁矿; Grt—石榴子石; Di—透辉石; Ep—绿帘石; Pl—斜长石; Aug—普通辉石; Hy—紫苏辉石; Kf—钾长石; Cal—方解石; Opx—斜方辉石; Cpx—单斜辉石; Hbl—普通角闪石

a—augite and plagioclase in gabbro, which is of ophitic texture (crossed nicols); b—anhydrous orthopyroxene distributed around the magnetite in the gabbro (crossed nicols); c—slightly altered K-feldspar in wall rock (crossed nicols); d—anhydrous garnets wrapping diopside and calcite (plainlight); e—zoned orthopyroxene (crossed nicols); f—magnetite associated with garnet, epidote, calcite in wall rock, garnet distributed as aggregate, epidotes are granular and anhedral (plainlight); g—hornblende distributed around the augite, anhedral magnetite at the edge and in the interior of hornblende (plainlight); h—veined magnetite associated with anhydrous pyrite (under reflected light); i—orthopyroxene and clinopyroxene wrapping magnetite (under reflected light); Mt—magnetite; Py—pyrite; Grt—garnet; Di—diopside; Ep—epidote; Pl—plagioclase; Aug—augite; Hy—hypersthene; Kf—K-feldspar; Cal—calcite; Opx—orthopyroxene; Cpx—clinopyroxene; Hbl—hornblende

平均值为 81.41%; SiO_2 的含量为 0~0.12%, 平均含量为 0.085%; Na_2O 的含量为 0~0.11%, 平均含量为 0.03%; TiO_2 含量为 0~1.48%, 平均值为 0.56%; MgO 含量为 0~0.69%, 平均值为 0.45%; Al_2O_3 含量为 0.02%~10.93%, 平均含量为 4.62%,

具有 Al_2O_3 含量高的特点; MnO 含量为 0.1%~7.75%, 平均值为 4.67%; CaO 的含量为 0~0.42%, 平均值为 0.05%; V_2O_5 的含量为 0~0.02%, 平均含量为 0.01%; Cr_2O_3 的含量为 0~0.04%, 平均值为 0.01%。

Table 1 Electron microprobe analyses of magnetite from the Xiaochangshan iron deposit

	块状磁铁矿						浸染状磁铁矿						脉状磁铁矿					
	XCS- G1-1	XCS- G1-2	XCS- G2-1	XCS- G3-1	XCS- G4-1	XCS G5-1	XCS- G6-1	XCS- G6-2	XCS- G7-1	XCS- G7-2	XCS- G8-1	XCS G8-2	XCS- G9-1	XCS- G9-2	XCS- G10-1	XCS- G10-2	XCS- G10-3	XCS- G11-1
SiO ₂	0.04	0.06	0.01	0.00	0.02	0.04	0.02	0.03	0.07	0.03	0.06	0.05	0.48	0.22	0.05	0.04	0.12	0.03
TiO ₂	0.00	0.42	0.39	0.77	0.82	0.79	0.39	0.38	0.45	1.48	1.35	1.38	0.03	0.02	0.00	0.43	0.46	0.46
Al ₂ O ₃	0.02	4.19	4.32	6.15	5.80	5.69	4.20	4.24	4.45	10.93	9.84	10.07	0.75	0.41	0.32	4.11	3.59	4.16
FeO _T	90.51	81.97	81.62	79.25	79.91	78.91	81.39	81.49	81.54	73.66	74.97	73.93	86.15	87.08	87.01	82.08	82.18	81.67
FeO	48.26	45.42	45.30	44.51	44.73	44.40	45.22	45.26	45.27	42.65	43.08	42.74	46.81	47.12	47.10	45.45	45.49	45.32
Fe ₂ O ₃	46.95	40.63	40.37	38.61	39.10	38.36	40.20	40.27	40.31	34.47	35.44	34.67	43.72	44.41	44.36	40.71	40.78	40.40
MnO	0.10	4.76	4.78	5.95	5.33	5.89	4.69	4.87	4.93	7.75	6.97	7.28	2.53	2.21	2.26	4.68	4.43	4.61
MgO	0.00	0.62	0.47	0.53	0.56	0.48	0.32	0.43	0.61	0.43	0.51	0.55	0.34	0.28	0.13	0.59	0.50	0.69
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.33	0.09	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.01	0.03	0.00	0.05	0.00	0.11	0.04	0.01	0.01	0.03	0.05	0.05	0.00	0.01	0.00	0.04	0.05	0.02
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02
ZnO	0.01	0.05	0.05	0.06	0.07	0.02	0.11	0.07	0.02	0.07	0.05	0.02	0.02	0.00	0.00	0.05	0.05	0.03
V ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
NiO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.05
Total	95.42	96.20	95.69	96.66	96.47	95.80	95.24	95.58	96.14	97.84	97.39	96.82	95.13	95.03	94.34	96.14	95.52	95.79

根据小常山铁矿磁铁矿的电子探针数据,将其部分氧化物之间关系用相关图解表示(图 7)。可见各类矿石中全铁 FeO_T 含量分布范围较大,含量主要分布在 85% 范围以上,而其它氧化物 MgO 、 CaO 、 SiO_2 则较低,并且变化范围也不大; Al_2O_3 的含量偏高,整体上比其它氧化物的含量要高,主要集中在 4% ~ 5%,最高含量超过了 10%,浸染状矿石

Al_2O_3 最高含量达到了 10.93%,平均含量达到了 7.29%,远高于其它次要氧化物的平均含量;块状矿石和细脉状矿石中 Al_2O_3 含量也较高,平均含量分别为 4.36% 和 2.22%。全铁含量 FeO_T 与 CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 、 SiO_2 整体上为负相关关系,其中 Al_2O_3 、 MgO 与 FeO_T 之间的负相关关系最为明显。图中 3 类矿石的 FeO_T 与 Al_2O_3 含量均显示出很好的负相关关系。

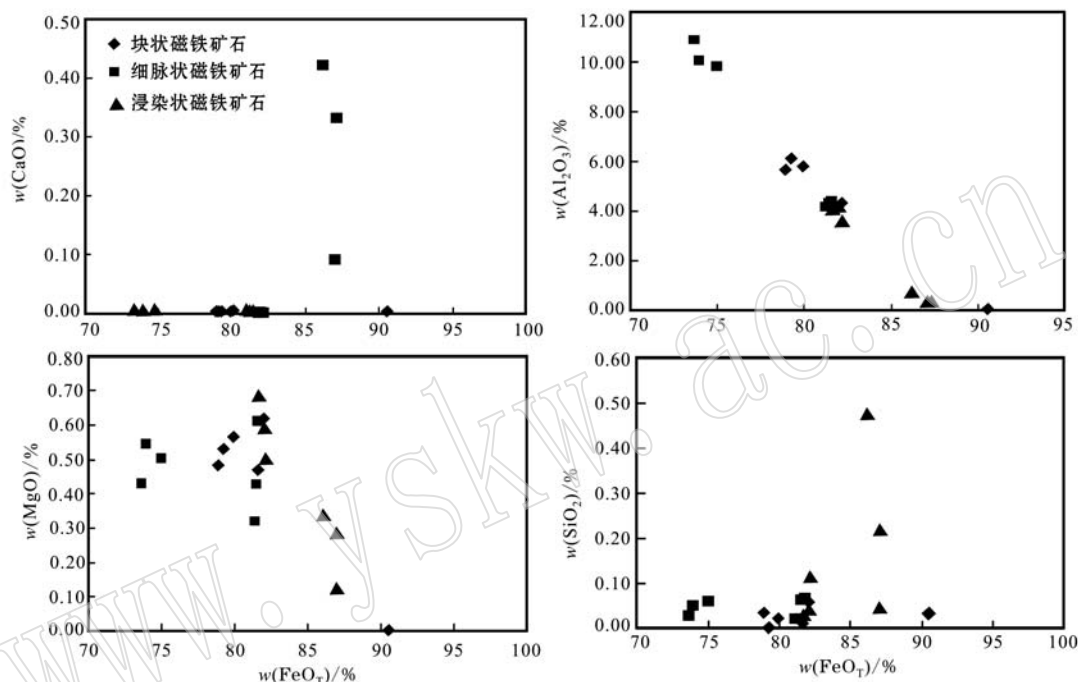


图 7 小常山铁矿磁铁矿中氧化物相关图解

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

3.2.2 石榴子石

小常山铁石榴子石的电子探针数据见表 2。数据显示,含磁铁矿石石榴子石大理岩中钙铝榴石(Gro)端员组分变化范围为 68.98% ~ 82.69%,平均为 74.66%;其次为钙铁榴石(And),端员组分变化范围较大,为 4.87% ~ 21.01%,平均值 13.77%;铁铝榴石(Alm)端员组分范围为 8.21% ~ 11.4%,平均值为 9.23%。镁铝榴石(Pyr)和锰铝榴石(Spe)端员组分含量低,范围分别在 0.47% ~ 1.39% 和 0.81% ~ 1.57%,平均值分别为 1.13% 和 1.39%;钙铬榴石(Ura)含量更低,尚未达到 0.1%。含磁铁矿石石榴子石大理岩中的石榴子石属于钙铝榴石-钙铁榴石系列(图 8)。铁矿石中钙铝榴石(Gro)端员组分变化范围为 65.61% ~ 66.79%,平均为 66.26%;其次为钙铁榴石(And),端员组分变化范围为

20.04% ~ 23.76%,平均值 21.96%;铁铝榴石(Alm)端员组分范围为 6.38% ~ 7.82%,平均值为 7.08%。锰铝榴石(Spe)和镁铝榴石(Pyr)端员组分含量范围分别在 3.04% ~ 3.84% 和 0.75% ~ 1.49%,平均值分别为 3.53% 和 1.77%;钙铬榴石(Ura)含量亦尚未达到 0.1%。

4 讨论

4.1 热液接触交代的证据

林师整(1982)曾分析了 3 000 多个磁铁矿化学成分数据,经过整理分析,制作了 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$ 磁铁矿成因三角图解,并将磁铁矿类型成因分为副矿物型、岩浆型、火山岩型(玢岩型)、接触交代热液型、矽卡岩型和沉积变质型 6 种。在 $\text{TiO}_2 -$

表 2 小常山铁矿石石榴子石电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 2 Electron microprobe analyses of garnet from the Xiaochangshan iron deposit

	含铁矿石石榴子石大理岩中的石榴子石					铁矿石中的石榴子石			
	XCS-B11-1	XCS-B11-2	XCS-B12-1	XCS-B13-1	XCS-B14-1	XCS-G1	XCS-G2	XCS-G7	XCS-G10
Na ₂ O	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01	0.02	0.01	0.05	0.03
SiO ₂	39.12	39.19	39.06	38.57	39.00	38.62	38.33	38.44	38.41
FeO	10.02	10.03	6.95	10.79	6.17	10.04	10.00	10.48	10.50
TiO ₂	0.72	0.68	0.62	0.61	0.99	0.66	0.60	0.62	0.62
CaO	32.96	32.77	1.60	32.57	32.88	31.57	31.71	32.23	32.08
MgO	0.37	0.35	0.36	0.12	0.31	0.39	0.32	0.32	0.19
Al ₂ O ₃	15.84	16.19	18.75	16.04	18.16	16.10	15.99	16.20	16.30
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00
MnO	0.56	0.55	0.73	0.37	0.56	1.77	1.71	1.39	1.59
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
NiO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
ZnO	0.00	0.06	0.07	0.02	0.02	0.09	0.02	0.09	0.02
Total	99.59	99.82	98.16	99.13	98.10	99.29	98.71	99.83	99.75
Na	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Si	3.04	3.04	3.05	3.01	3.04	3.02	3.01	2.98	2.99
Ti	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04
Ca	2.74	2.72	2.64	2.73	2.75	2.64	2.67	2.68	2.67
Mg	0.04	0.04	0.04	0.01	0.04	0.05	0.04	0.04	0.02
Al	1.45	1.48	1.73	1.48	1.67	1.48	1.48	1.48	1.49
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.04	0.04	0.05	0.02	0.04	0.12	0.11	0.09	0.10
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.26	0.28	0.35	0.27	0.28	0.24	0.22	0.20	0.21
Fe ³⁺	0.39	0.37	0.10	0.43	0.13	0.41	0.44	0.49	0.47
Ura	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00
Gro	70.28	70.66	80.77	68.89	82.69	66.79	66.75	65.61	65.89
And	18.92	17.98	4.87	21.01	6.09	20.05	21.11	23.76	22.92
Pyr	1.39	1.30	1.34	0.47	1.16	1.49	1.23	1.22	0.75
Alm	8.21	8.85	11.40	8.82	8.87	7.82	7.17	6.38	6.96
Spe	1.21	1.18	1.57	0.81	1.19	3.84	3.75	3.04	3.48

Al₂O₃-(MgO+MnO)三角图(图 9)中,小常山铁矿石中的磁铁矿主要属于接触交代热液型,个别样品属于矽卡岩型。从矿石类型来看,小常山铁矿的块状矿石和浸染状矿石主要属于接触交代热液型,而细脉状的磁铁矿主要属于矽卡岩型。

陈光远(1987)通过对磁铁矿单矿物的化学成分数据分析建立了磁铁矿的 TiO₂-Al₂O₃-MgO 成因图解,将磁铁矿的成因类型划分为 3 类:沉积-变质交代型、超基性-基性-中性岩浆型、酸性-碱性岩浆型。在 TiO₂-Al₂O₃-MgO 三角投图(图 10)中,小常山铁矿块状磁铁矿、浸染状磁铁矿、细脉状磁铁矿全部分布于沉积-变质交代区,和图 9 所得结果基本吻合,说明小常山铁矿磁铁矿的形成主要是受到了接触交代热液作用的影响。

在图 9 中,浸染状磁铁矿主要落在接触交代热液区域,少部分点落在矽卡岩区域,块状磁铁矿基本都落在接触交代热液区,个别点落在矽卡岩区,说明小常山铁矿磁铁矿主要是由接触交代热液作用形成的,接触交代热液作用对成矿有重要影响;落在矽卡岩区域的磁铁矿可能是受到了分布于铁矿区内围岩大理岩和花岗闪长岩的影响,这也和野外观察到的接触关系现象相吻合。细脉状的磁铁矿基本都落在矽卡岩区,个别点落在矽卡岩区和接触交代热液区的交界部位,也说明了磁铁矿样品经过了热液的接触交代作用。同时细脉状的磁铁矿采自矿区内大理岩与花岗闪长岩的交界部位,符合矽卡岩矿床的特征,指示出矽卡岩化对成矿的作用。

徐国凤等(1979)通过研究不同成因类型磁铁矿

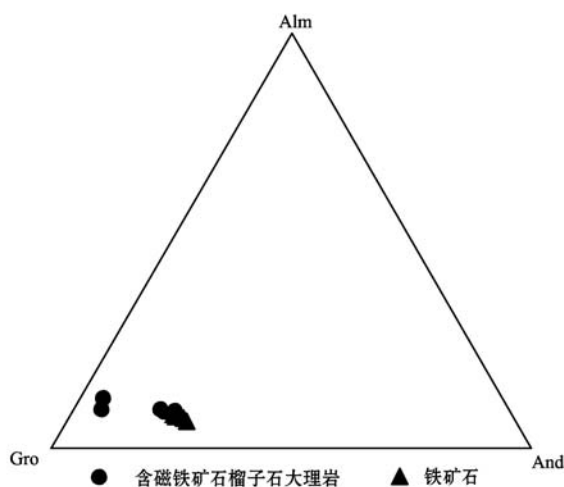


图 8 小常山铁矿石石榴子石端员组分图解

Fig. 8 End members of garnets from the Xiaochangshan iron deposit

Alm—铁铝榴石; Gro—钙铝榴石; And—钙铁榴石

Alm—almandite; Gro—grossular; And—andradite

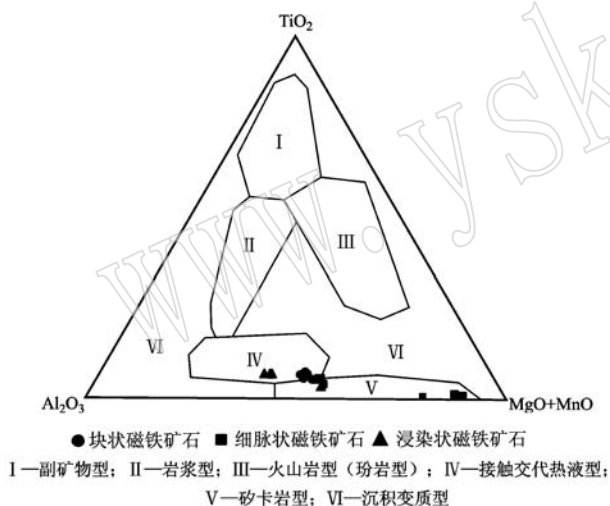


图 9 小常山铁矿磁铁矿 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$ 成因图解 (据林师整, 1982)

Fig. 9 Triangular diagram of $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$ of magnetite from the Xiaochangshan iron deposit (modified after Lin Shizheng, 1982)

矿床中磁铁矿的化学成分, 根据磁铁矿的标型化学组分特征将矿床分为 4 种不同的成因类型: 接触交代矿床、热液交代矿床、岩浆矿床和区域变质矿床。根据徐国凤等(1979)的研究, 铁矿中磁铁矿的 TiO_2 、 MgO 、 CaO 等的组分特征对判别铁矿床类型具有指示意义。典型的岩浆矿床的 TiO_2 含量普遍较高, 高钛的铁矿石可达 3.55% ~ 21.72%, 平均含量达到

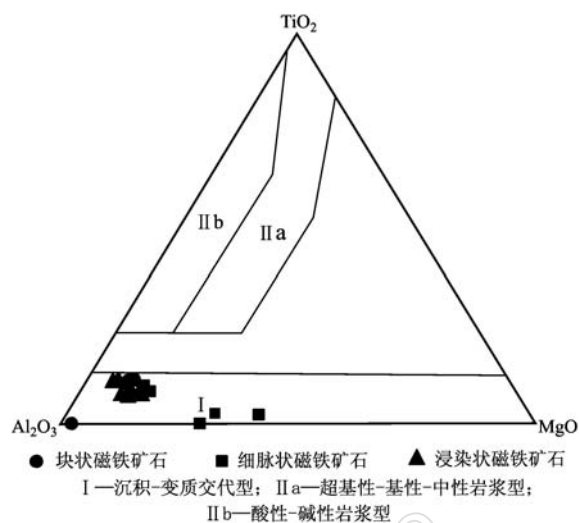


图 10 小常山铁矿磁铁矿 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 成因图解 (据陈光远, 1987)

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

10.22%, 但是 V_2O_5 含量可以达到 0.78%, TiO_2 在接触交代矿床中为 0.07% ~ 0.4%, 平均为 0.183%, MgO 、 MnO 含量可以较高, TiO_2 含量在热液交代矿床为 0.88% ~ 0.107%, MgO 、 Al_2O_3 可以较高, MnO 较低, 区域变质矿床中 TiO_2 含量则比较低, 为 0 ~ 1.2%, 平均值为 0.0887%。小常山铁矿中磁铁矿的 TiO_2 含量为 0 ~ 1.48%, 平均值为 0.56%, 其中块状矿石和浸染状矿石的 TiO_2 含量较高, 平均值分别为 0.53% 和 0.90%, 而细脉状矿石 TiO_2 含量较低, 平均值为 0.23%, 属于徐国凤等(1979)的热液交代矿床中 TiO_2 含量变化的范围。小常山铁矿中磁铁矿的 TiO_2 含量整体上属于接触交代矿床和热液交代矿床的范畴。

根据区域资料并结合野外地质观察和室内研究, 认为小常山铁矿的矽卡岩矿物如石榴子石是岩浆热液交代围岩产生的。在石榴子石端员组分图解中, 小常山铁矿的石榴子石端员组分为钙铝榴石—钙铁榴石系列, 且钙铝榴石的含量要明显高于钙铁榴石, 含磁铁矿石石榴子石大理岩中石榴子石要比铁矿石中石榴子石更富铝, 这种特征与其它典型的矽卡岩型矿床如蒙库铁矿(徐林刚等, 2007)、鄂东南程潮铁矿(姚磊等, 2012)、大兴安岭地区矽卡岩型铁矿床(朱钟秀等, 1989)有一定差别, 这些铁矿床中石榴子石主要为钙铁榴石—钙铝榴石系列, 这也说明了小

常山铁矿不是典型的矽卡岩型矿床,只是受到了热液交代的影响生成了矽卡岩矿物。

4.2 与岩浆矿床亲缘性的证据

小常山铁矿区小型断裂和裂隙十分发育,根据野外实地观察,小常山铁矿有明显的岩浆贯入现象,岩浆贯入到大理岩与辉长岩交界部位,符合岩浆矿床的一般特点。小常山铁矿赋矿辉长岩锆石 U-Pb 同位素年龄为 276 ± 1.2 Ma,属于早二叠世,与坡北地区坡一、坡十铜镍矿、笔架山红石山等区域上主要镁铁超镁铁岩体形成于同一时代,表明它们是同时期岩浆活动的产物。

5 结论

(1) 小常山铁矿主要赋存于二叠系辉长岩以及辉长岩与大理岩接触带之中,也有产于大理岩与花岗闪长岩接触带中,矿体主要呈透镜状、块状、薄层状。矿区内未见典型矽卡岩,围岩蚀变主要为石榴子石化、绿帘石化和大理岩化。矿石矿物主要为磁铁矿,含有极少量的褐铁矿和黄铁矿。脉石矿物有辉石、长石、角闪石、方解石、橄榄石、绿帘石、石榴子石。矿石结构主要为半自形粒状结构、包含结构、网状结构,矿石构造主要有块状构造、稀疏浸染状构造。

(2) 小常山铁矿磁铁矿具有热液交代成因的特点,显示小常山铁矿的形成和岩浆热液交代有很大关系。小常山铁石榴子石主要属于钙铝榴石-钙铁榴石系列,与传统意义上的矽卡岩矿床石榴子石组成有一定差别。

(3) 小常山铁矿是多成因的,既有岩浆作用参与成矿,也有热液接触交代作用参与成矿,是岩浆-热液过渡型矿床,但后者可能是主体成因,对成矿的贡献更大。

致谢 野外工作中得到了新疆地质矿产勘察开发局第六地质大队的大力支持和帮助,在此表示诚挚的感谢!

References

Chen Guangyuan. 1987. Genetic Mineralogy and Mineralogy of Ore Prospecting[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1~874(in Chinese).

Chen Zhefu and Liang Yunhai. 1981. Discussion on the geological structural characteristics of the Kuruktag-Mazongshan area and the problem about its attribution of tectonic units[J]. Geological Review, 27(4): 292~300(in Chinese with English abstract).

Chen Zhefu and Liang Yunhai. 1991. Polycyclic tectogenesis and plate movement of Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 9(2): 95~107(in Chinese with English abstract).

Jiang Changyi, Cheng Songlin, Ye Shufeng, et al. 2006. Lithogeochemistry and petrogenesis of Zhongposhanbei mafic rock body, at Beishan region, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 115~126(in Chinese with English abstract).

Li Huaqin, Mei Yuping, Qu Wenjun, et al. 2009. SHRIMP zircon U-Pb and Re-Os dating of No. 10 intrusive body and associated ores in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and its significance[J]. Mineral Deposits, 28(5): 633~642(in Chinese with English abstract).

Lin Shizheng. 1982. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 3: 166~174(in Chinese with English abstract).

Liu Yuegao, Lü Xinbiao, Wu Chunming, et al. 2016. The migration of Tarim plume magma toward the northeast in Early Permian and its significance for the exploration of PGE-Cu-Ni magmatic sulfide deposits in Xinjiang, NW China: As suggested by Sr-Nd-Hf isotopes, sedimentology and geophysical data[J]. Ore Geology Reviews, 72: 538~545.

Liu Yuegao, Lü Xinbiao, Yang Longshuai, et al. 2015. Metallogeny of the Poyi magmatic Cu-Ni deposit: revelation from the contrast of PGE and olivine composition with other Cu-Ni sulfide deposits in the Early Permian, Xinjiang, China[J]. Geosciences Journal, 1~8.

Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, et al. 2011. SIMS Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume[J]. American Journal of Science, 311: 237~260.

Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, et al. 2011. U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in southern Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications and evidence for an Early-Permian mantle plume[J]. Gondwana Research, 20: 516~531.

Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, et al. 2012. Geochronologic-petrochemical studies of the Hongshishan mafic-ultramafic intrusion. Beishan

- area, Xinjiang (NW China): Petrogenesis and tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 54: 270~289.
- Su B X, Qin K Z, Sun H, *et al.* 2010. Geochronological petrological mineralogical and geochemical studies of the Xuanwoling mafic-ultramafic intrusion in Beishan area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11: 3 283~3 294(in Chinese with English abstract).
- Sun Yan, Xiao Yuanfu, Wang Daoyong, *et al.* 2009. The characteristics and the metallogenic future of the Pobei mafic-ultramafic complex in the Beishan area, XinjianChina[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 4: 402~408(in Chinese with English abstract).
- Xu Guofeng and Shao Jielian. 1979. Typomorphism and the significance of the magnetite[J]. *Geology and Prospecting*, 3: 30~37(in Chinese).
- Xu Lingang, Mao Jingwen, Yang Fuquan, *et al.* 2007. Skarn characteristics of Mengku iron deposits in Xinjiang, and itsgeological significance[J]. *Mineral Deposits*, 26(4): 455~463(in Chinese with English abstract).
- Xiao Yuanfu, Wang Daoyong, Deng Jianghong, *et al.* 2004. Volcanism during activity period of Beishan craton rift in Xinjiang, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 4: 331~337(in Chinese with English abstract).
- Yao Lei, Xie Guiqing, Zhang Chengshuai, *et al.* 2012. Mineral characteristics of skarns in the Chengchao large-scale Fe deposit of southeastern Hubei Province and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 133~146(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wangsheng. 1992. Geotectonics and evolution characteristics of Beishan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 10(2): 129~137(in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhongxiu and Li Xuping. 1989. The mineralogy study of garnet from skarn iron ore in area of Greater Khingan Mountains[J]. *Global Geology*, 8(1): 15~19(in Chinese).
- Zuo Guochao, Zhang Shuling, He Guoqi, *et al.* 1990. Early Paleozoic plate tectonics in Beishan aera[J]. *Chinese Journal of Geology*, 4: 305~314, 411(in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Liu Yike and Liu Chunyan. 2003. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan aera across Gansu province, Xinjiang Autonomous Region and Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Acta Geologica Gansu*, 12(1): 1~15(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈光远. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1~874.
- 陈哲夫, 梁云海. 1981. 库鲁克塔格-马宗山地质构造特征及其构造单元归属问题的讨论[J]. *地质论评*, 27(4): 292~300.
- 陈哲夫, 梁云海. 1991. 新疆多旋回构造与板块运动[J]. *新疆地质*, 9(2): 95~107.
- 姜常义, 程松林, 叶书锋, 等. 2006. 新疆北山地区中坡山北镁铁质岩体岩石地球化学与岩石成因[J]. *岩石学报*, 22(1): 115~126.
- 林师整. 1982. 磁铁矿物化学、成因及演化的探讨[J]. *矿物学报*, 3: 166~174.
- 李华芹, 梅玉萍, 屈文俊, 等. 2009. 新疆坡北基性-超基性岩带 10 号岩体 SHRIMP U-Pb 和矿石 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. *矿床地质*, 28(5): 633~642.
- 苏本勋, 秦克章, 孙 赫, 等. 2010. 新疆北山地区旋窝岭镁铁-超镁铁岩体的年代学、岩石矿物学和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 26(11): 3 283~3 294.
- 孙 燕, 肖渊甫, 王道永, 等. 2009. 新疆北山坡北基性超基性杂岩特征及成矿远景[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 33(4): 402~408.
- 肖渊甫, 王道永, 邓江红, 等. 2004. 新疆北山晚古生代克拉通裂谷火山作用特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 31(4): 331~337.
- 徐国风, 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.
- 姚 磊, 谢桂青, 张承帅, 等. 2012. 鄂东南矿集区程潮大型矽卡岩铁矿的矿物学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 28(1): 133~146.
- 张旺生. 1992. 新疆北山大地构造属性及演化特征[J]. *新疆地质*, 10(2): 129~137.
- 朱钟秀, 李旭平. 1989. 大兴安岭地区矽卡岩铁矿石石榴石的矿物学研究[J]. *世界地质*, 8(1): 15~19.
- 左国朝, 刘文科, 刘春燕. 2003. 甘新蒙北山地区构造格局及演化[J]. *甘肃地质学报*, 12(1): 1~15.
- 左国朝, 张淑玲, 何国琦, 等. 1990. 北山地区早古生代板块构造特征[J]. *地球科学*, 4: 305~314, 411.