

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

张志欣¹ 杨富全¹ 罗五仓² 刘 锋¹ 柴凤梅³ 吕书君⁴ 欧阳刘进² 姜丽萍²

(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开放实验室 北京 100037;
2. 陕西省地质矿产勘查开发局 第六地质队, 陕西 西安 710611; 3. 新疆大学 地质与勘查工程学院,
新疆 乌鲁木齐 830046; 4. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 乌吐布拉克中型铁矿床赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组变质火山-沉积岩系中, 矿体呈似层状、透镜状, 矿体及其周围发育大量矽卡岩矿物。电子探针分析表明石榴石端员组分为钙铁榴石-钙铝榴石系列为主, 辉石端员组分为透辉石为主, 角闪石端员组分为铁镁钙闪石, 这些特点表明矿区矽卡岩为交代矽卡岩中的钙矽卡岩。磁铁矿的主要组分、稀土及微量元素表明其形成与矽卡岩密切相关。结合矿床地质特征, 认为矽卡岩是由岩浆热液流体交代康布铁堡组基性火山岩(熔岩和火山碎屑岩)及灰岩而形成的, 磁铁矿的形成与矽卡岩的退化变质作用有关。

关键词: 铁矿床, 矽卡岩, 电子探针分析, 磁铁矿, 乌吐布拉克, 阿尔泰

中图分类号: P588.31⁺2; P618.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)02-0267-14

Skarn mineral characteristics of the Wutubulake iron deposit in Altay, Xinjiang, and their geological significance

ZHANG Zhi-xin¹, YANG Fu-quan¹, LUO Wu-cang², LIU Feng¹, CHAI Feng-mei³, LÜ Shu-jun⁴,
OUYANG Liu-jin² and JIANG Li-ping²

(1. MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. No. 6 Geological Party of Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Xi'an 710611, China; 3. College of Geology & Prospecting Engineering Program, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 4. Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The medium-sized Wutubulake iron deposit in the eastern extension of the Altay ore belt within Xinjiang is hosted in the metamorphosed volcanoclastic-sedimentary sequence of the Upper Silurian-Lower Devonian Kangbutiebao Formation. The ore bodies in the ore deposit occur as stratoids or lenses, surrounded by skarn minerals. Skarn minerals include garnet, clinopyroxene, scapolite, albite, actinolite, epidote, chlorite, apatite etc. whereas ore minerals are mainly magnetite, with minor pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite, molybdenite etc. Field evidence and petrographic observation indicate four stages of metallogenesis, i. e., prograde stage, retrograde stage, sulfide stage and supergene stage. Electron microprobe analyses show that the end member of garnet is mainly andradite, with the calculated end number dominated by andradite (And: 72.89% ~ 84.09%, 78.44% on average), followed by almandite (Alm: 8.23% ~ 12.86%) and grossularite (Gro: 3.47% ~ 14.97%), both of which are less than 20%. The composition of pyroxene is mainly diopside, with a small amount of augite. The end member of diopside is dominated by wollastonite (Wo: 43.48% ~ 45.84%), followed by en-

收稿日期: 2010-11-02; 修订日期: 2010-11-26

基金项目: “十一·五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B02-01); 国家自然科学基金资助项目(40672065); 国土资源大调查项目(1212010786006, 1212010786004)

作者简介: 张志欣(1984-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: ddzhangzhixin@163.com

statite (En: 27.02% ~ 34.14%) and ferrosilite (Fs: 18.72% ~ 25.56%). The amphiboles show insignificant compositional variation, mostly being ferrotschermakite. The composition of these skarn minerals suggest that skarn in the Wutubulake iron deposit is calcic skarn, belonging to metasomatic skarn. The epidote is rich in Al and Ca but poor in Fe and Ti, indicating that Fe and Ti were separated out at the same time of the formation of epidote. Electron microprobe analyses show that the composition of magnetite is mainly FeO^{T} (91.17% ~ 93.63%), and most magnetite has similar chondrite-normalized rare earth element distribution patterns and is enriched in light rare earth elements, with an obvious Eu positive anomaly, which is similar to the rare earth element distribution patterns of skarns in this area. The Ni/Co values of magnetite range from 0.15 to 4.29, but most of them are lower than 1.0. All of these characteristics suggest that the formation of magnetite was closely related to the skarns. The above mineralogical characteristics are similar to things of minerals in typical metasomatic skarn iron deposits, implying that the Wutubulake iron deposit is a metasomatic skarn iron deposit. In combination with the geological characteristics, the authors hold that the skarns might have resulted from hydrothermal interaction with metamorphic volcanic and carbonate beds and lenses, and the formation of magnetite was related to the retrogressive metamorphism of the skarns.

Key words: iron deposit; skarn; electron microprobe analysis; magnetite; Wutubulake; Altay

新疆阿勒泰山已发现 100 余处铁矿床(点),并具有分布广、规模小、成因类型多和矿物组合复杂等特征。其中规模较大的主要集中于阿尔泰山南缘麦兹盆地,如蒙库铁矿(大型)、巴拉巴克布拉克铁矿(中型)、巴利尔斯铁矿(中型)、乌吐布拉克铁矿(中型)。这些铁矿床赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组变质火山-沉积岩系中,矿体及其周围发育大量的矽卡岩矿物。前人对蒙库铁矿床的地质特征、矿区岩体时代、成矿流体和成矿物质来源、矿石及矿物的稀土元素等方面做了大量的研究,但对于其成因类型存在着争论,主要有矽卡岩型、火山喷流沉积+叠加改造型、海相火山岩型等几种观点(张建中等,1987;王登红等,2002;李嘉兴等,2003;仇仲学,2003;Wang *et al.*, 2003;张振福,2003;胡兴平,2004;闫升好等,2005;童英等,2007;徐林刚等,2007;杨富全等,2007,2008a,2008b;Xu *et al.*, 2010)。存在上述争论的关键是矿区广泛出露的矽卡岩是如何形成的?形成机制是什么?矽卡岩与铁矿是什么关系?

乌吐布拉克矿床位于阿勒泰市南东约 75 km 处,经详查估算铁矿石资源量共计 2 098.2 万吨^①,矿床规模为中型,研究程度较低。本文重点对矿体附近的矽卡岩矿物及磁铁矿的主量及微量元素特征进行了系统的研究,探讨了矽卡岩的形成机制及其与铁矿的关系,为深入研究麦兹盆地中铁矿床的成矿机制及成矿规律提供依据。

1 矿床地质特征

乌吐布拉克铁矿床在大地构造位置上处于西伯利亚板块的南阿尔泰山晚古生代活动陆缘(何国琦等,2004)。矿区出露上志留统一下泥盆统康布铁堡组(图 1),由变质火山岩-正常沉积岩组成。根据岩性组合可分为上下两个亚组。下亚组分为两个岩性段:第一段为斜长角闪片麻岩、黑云角闪变粒岩、角闪变粒岩、浅粒岩、条带状角闪黑云变粒岩,夹斜长角闪片麻岩、黑云石英片岩及大理岩透镜体;第二段岩石组合为含磁铁黑云变粒岩、黑云母变粒岩、条带状角闪变粒岩、浅粒岩夹斜长角闪片岩、斜长角闪岩及大理岩透镜体,是矿区内主要赋矿层位。上亚组为变凝灰质砂岩、浅粒岩、变砂岩、变含砾砂岩夹大理岩。

矿区构造主要为铁木下尔衮向斜。断裂基本上以压剪性走向断裂为主,在褶皱的转折端部位有小规模的北东向张性断裂,与铁矿无直接的成因联系。

矿区侵入岩为中泥盆世片麻状黑云母斜长花岗岩和片麻状斜长花岗岩为主。

乌吐布拉克铁矿已圈定 Fe₁、Fe₂、Fe₃、Fe₄ 四个主要铁矿体及多个盲矿体。赋矿围岩以角闪变粒岩、黑云变粒岩、石榴石矽卡岩为主,其次为浅粒岩、黑云角闪片岩、斜长角闪片麻岩及透镜状大理岩。矿体呈似层状、透镜状及不规则状,常见膨大收缩、

① 易朝楷,曾兴洪,莫怀毅,等. 2009. 新疆富蕴县蒙库铁矿矿区乌吐布拉克矿段补充详查及外围普查地质报告. 1~67.

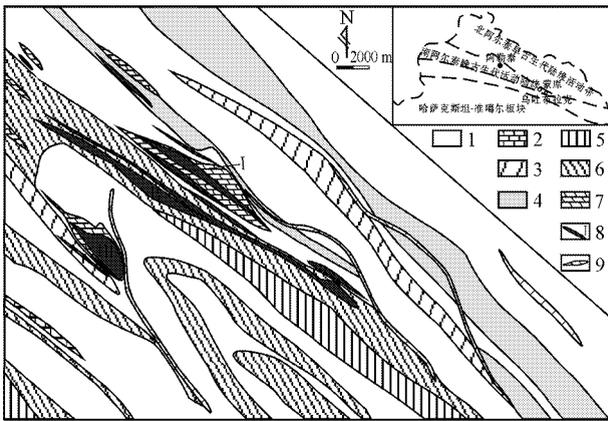


图1 乌吐布拉克铁矿矿区地质图(据易朝楷等, 2009^①修改)

Fig. 1 Geological map of the Wutubulake iron ore district(modified after Yi *et al.*, 2009^①)

1—角闪变粒岩;2—大理岩;3—角闪黑云石英片岩;4—斜长角闪片麻岩;5—浅粒岩;6—磁铁角闪变粒岩;7—石榴石砂卡岩;8—铁矿体及编号;9—伟晶岩脉

1—hornblende granulite; 2—marble; 3—biotite hornblende quartz schist; 4—amphibolite gneiss; 5—leptite; 6—magnetite hornblende granulite; 7—garnet skarn; 8—iron ore body and its serial number; 9—pegmatitic vein

分枝复合、尖灭等现象。矿石构造主要为块状、浸染状,其次为条带状、角砾状、斑杂状、脉状构造。矿石结构主要有粒状变晶结构、交代残余结构,少量变余结构和碎裂结构。矿石中主要金属矿物为磁铁矿,其次为磁赤铁矿,少量黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿等。脉石矿物主要为一套砂卡岩矿物,其次为石英、方解石、绢云母,少量磷灰石、萤石、独居石等。

2 砂卡岩及成矿期次

矿区围岩蚀变发育,主要为砂卡岩化(石榴石化、钙铁辉石化、透辉石化、透闪石化、绿帘石化、绿泥石化、阳起石化、钠长石化),其次为硅化、方解石化、绢云母化等。其中石榴石化、钙铁辉石化、透辉石化、绿帘石化与铁矿化关系密切。根据矿物组合,砂卡岩可分为石榴石砂卡岩、透辉石砂卡岩、透辉石-石榴石砂卡岩、绿帘石-透辉石砂卡岩。砂卡岩矿物组合为以石榴石与透辉石为主,其次为绿帘石、绿泥石、阳起石、透闪石、石英、方解石等(图2)。

根据野外及室内镜下矿物的组合与穿插关系,将

乌吐布拉克铁矿成矿过程划分砂卡岩期和表生氧化期,砂卡岩期进一步划分为4个阶段(图3):

(1)早期砂卡岩阶段:主要形成石榴石,其次为钙铁辉石、透辉石、方柱石等,属无水砂卡岩阶段。石榴石为磁铁矿矿石中较为常见的脉石矿物之一,主要有两种类型:一类是致密块状,呈浅棕-褐棕-褐红色,他形-半自形晶粒,粒径0.05~0.15 mm,具环带结构(图2a),见有磁铁矿分布于晶粒中部各环带中;另一类是粗粒石榴石,黑红色,粒径0.15~0.35 mm,半自形-自形粒状,具环带构造,其边缘和裂纹中有磁铁矿析出,呈逐渐过渡关系(图2b)。透辉石为磁铁矿矿石中最主要脉石矿物,呈墨绿-深绿色,粒度一般比磁铁矿粗大,平均在0.15~0.25 mm之间,镜下多为半自形粒状-短柱状(图2c~2f),弱多色性,正高突起,具有辉石式解理,横断面对称消光。

(2)中期砂卡岩阶段:主要形成磁铁矿、绿帘石、绿泥石、透闪石、角闪石、阳起石等,属含水砂卡岩阶段,是主要成矿阶段。磁铁矿为他形-半自形晶粒状,部分呈自形晶粒状(图2b~2d),粒度0.05~2.00 mm,呈浸染状、稠密浸染、致密块状、条带状及团块状集合体产出,部分磁铁矿中有少量脉石矿物和金属硫化物包裹体。绿帘石为黄绿色,镜下呈粒状、柱状、板状,粒径在0.06~0.17 mm之间,多色性较弱,正高突起,具有姜黄异常干涉色(图2i)。绿泥石呈深绿色,呈片状、板状及粒状产出,具有淡绿-亮黄的多色性,正低突起,镜下见有角闪石部分转变为绿泥石的现象(图2g~2h)。角闪石多出现在磁铁矿角闪石砂卡岩中。这些角闪石结晶程度高,镜下多呈长柱状、菱形状晶体,薄片为中为褐绿色,多色性明显,正中突起,部分见有闪石式解理,横断面对称消光(图2g~2h)。

(3)晚期砂卡岩阶段:主要形成钠长石、黑云母等。黑云母多分布在矿体与围岩或与夹石的接触带,钠长石呈团块状产出,见有部分含稀疏浸染状磁铁矿。

(4)石英硫化物阶段:主要形成金属硫化物、石英、方解石等。金属硫化物主要为黄铁矿,其次为黄铜矿、磁黄铁矿和辉钼矿等,呈星点状、细脉状、浸染状、团块状、条带状产出于石英脉中及其两侧。石英呈脉状产出,常与长石、磁铁矿组成石英长石磁铁矿

① 易朝楷,曾兴洪,莫怀毅,等. 2009. 新疆富蕴县蒙库铁矿区乌吐布拉克矿段补充详查及外围普查地质报告. 1~67.

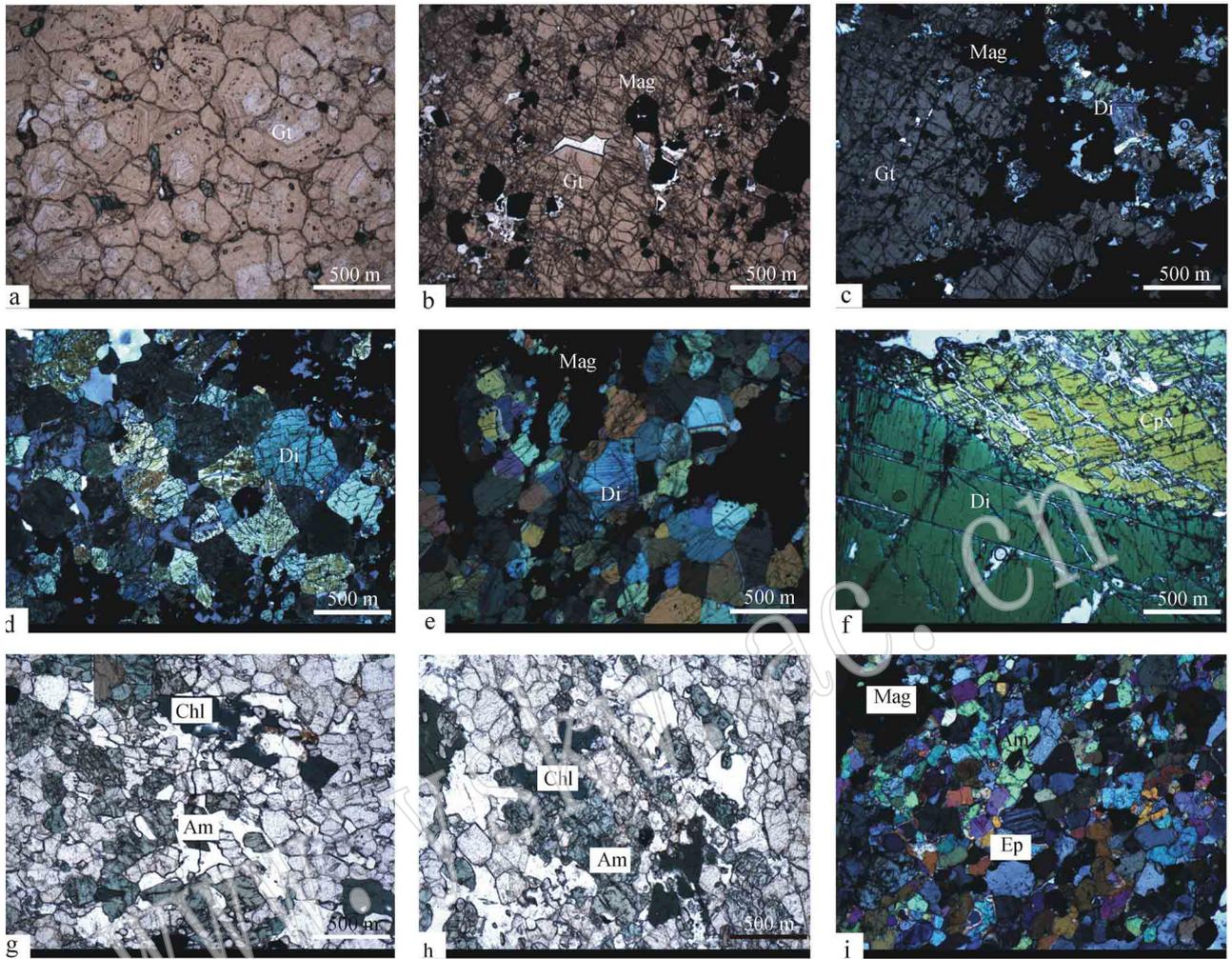


图 2 乌吐布拉克铁矿床砂卡岩矿物特征

Fig. 2 Features of skarn minerals from the Wutubulake iron deposit

Gt—石榴石; Mag—磁铁矿; Di—透辉石; Cpx—普通辉石; Am—角闪石; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石

Gt—garnet; Mag—magnetite; Di—diopside; Cpx—clinopyroxene; Am—amphibolite; Chl—chloritization; Ep—epidote

石。方解石在石榴石砂卡岩中较常见,呈脉状产出,常见有自形程度高的石榴石分布其中。

表生氧化期金属硫化物在地表矿体及浅部矿体中形成氧化矿物,主要有褐铁矿、孔雀石等。

3 电子探针分析

3.1 样品及分析方法

对采自 Fe1、Fe2、Fe3 及 Fe4 矿体的 13 件样品中石榴石、辉石、角闪石、绿帘石及磁铁矿单矿物进行了电子探针分析,这些样品形成于早中期砂卡岩阶段及石英硫化物阶段,岩石名称为透辉石砂卡岩、绿泥石石榴石砂卡岩、绿帘石石榴石砂卡岩、斜长角闪岩、含磁铁矿绿帘石砂卡岩、含角闪石透辉石砂卡

岩、含磁铁矿石榴石砂卡岩、含石英透辉石砂卡岩、石榴石磁铁矿矿石、透辉石磁铁矿矿石、含黄铁矿磁铁矿矿石。对 5 件磁铁矿矿石中的磁铁矿单矿物铁含量、微量及稀土元素进行了化学分析。

电子探针分析在中国地质大学(北京)地学测试中心完成,仪器为 EPMA-1600 型电子探针,测试加速电压 15 kV,束斑直径 $1 \mu\text{m}$,探针电流 18×10^{-8} A。微量和稀土元素分析在国家地质实验测试中心完成,采用 ICP-MS 方法分析,含量 $>10 \times 10^{-6}$ 的元素分析精度优于 5%,含量 $<10 \times 10^{-6}$ 的元素分析精度优于 10%。

3.2 石榴石分析结果

乌吐布拉克铁矿床 11 件石榴石分析结果见表 1。计算得出的石榴石端员组分以钙铁榴石(And)为

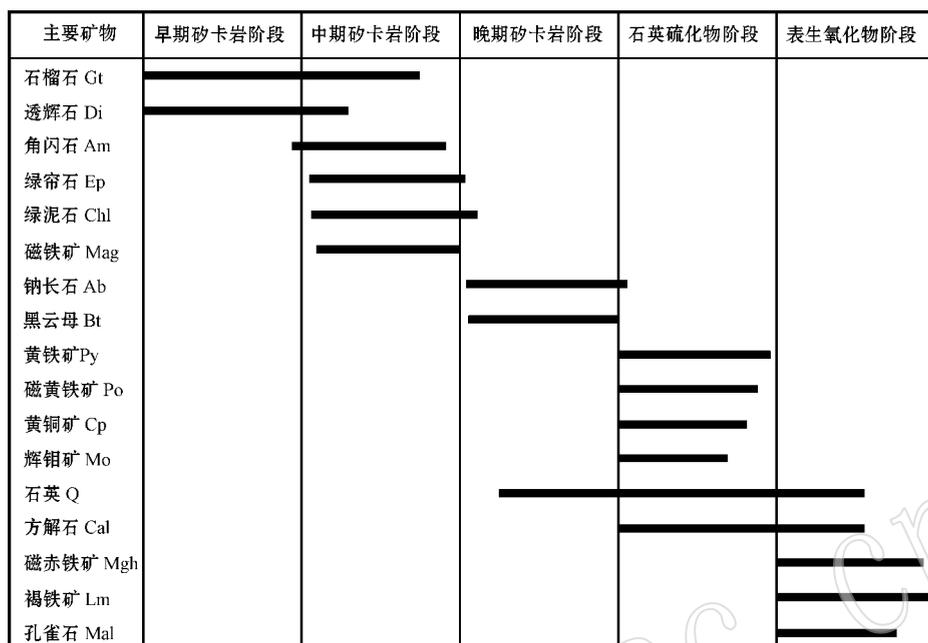


图 3 乌吐布拉克铁矿床成矿期次划分及矿物生成顺序

Fig. 3 Mineral sequence and ore-forming stages of the Wutubulake iron deposit

表 1 乌吐布拉克铁矿床石榴石电子探针分析结果及端员组分

 $\omega_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses and end members of representative garnet from the Wutubulake iron deposit

样号	WT43-1	WT43-3	WT43-4	WT45-1	WT45-2	WT45-3	WT45-5	WT45-6	WT47-1	WT47-3	WT92-6
SiO ₂	36.12	35.97	36.35	36.47	36.53	36.09	36.17	36.06	36.24	36.52	36.1
TiO ₂		0.09	0.1	0.19		0.11	0.16	0.17	0.54	0.29	0.45
Al ₂ O ₃	3.21	3.35	3.2	5.18	5.33	5.71	4.95	5.39	4.14	3.75	4.61
Cr ₂ O ₃	0.07	0.10	0.27					0.06			
FeO ^T	28.82	29.12	29.26	27.02	26.56	26.52	26.81	27.32	26.63	27.58	27.31
MnO	0.34	0.55	0.28	0.52	0.78	0.37	0.62	0.95	0.29	0.25	0.96
MgO	0.12		0.11	0.15	0.21	0.08			0.04		0.03
CaO	29.79	29.71	30.17	29.37	30.19	30.53	30.01	29.29	30.76	30.6	29.68
Na ₂ O	0.03	0.22		0.10	0.12	0.14		0.11	0.13		
Total	98.51	99.11	99.73	98.99	99.72	99.55	98.73	99.35	98.76	98.99	99.14
Si	3.00	2.98	2.98	2.99	2.98	2.95	2.98	2.96	2.98	3.00	2.97
Ti		0.01	0.01	0.01		0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03
Al	0.31	0.33	0.31	0.50	0.51	0.55	0.48	0.52	0.40	0.36	0.45
Cr	0.00	0.01	0.02					0.00			
Fe ³⁺	1.68	1.68	1.68	1.50	1.50	1.48	1.53	1.49	1.59	1.62	1.56
Fe ²⁺	0.32	0.34	0.33	0.36	0.31	0.33	0.32	0.38	0.25	0.27	0.32
Mn	0.02	0.04	0.02	0.04	0.05	0.03	0.04	0.07	0.02	0.02	0.07
Mg	0.01		0.01	0.02	0.03	0.01			0.00		0.00
Ca	2.65	2.64	2.65	2.58	2.64	2.67	2.65	2.58	2.71	2.69	2.61
Uvt	0.23	0.33	0.87					0.19			
And	84.09	83.41	83.72	74.91	74.59	72.89	76.06	73.96	79.81	81.73	77.71
Pyr	0.49	0.45	0.61	0.84	0.32			0.16		0.12	
Spe	0.80	1.28	0.65	1.21	1.78	0.84	1.44	2.18	0.68	0.58	2.22
Gro	3.86	3.70	3.47	11.30	12.62	14.97	11.88	10.99	11.11	8.61	9.28
Alm	10.53	11.29	10.85	11.97	10.16	10.98	10.62	12.68	8.23	9.07	10.67

FeO^T—全铁；Uvt—钙铬榴石；And—钙铁榴石；Pyr—镁铝榴石；Spe—锰铝榴石；Gro—钙铝榴石；Alm—铁铝榴石。

表 2 乌吐布拉克铁矿床辉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 ($w_B/\%$), cation proportions and end members of representative clinopyroxene from the Wutubulake iron deposit

样号	WT01-1	WT01-4	WT02-2	WT02-3	WT02-4	WT02-7	WT05-1	WT05-2	WT06-1	WT07-1	WT07-2	WT07-3	WT07-4	WT43-5	WT43-6	WT70-2	WT70-3	
SiO ₂	52.18	48.60	51.81	52.71	52.05	51.27	50.82	52.68	51.59	47.38	47.78	48.32	48.56	51.56	52.47	50.57	51.02	
TiO ₂	0.24	0.05	0.11		0.04				0.17		0.01					0.07	0.27	
Al ₂ O ₃	0.12	3.35	0.34	0.25	0.28	0.37	0.56	0.22	0.38	1.49	1.50	1.69	1.57	0.21	0.12	0.74	0.51	
Cr ₂ O ₃	0.06												0.09			0.13	0.19	
FeO ^T	13.08	17.03	13.19	12.82	13.35	13.88	14.19	11.30	13.28	26.72	25.62	26.74	26.17	15.70	14.29	16.98	17.31	
MnO	0.76	0.60	0.65	0.71	0.50	0.54	0.81	0.64	0.45	0.68	0.39	0.44	0.42	0.27	0.26	0.51	0.64	
MgO	10.57	7.59	10.83	10.41	10.58	10.39	9.74	12.17	11.04	3.07	3.06	2.93	2.82	9.45	9.21	8.88	8.41	
CaO	22.03	19.95	21.91	22.11	22.36	21.72	22.14	22.49	21.85	17.66	18.17	18.15	18.17	21.05	21.53	20.22	19.59	
Na ₂ O	0.58	1.68	0.46	0.82	0.77	0.90	0.53	0.49	0.42	2.29	2.22	2.05	2.24	1.02	0.96	1.53	1.70	
K ₂ O		0.10												0.10				
NiO	0.280			0.43		0.44				0.67				0.11		0.27	0.08	
Total	99.600	99.09	99.24	100.47	99.59	99.55	98.80	99.98	99.18	99.29	99.42	100.32	99.96	99.38	98.94	99.90	99.72	
以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准																		
Si	2.01	1.91	1.99	2.01	1.99	1.99	1.98	1.99	1.99	1.95	1.96	1.96	1.97	2.00	2.03	1.97	1.99	
Al(IV)		0.09	0.01		0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.05	0.04	0.04	0.03			0.03	0.01	
Al(VI)	0.01	0.07	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.03	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	
Ti		0.01	0.00			0.00					0.00					0.00	0.01	
Cr		0.00											0.00			0.00	0.01	
Fe ³⁺	0.04	0.20	0.04	0.04	0.09	0.12	0.08	0.05	0.05	0.32	0.27	0.25	0.24	0.09	0.02	0.19	0.15	
Fe ²⁺	0.38	0.35	0.38	0.36	0.34	0.33	0.38	0.30	0.38	0.58	0.59	0.64	0.63	0.41	0.44	0.36	0.41	
Mn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	
Mg	0.61	0.44	0.62	0.59	0.60	0.60	0.57	0.69	0.63	0.19	0.19	0.18	0.17	0.55	0.53	0.52	0.49	
Ca	0.91	0.84	0.90	0.90	0.92	0.90	0.92	0.91	0.90	0.78	0.80	0.79	0.79	0.88	0.89	0.85	0.82	
Na	0.04	0.13	0.03	0.06	0.06	0.07	0.04	0.04	0.03	0.18	0.18	0.16	0.18	0.08	0.07	0.12	0.13	
K				0.00										0.00				
W ₀	45.36	42.36	45.10	45.49	45.43	44.36	45.84	45.35	44.91	37.64	39.24	38.84	39.08	43.48	45.40	41.44	40.63	
En	30.28	22.42	31.02	29.80	29.91	29.53	28.06	34.14	31.57	9.10	9.19	8.72	8.44	27.16	27.02	25.32	24.27	
Fs	22.19	28.76	22.17	21.66	21.82	22.79	24.11	18.72	21.95	44.42	42.89	44.50	43.77	25.56	23.92	27.57	28.72	
Ac	2.16	6.46	1.71	3.05	2.83	3.33	1.99	1.79	1.56	8.83	8.67	7.94	8.72	3.81	3.66	5.67	6.38	

FeO^T—全铁; W₀—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—铁辉石; Ac—阳起石。

主,其变化范围为 72.89% ~ 84.09%, 平均 78.44%, 其次是铁铝榴石($Alm=8.23\% \sim 12.68\%$) 与钙铝榴石($Gro=3.47\% \sim 14.97\%$), 含量均小于 20%, 少量锰铝榴石(仅有 $0.58\% \sim 2.22\%$), 部分样品中含有少量的镁铝榴石($0.12\% \sim 0.84\%$) 及钙铬榴石($0.19\% \sim 0.87\%$)。石榴石端员组分图解(图 4) 显示其端员组分为钙铁榴石-钙铝榴石系列, 这种特点与蒙库铁矿(*Xu et al.*, 2010) 长江中下游(赵斌等, 1982; 赵永鑫, 1992; 束学福, 2004) 及大兴安岭地区(朱钟秀等, 1989) 矽卡岩型铁矿的石榴石特征一致, 与世界上主要的大型矽卡岩型铁矿石榴石特征具有可比性(*Meinert*, 1992)。

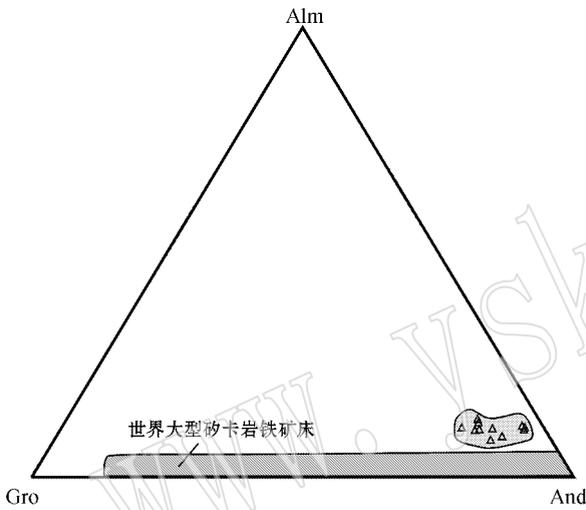


图 4 乌吐布拉克铁矿床与世界大型矽卡岩铁矿床石榴石端员组分图解(底图据 *Meinert*, 1992)

Fig. 4 End members of garnet from the Wutubulake iron deposit and major skarn type iron deposits (after *Meinert*, 1992)

Alm—铁铝榴石; Gro—钙铝榴石; And—钙铁榴石
Alm—almandite; Gro—grossularite; And—andradite

3.3 辉石分析结果

17 件辉石的电子探针分析结果及端员组分见表 2 和图 5。乌吐布拉克铁矿矽卡岩矿物中辉石以透辉石为主, 含少量普通辉石与钙铁辉石。透辉石的组分变化范围: Wo 为 $43.48\% \sim 45.84\%$, En 为 $27.02\% \sim 34.14\%$, Fs 为 $18.72\% \sim 25.56\%$; 普通辉石的组分变化范围较小, Wo 为 $37.64\% \sim 42.36\%$, En 变化为 $8.44\% \sim 25.32\%$, Fs 变化于 $27.57\% \sim 44.50\%$ 。Einaudi 等(1981) 和 *Meinert* (1989, 1992) 研究认为世界上与矽卡岩型铁矿有关的辉石主要为透辉石-钙铁辉石系列, 一般钙铁辉石

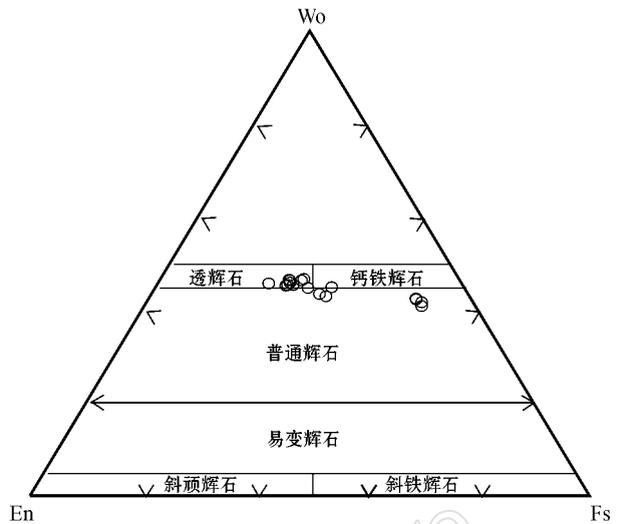


图 5 乌吐布拉克铁矿床辉石分类图解(底图据 *Morimoto et al.*, 1988)

Fig. 5 Classification of clinopyroxenes from the Wutubulake iron deposit (after *Morimoto et al.*, 1988)

Wo —硅灰石; En —顽火辉石; Fs —斜方铁辉石
 Wo —wollastonite; En —enstatite; Fs —ferrosilite

占辉石总数的 80% 以上, 其他种类辉石常少于 10%, 而中国的矽卡岩型铁矿以富透辉石为特征, 一般透辉石含量能达到 $50\% \sim 90\%$, 属钙质矽卡岩(赵斌等, 1987; 赵一鸣等, 1997)。乌吐布拉克铁矿矽卡岩中辉石以富透辉石为特征, 与蒙库铁矿及中国矽卡岩型铁矿钙质矽卡岩中富透辉石的特点一致(*Xu et al.*, 2010)。

3.4 角闪石分析结果

11 件角闪石的电子探针分析结果及端员组分见表 3。根据 *Leake* 等(1997) 的分类, 乌吐布拉克铁矿矽卡岩中角闪石主要为铁镁钙闪石, 其次为铁角闪石(图 6)。铁镁钙闪石化学成分为 $Al_2O_3 = 9.68\% \sim 12.3\%$, $FeO^T = 23.5\% \sim 26.95\%$, $MgO = 6.21\% \sim 7.36\%$, $CaO = 9.88\% \sim 10.70\%$, $Na_2O = 1.82\% \sim 4.66\%$ 。2 个铁角闪石化学成分为 $Al_2O_3 = 6.92\% \sim 7.91\%$, $FeO^T = 22.27\% \sim 22.37\%$, $MgO = 9.57\% \sim 9.93\%$, $CaO = 10.65\% \sim 10.74\%$, $Na_2O = 1.48\% \sim 1.73\%$ 。这种角闪石化学组成与新疆磁海、湖北铁山及福建马坑矽卡岩型铁矿床(*盛继福*, 1985; 赵一鸣等, 1983, 1990) 钙质矽卡岩中角闪石的化学组成相近, 表明乌吐布拉克铁矿矽卡岩主要为钙质矽卡岩。

表 3 乌吐布拉克铁矿床角闪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 ($w_B/\%$), cation proportions and end members of representative hornblende from the Wutubulake iron deposit

样号	WT05-3	WT05-4	WT05-5	WT05-6	WT92-1	WT92-2	WT92-3	WT92-4	WT92-5	WT126-1	WT126-2
SiO ₂	38.36	38.89	38.16	40.37	39.7	39.25	40.24	40.25	41.35	45.11	43.75
TiO ₂	0.34	0.67	0.58	0.28	0.14	0.4		0.02	0.22		0.01
Al ₂ O ₃	11.44	12.3	12.05	10.91	10.25	9.97	9.75	9.68	9.88	6.92	7.91
Cr ₂ O ₃		0.09					0.14		0.22		
FeO ^T	23.5	23.6	24.12	24.68	26.95	27.23	26.1	26.77	25.72	22.37	22.27
MnO	0.48	0.2	0.37	0.48	0.37	0.34	0.53	0.64	0.27	0.13	0.15
MgO	6.68	7.18	6.7	6.99	6.38	6.21	7.15	6.34	7.36	9.93	9.57
CaO	10.4	10.66	10.7	10.58	10.26	10.07	10.44	10.18	9.88	10.65	10.74
Na ₂ O	4.66	2.3	2.23	1.86	1.96	2.03	1.9	1.82	1.85	1.48	1.73
K ₂ O	1.34	1.33	1.52	1.42	1.48	1.62	1.26	1.62	1.39	0.95	1.29
Total	97.21	97.22	96.44	97.56	97.50	97.25	97.37	97.53	97.92	97.54	97.42
基于 23 个氧原子计算											
Si	6.13	6.14	6.11	6.36	6.34	6.32	6.41	6.44	6.49	6.94	6.77
Al ^{IV}	1.87	1.86	1.89	1.64	1.66	1.68	1.59	1.56	1.51	1.06	1.23
Al ^{VI}	0.28	0.43	0.39	0.39	0.27	0.21	0.23	0.27	0.32	0.19	0.22
Ti	0.04	0.08	0.07	0.03	0.02	0.05		0.00	0.03		0.00
Fe ³⁺									0.01	0.25	0.11
Fe ²⁺	3.14	3.12	3.23	3.25	3.60	3.67	3.47	3.58	3.37	2.63	2.77
Mn	0.06	0.03	0.05	0.06	0.05	0.05	0.07	0.09	0.04	0.02	0.02
Mg	1.59	1.69	1.60	1.64	1.52	1.49	1.70	1.51	1.72	2.28	2.21
Ca	1.78	1.80	1.84	1.79	1.76	1.74	1.78	1.75	1.66	1.76	1.78
Na	1.44	0.70	0.69	0.57	0.61	0.63	0.59	0.56	0.56	0.44	0.52
K	0.27	0.27	0.31	0.29	0.30	0.33	0.26	0.33	0.28	0.19	0.25
Sum	16.61	16.12	16.18	16.02	16.13	16.17	16.10	16.09	15.99	15.75	15.89
Si _T	6.13	6.14	6.11	6.36	6.34	6.32	6.41	6.44	6.49	6.94	6.77
Al _T	1.87	1.86	1.89	1.64	1.66	1.68	1.59	1.56	1.51	1.06	1.23
Al _C	0.28	0.43	0.39	0.39	0.27	0.21	0.23	0.27	0.32	0.19	0.22
Fe _C ³⁺									0.01	0.25	0.11
Ti _C	0.04	0.08	0.07	0.03	0.02	0.05		0.00	0.03		0.00
Mg _C	1.59	1.69	1.60	1.64	1.52	1.49	1.70	1.51	1.72	2.28	2.21
Fe _C ²⁺	3.09	2.80	2.94	2.94	3.19	3.25	3.07	3.22	2.92	2.28	2.46
Mn _C											
Fe _B ²⁺	0.05	0.32	0.29	0.32	0.41	0.42	0.41	0.36	0.45	0.35	0.31
Mn _B	0.06	0.03	0.05	0.06	0.05	0.05	0.07	0.09	0.04	0.02	0.02
Ca _B	1.78	1.66	1.66	1.62	1.54	1.54	1.52	1.55	1.52	1.64	1.67
Na _B	0.10										
Ca _A		0.15	0.18	0.17	0.22	0.20	0.26	0.20	0.15	0.12	0.11
Na _A	1.34	0.70	0.69	0.57	0.61	0.63	0.59	0.56	0.56	0.44	0.52
K _A	0.27	0.27	0.31	0.29	0.30	0.33	0.26	0.33	0.28	0.19	0.25

FeO^T 为全铁; Sum 为阳离子总量; T 表示 Si、Al、Cr³⁺、Fe³⁺、Ti⁴⁺; C 表示 T 中多余的 Al、Cr³⁺、Fe³⁺、Ti⁴⁺ 和 Mg、Fe²⁺、Mn; B 表示 C 中多余的 Fe²⁺、Mn、Mg、Ca、Na; A 表示 B 中多余的 Na 和全部的 K。

3.5 绿帘石分析结果

9 件绿帘石的电子探针结果见表 4。绿帘石化学成分为 Al₂O₃ = 21.90% ~ 23.24%, TiO₂ = 0.00% ~ 0.30%, FeO^T = 13.29% ~ 14.27%, CaO = 21.46% ~ 22.13%。相比同为中期矽卡岩阶段生成的角闪石, 绿帘石明显表现出富 Al、富 Ca、贫 Fe、贫

Ti 的特点, 表明绿帘石形成时伴随有 Fe、Ti 等元素的析出, 这也与镜下见有角闪石部分转变为绿泥石的现象相吻合。

3.6 磁铁矿分析结果

11 件磁铁矿的电子探针分析结果见表 5。磁铁矿主要成分为 FeO 与 Fe₂O₃ (FeO^T = 91.17% ~

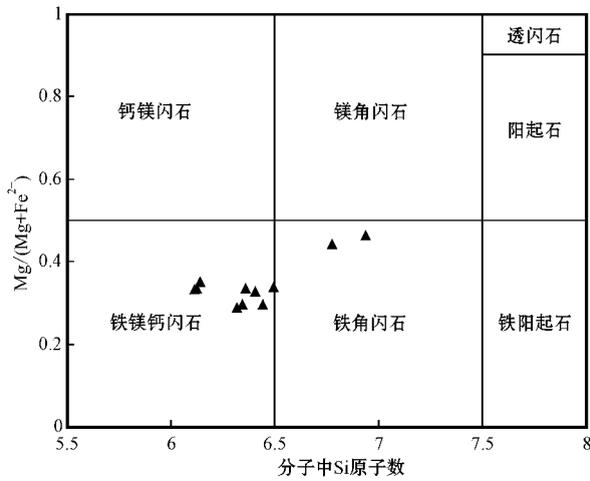


图 6 乌吐布拉克铁矿床角闪石分类图解
[底图据 Leake 等(1997)]

Fig. 6 Classification of hornblendes from the Wutubulake iron deposit (after Leake *et al.*, 1997)

93.63%) $SiO_2 = 0.02\% \sim 0.25\%$, $TiO_2 = 0.03\% \sim 0.10\%$, $MnO = 0.06\% \sim 0.3\%$, $MgO = 0.02\% \sim 0.27\%$, $CaO = 0.01\% \sim 0.30\%$, 与典型接触交代矿床矽卡岩中磁铁矿的化学组成相似(徐国风等, 1979) 均表现出磁铁矿纯度较高, 锰镁组分含量较高, Al_2O_3 含量较低的特点。在图 7 中, FeO^T 与 SiO_2 、 MgO 均呈现负相关, 表明相对酸性的环境不利于磁铁矿的形成, 反知相对基性的环境有利于磁铁矿的形成。

磁铁矿总稀土元素含量较低且变化较小 ($\sum REE = 1.66 \times 10^{-6} \sim 5.29 \times 10^{-6}$) (表 6)。5 件样品具有相似的稀土元素配分模式(图 8) 表现为轻稀土元素相对富集的右倾型 [$LREE/HREE = 2.19 \sim 8.62$] ($La/Yb)_N = 2.56 \sim 16.50$]。轻、重稀土元素组内部均发生了一定程度的分异作用 [$(La/Sm)_N = 1.47 \sim 4.81$] ($(Gd/Yb)_N = 1.38 \sim 3.64$]。4 件样品具

表 4 乌吐布拉克铁矿床绿帘石电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 4 Electron microprobe analyses of epidote from the Wutubulake iron deposit

样号	WT01-5	WT01-6	WT01-7	WT01-8	WT02-1	WT02-5	WT02-6	WT02-8	WT02-9
SiO_2	38.05	37.35	38.4	37.83	37.26	37.96	37.81	38.26	37.64
TiO_2	0.12	0.12	0.30	0.05	0.16				
Al_2O_3	22.22	22.91	21.9	23.12	22.85	22.9	23.24	22.98	23.09
FeO^T	14.01	14.39	14.47	13.97	13.74	13.75	13.79	13.29	14.25
MnO	0.24		0.37	0.18		0.11	0.11		
MgO				0.15		0.09	0.03		0.08
CaO	21.7	22.13	21.49	21.46	21.99	22.13	21.65	22.08	22.19
Total	96.34	96.9	96.93	96.76	96	96.93	96.62	96.61	97.27

表中 FeO^T 为全铁。

表 5 乌吐布拉克铁矿床磁铁矿电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 5 Electron microprobe analyses of magnetite from the Wutubulake iron deposit

样号	WT01-2	WT01-3	WT43-2	WT45-4	WT47-2	WT47-4	WT70-1	WT85-1	WT33-1	WT33-2	WT116-1
SiO_2	0.11	0.09		0.20			0.12	0.25	0.09	0.90	0.02
TiO_2	0.06	0.03						0.03	0.10		
Al_2O_3				0.02			0.16				
FeO^T	92.89	92.77	92.58	93.63	92.96	92.37	93.44	92.58	92.88	91.17	92.58
MnO	0.30	0.24							0.06	0.23	0.17
MgO		0.22		0.05		0.23			0.02	0.27	0.24
CaO	0.01	0.08		0.08	0.16	0.05				0.30	0.14
Total	93.36	93.42	92.58	93.96	93.12	92.65	93.73	92.86	93.15	92.87	93.15

表中 FeO^T 为全铁。

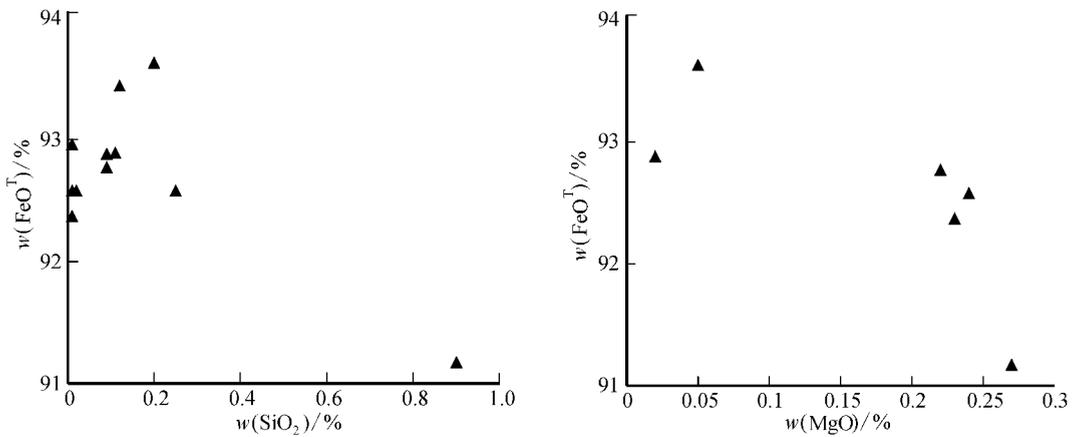


图7 乌吐布拉克铁矿床磁铁矿中氧化物相关图解

Fig. 7 Relationships of oxides of magnetite from the Wutubulake iron deposit

有强正铈异常($\delta\text{Eu} = 1.19 \sim 3.26$),基本无铈异常($\delta\text{Ce} = 0.81 \sim 0.93$)。另外1件样品(WT37)具有中等程度的负铈异常($\delta\text{Eu} = 0.71$),基本无铈异常($\delta\text{Ce} = 0.93$)。以上特点与蒙库铁矿磁铁矿矿石及矽卡岩(闫升好等,2005;杨富全等,2007)稀土元素配分模式具有相似性,与乌吐布拉克矽卡岩稀土元素配分模式近乎一致(张志欣等,2011),暗示磁铁矿的形成与矽卡岩有关。

不同类型磁铁矿都含有Co和Ni,一般是Co含量大于Ni含量,但是不同成因磁铁矿在Co、Ni含量和Ni/Co比值上有明显差别(叶庆同,1982)。乌吐布拉克磁铁矿化学成分富含Co,Co的平均含量为 146.2×10^{-6} (表6),与乔夏哈拉铁铜金矿床磁铁矿Co的平均值 145.9×10^{-6} 很接近,应立娟等(2006)认为该矿床中磁铁矿的形成与矽卡岩有关。磁铁矿的Ni/Co比值为0.15~4.29,4个样品Ni/Co比值均小于1,与典型矽卡岩成因的磁铁矿很相似,而与火山成因的磁铁矿相差较大(叶庆同,1982;王奎仁,1989;汤蔡联,1990)。以上均表明乌吐布拉克铁矿床中磁铁矿的形成与矽卡岩密切相关。

4 讨论

4.1 矽卡岩成因

Einaudi等(1981)根据矽卡岩形成机理不同,将矽卡岩划分为交代矽卡岩和变质矽卡岩两类。交代矽卡岩一般产于距火成岩侵入体和碳酸盐岩石的接触带有一定距离的碳酸盐岩石的断裂中,形成温度较高,作用的流体一般认为是岩浆成因的;而变质矽

卡岩则形成于区域变质阶段。麦兹盆地中已发现的铁矿床中矿体附近均发育矽卡岩矿物,矿体与矽卡岩密切共生,离开矿体康布铁堡组地层中不发育矽卡岩。Wang等(2003)认为蒙库铁矿矿区出露的矽卡岩与铁矿体缺乏空间联系,而且与花岗岩类关系也不清楚,提出矽卡岩是变质的化学沉积岩。对该盆地中乌吐布拉克铁矿矽卡岩矿物组分的研究表明,该类矽卡岩与我国一些典型交代矽卡岩特点具有相似性,结合野外详细的地质观察,我们认为产于花岗岩体外接触带的矿体与围岩(熔岩、火山碎屑岩和灰岩)中的大量矽卡岩矿物是岩浆热液交代火山岩和灰岩的结果。这也得到矿区角闪石成因研究的进一步证实,在角闪石成因矿物族三角图解(图9)中,矿区角闪石落于碱性壳源岩浆成因区及中酸性-碱性岩浆成因区,偏离区域变质成因区,表明矿区矽卡岩矿物为交代矽卡岩成因,而非区域变质成因。

交代矽卡岩按其矿物组成不同及其所被交代碳酸盐围岩的差别,划分为钙矽卡岩和镁矽卡岩两类(Einaudi *et al.*, 1981)。钙矽卡岩主要由钙铁-钙铝系列石榴石、透辉石-钙铁辉石系列辉石、硅灰石和方柱石等组成,其围岩为灰岩;镁矽卡岩主要由镁橄榄石、透辉石、尖晶石、金云母和硅镁石族等矿物组成,其围岩为白云岩。赵一鸣等(1990)在此基础上进一步划出了锰质矽卡岩和碱质矽卡岩,铁矿主要与前两种类型有关,锰质矽卡岩主要与铅锌银矿化有关(毛景文等,1998)。乌吐布拉克铁矿矿体及其周围发育大量的矽卡岩主要为石榴石矽卡岩、透辉石矽卡岩、透辉石-石榴石矽卡岩、绿帘石-透辉石矽卡岩,石榴石端员组分以端员组分为钙铁榴石

表 6 乌吐布拉克铁矿床磁铁矿微量及稀土元素组成 $w_B/10^{-6}$

Table 6 Trace elements and REE compositions of magnetite from the Wutubulake iron deposit

样号	WT26	WT33	WT36	WT37	WT116
Fe (%)	67.4	62.36	70.34	69.28	70.42
La	0.44	0.82	0.49	0.25	1.15
Ce	0.77	1.42	0.93	0.45	2.06
Pr	0.08	0.17	0.16	0.05	0.24
Nd	0.36	0.64	0.72	0.25	0.93
Sm	0.08	0.11	0.1	0.11	0.16
Eu	0.05	0.05	0.12	0.03	0.2
Gd	0.1	0.15	0.15	0.15	0.22
Tb	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Dy	0.06	0.1	0.16	0.15	0.14
Ho	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Er	0.04	0.07	0.08	0.08	0.06
Tm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Yb	0.06	0.09	0.09	0.07	0.05
Lu	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
Y	0.37	0.57	0.69	0.75	0.71
∑REE	2.09	3.69	3.07	1.66	5.29
LREE	1.78	3.21	2.52	1.14	4.74
HREE	0.31	0.48	0.55	0.52	0.55
LREE/HREE	5.74	6.69	4.58	2.19	8.62
(La/Yb) _N	5.26	6.54	3.91	2.56	16.50
(La/Sm) _N	3.55	4.81	3.16	1.47	4.64
(Gd/Yb) _N	1.38	1.38	1.38	1.77	3.64
δEu	1.71	1.19	2.99	0.71	3.26
δCe	0.93	0.88	0.81	0.93	0.91
Sc	0.27	0.39	0.36	0.16	0.67
Rb	0.2	0.49	3.53	0.42	0.84
Sr	0.09	1.21	<0.01	<0.01	<0.01
Ba	1.26	3.19	5.56	2.77	13.8
Cr	9.5	12.6	5.01	6.2	3.14
Co	219	372	12.1	108	19.8
Ni	162	273	51.9	90.4	2.96
V	26.1	25.9	11.5	14.1	12.5
Cu	65.8	133	283	38	646
Pb	8.15	8.94	11.5	11.7	7.9
Zn	97.1	61.2	46.5	78.6	17.7
Hf	0.09	0.22	0.17	0.06	0.29
Ga	11	6.35	11.7	10.1	6.12
Ge	2.51	2.4	3.24	2.49	4.22
Nb	0.31	0.47	0.71	0.17	0.54
Ta	0.05	0.06	0.25	0.05	0.09
Th	0.11	0.28	0.28	0.07	0.86
U	0.18	1.54	0.39	0.13	0.78
Cd	0.08	0.11	0.06	0.06	0.04
In	0.04	0.07	0.08	0.05	0.14
Tl	<0.01	<0.01	0.67	<0.01	<0.01
As	1.5	1.45	2.01	1.53	1.66

注：表中 REE 球粒陨石标准采用 Taylor and McLennan (1985) 的数据，Eu 异常与 Ce 异常分别采用 $\delta Eu = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$ 和 $\delta Ce = 2Ce_N / (La_N + Pr_N)$ 表示。

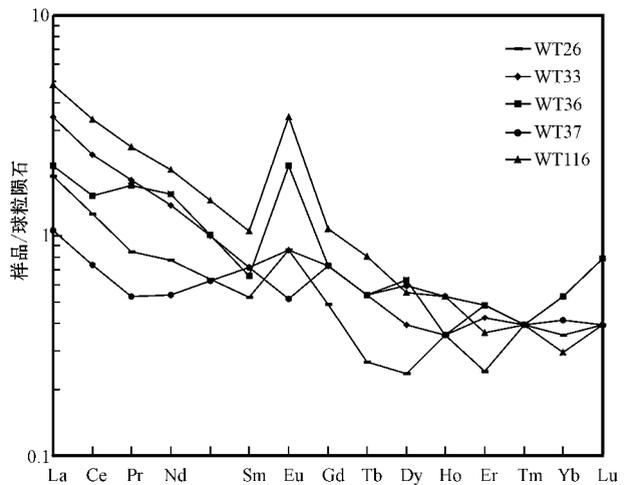


图 8 乌吐布拉克铁矿床磁铁矿稀土元素配分模式 (球粒陨石标准据 Taylor 和 McLennan, 1985)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of magnetite from the Wutubulake iron deposit (chondrite-normalized data after Taylor and McLennan, 1985)

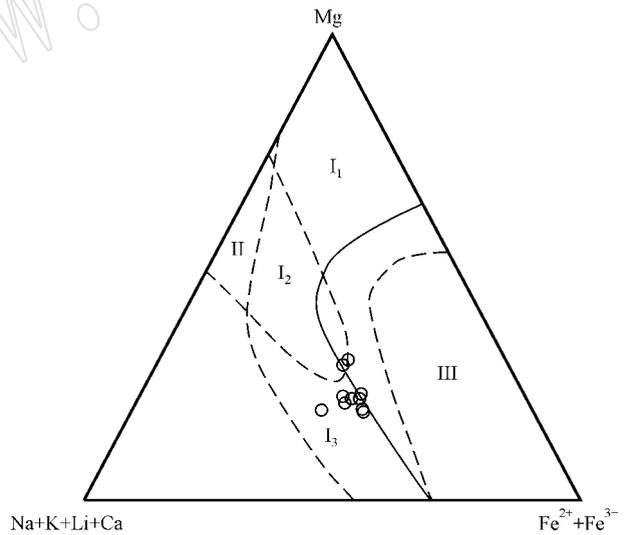


图 9 乌吐布拉克铁矿床角闪石成因矿物族三角图解 (据陈光远等, 1987)

Fig. 9 Diagram for amphibole genetic discrimination of the Wutubulake iron deposit (after Chen Guangyuan et al., 1987)

—钙铝榴石系列为主，辉石端员组分以透辉石为主，角闪石端员组分主要为铁镁钙闪石，这些特点表明乌吐布拉克铁矿砂卡岩为交代砂卡岩中的钙砂卡岩。

4.2 砂卡岩形成机制及其与铁矿关系

通常认为砂卡岩由中酸—酸性花岗质岩体与碳酸盐岩及富钙镁质的碎屑岩接触交代反应而形成，

内接触带广泛发育矽卡岩,矽卡岩与大量金属堆积成矿密切相关,富磁铁矿的矽卡岩常产于侵入岩和灰岩的中基性火山岩接触带(程裕淇等,1994;赵一鸣等,1990;赵一鸣,2002)。乌吐布拉克铁矿矿体呈似层状、透镜状赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组变质火山-沉积岩系中,矿体附近出现片麻状斜长花岗岩,矿体及其周围发育大量的矽卡岩矿物,但矽卡岩与铁矿体不是沿岩体接触带不规则状分布,岩体接触带上也并不发育矽卡岩化。这与典型的产在接触带的矽卡岩有一定差异,但是矽卡岩矿物的化学组成与我国一些典型矽卡岩型矿床中钙矽卡岩相同。矿区围岩及矿石的全岩稀土元素特征研究表明斜长角闪岩、矿石及矽卡岩的稀土元素配分模式表现出相似性,如多为轻稀土元素相对富集型,呈现强的正铈异常和弱的或中等程度负铈异常(张志欣等,2011),与磁铁矿单矿物的稀土元素配分模式一致,判定矿床成矿物质来源于斜长角闪岩。结合其特殊地质特征,认为矿床中的矽卡岩是由岩浆热液流体交代康布铁堡组基性火山岩(熔岩和火山碎屑岩)及灰岩所形成,在早期矽卡岩阶段首先形成了钙铁榴石-钙铝榴石系列及透辉石等矿物,中期矽卡岩阶段退化变质形成一套含水硅酸盐类矿物,主要以绿帘石、绿泥石及角闪石为主,其次是阳起石、透闪石等。在中期矽卡岩阶段含水硅酸盐类矿物形成后,由于大气降水的逐渐加入使成矿流体温度、密度等物理化学条件的降低,伴随出现了矽卡岩的退蚀变质作用,导致铁元素大量沉淀,形成了乌吐布拉克矽卡岩型磁铁矿矿床。

5 结论

(1) 乌吐布拉克中型铁矿床赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组变质火山-沉积岩系中,矿体呈似层状、透镜状,矿体及其周围发育大量矽卡岩矿物。

(2) 石榴石端员组分以端员组分为钙铁榴石-钙铝榴石系列为主,辉石端员组分以透辉石为主,角闪石端员组分主要为铁镁钙闪石,这些特点表明乌吐布拉克铁矿矽卡岩为交代矽卡岩中的钙矽卡岩。磁铁矿的主要组分、稀土及微量元素表明其形成与矽卡岩密切相关。

(3) 结合矿床地质特征,认为矽卡岩是由岩浆热液流体交代康布铁堡组基性火山岩(熔岩和火山

碎屑岩)及灰岩所形成,矽卡岩的退化变质作用中形成了磁铁矿。

致谢 野外期间得到新疆富蕴县金宝矿业公司谢梦华总工程师、金山矿冶公司钟天智和黄智丽技术员及公司领导的大力支持和帮助,电子探针分析实验中受到尹京武和郝金华老师的悉心指导,微量与稀土元素测试由国家地质实验测试中心完成,在此一并致以衷心的感谢。

References

- Chen Guangyuan, Sun Daisheng and Yin Hui'an. 1987. Minerageny and Exploration Mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Press, 234~235 (in Chinese).
- Cheng Yuqi, Zhao Yiming and Lin Wenwei. 1994. Iron deposits of China[A]. Song Shuhe. Deposits of China[Middle]C]. Beijing: Geological Publishing House, 386~479 (in Chinese).
- Einaudi M T, Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits [J]. Economic Geology 75th. Anniv., 317~391.
- He Guoqi, Cheng Shoude, Xu Xin, et al. 2004. An Introduction to the Explanatory Text of the Map of Tectonics of Xinjiang and Its Neighbouring Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~65 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xingping. 2004. Geological features and genesis of the Mengku iron deposit in the Fuyun, Xinjiang[J]. Xinjiang Non-Ferrous Metals, 1: 2~5, 8 (in Chinese with English abstract).
- Leake B E, Woolley A R and Arps C E S. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Mineral and Mineral Names[J]. American Mineralogist, 82: 1 019~1 037.
- Li Jiaying, Jiang Jun, Hu Xingping, et al. 2003. Geological features and genesis of the Mengku iron deposit in the Fuyun, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 21(3): 307~311 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Li Hongye, Song Xuexin, et al. 1998. Geology and Geochemistry of the Shizhuyuan W-Sn-Mo-Bi Polymetallic Deposit, Hunan, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~215 (in Chinese with English abstract).
- Meinert L D. 1989. Gold skarn deposits-geology and exploration criteria [A]. Keays R, Ramsay R and Groves D. The Geology of Gold Deposits[C]. Economic Geology Monogr., 6: 537~552.
- Meinert L D. 1992. Skarns and skarn deposits[J]. Geosci. Can., 19: 145~162.
- Morimoto N, Fabries J and Ferguson A K. 1988. Nomenclature of pyroxenes[J]. Mineralogical Magazine, 52: 535~550.
- Qiu Zhongxue. 2003. Analysis on genesis and geological characteristics of Mengku iron deposit in fuyun county, Xinjiang autonomous region[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Re-

- search, 18(Sup): 110~114 (in Chinese with English abstract).
- Sheng Jifu. 1985. Mineralization and alteration of the China iron deposit [J]. Bulletin of the institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, 3: 89~107 (in Chinese).
- Shu Xuefu. 2004. Geology and Geochemistry Characteristics of Anqing Skarn type Fe-Cu Deposit and its Origin of Iron Material[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 23(3): 219~224 (in Chinese with English abstract).
- Tang Cailian. 1990. Typomorphic characteristics and significance of magnetite from Fushan iron deposit[J]. Geological Information of Hebei, 4: 32~36 (in Chinese).
- Taylor S R and Mclennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution[M]. Blackwell: Oxford Press, 1~312.
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, et al. 2007. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1933~1944 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, et al. 2002. Minerogentic Series and Regularity of Mineralization in the Altai Metallogenic Province, China[M]. Beijing: Atomic Press, 1~493 (in Chinese).
- Wang Kuiren. 1989. Genetic Mineralogy of Earth and Universe[M]. Hefei: Anhui Education Publishing House, 108~129 (in Chinese).
- Wang Y W, Wang J B, Wang S L, et al. 2003. Geology of the Mengku iron deposit, Xinjiang, China—a metamorphosed VMS? [A]. Mao J W, Goldfarb R J, Seltmann R, et al. Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan. Proceedings Volume of the International Symposium of the IGCP-473 Project in Urumqi and Guidebook of the Field Excursion in Xinjiang, China: August 9~21, 2003[C]. London: Centre for Russian and Central Asian Mineral Studies, Natural History Museum, 181~200.
- Xu Guofeng and Shao Jielian. 1983. The typomorphic characteristics of magnetite and its significance[J]. Geology and Prospecting, 3: 30~37 (in Chinese).
- Xu Lingang, Mao Jingwen, Yang Fuquan, et al. 2010. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 39: 423~440.
- Xu Lingang, Mao Jinwen, Yang Fuquan, et al. 2007. Geology and geochemistry of the Mengku iron deposit in Fuyun county, Xinjiang Uigur Autonomous[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2653~2664 (in Chinese with English abstract).
- Yan Shenhao, Zhang Zhaochong, Wang Yitian, et al. 2005. REE geochemistry of Qiaoxiahala type Fe-Cu deposits in southern margin of Altay Mountains, Xinjiang, and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 24(1): 25~32 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Chai Fengmei, et al. 2008b. The ore-forming fluids and metallogenesis of the Mengku iron deposit in Altay Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 27(6): 659~680 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Xu Lingang, et al. 2007. REE geochemistry and the indication for iron mineralization of Mengku iron deposit in Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2443~2456 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Yan Shenhao, et al. 2008a. Geochronology, geochemistry and geological implications of the Mengku synorogenic plagiogranite pluton in Altay, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 82(4): 485~499 (in Chinese with English abstract).
- Ye Qingtong. 1982. Typomorphic characteristics and genesis significance of magnetite from some iron ore deposits in eastern Guangdong[J]. Acta Petrologica Mineralogica et Analytica, 1(1): 44~51 (in Chinese with English abstract).
- Ying Lijuan, Wang Denghong, Liangting, et al. 2006. Chemical composition and typomorphic characteristics of magnetite and its geological significance in Qiaoxiahala iron-copper-gold deposit of Altai, Xinjiang[J]. Acta Mineralogica Sinica, 26(1): 59~68 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianzhong, Feng Binghuan, Jin Haojia, et al. 1987. The genetic relationship between marine volcanic rocks and iron deposit at Abagong-mengku area, Altay district, Xinjiang and ore-forming geological features[J]. Bulletin of Xi'an Institute Geology Mineral Resources, CAGS, 20: 89~180 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenfu. 2003. Analysis of characteristics of typical Fe deposit in Altai region, Xinjiang and their genesis and potential[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 18(Sup.): 80~83 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhixin, Yang Fuquan, Chai Fengmei, et al. 2011. The study on the REE geochemistry of the Wubulake iron deposit in Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 30(1): 87~102 (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. 1992. A study on garnet from some skarn deposits in China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 4: 296~304 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming. 2002. Skarn new important advances in study of skarn deposits[J]. Mineral Deposits, 21(2): 113~121 (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, Tan Huijing, Xu Zhennan, et al. 1983. The calcic iron ore deposits of Makeng type in southwestern Fujian[J]. Bulletin of the institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, 1~141 (in Chinese).
- Zhao Yiming, Zhang Yinan and Lin Wenwei. 1997. Characteristics of

pyroxenes and pyroxenoids in skarn deposits of China and their relationship with metallization[J]. *Mineral Deposits*, 16(4): 318~329 (in Chinese with English abstract).

Zhao Yongxin. 1992. Mechanisms of Formation of the Contact Iron Deposits along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River[M]. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House, 1~120 (in Chinese with English abstract).

Zhu Zhongxiu and Li Xuping. 1989. Mineralogica of garnet from skarn iron deposits in Daxinganling area[J]. *World Geology*, 8(1): 15~19 (in Chinese).

附中文参考文献

陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 234~235.

程裕淇, 赵一鸣, 林文蔚. 1994. 中国铁矿床[A]. 宋叔和. 中国矿床(中册)[C]. 北京: 地质出版社, 386~479.

何国琦, 成守德, 徐新, 等. 2004. 中国新疆及邻区大地构造图(1:2 500 000)说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1~65.

胡兴平. 2004. 新疆富蕴县蒙库铁矿区地质特征及成因浅析[J]. 新疆有色金属, 1(2~5): 8.

李嘉兴, 姜俊, 胡兴平, 等. 2003. 新疆富蕴县蒙库铁矿床地质特征及成因分析[J]. 新疆地质, 21(3): 307~311.

毛景文, 李红艳, 宋学信, 等. 1998. 湖南柿竹园钨锡钼多金属矿床地质与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1~215.

仇仲学. 2003. 新疆富蕴县蒙库铁矿床地质特征与成因分析[J]. 地质找矿论丛, 18(增刊): 110~114.

盛继福. 1985. 新疆磁海铁矿蚀变特征[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 第3号: 89~107.

束学福. 2004. 安庆矽卡岩型铁铜矿床地质地球化学特征及其铁质来源研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 23(3): 219~224.

汤蔡联. 1990. 符山铁矿磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 河北地质情报, 4: 32~36.

童英, 王涛, 洪大卫, 等. 2007. 中国阿尔泰山北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. 岩石学报, 23(8): 1933~1944.

王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 2002. 阿尔泰山成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社, 1~493.

王奎仁. 1989. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 108~129.

徐国风, 邵洁涟. 1979. 磁铁矿的表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. 新疆富蕴县蒙库铁矿地质、地球化学特征[J]. 岩石学报, 23(10): 2653~2664.

闫升好, 张招崇, 王义天, 等. 2005. 新疆阿尔泰山南缘乔夏哈拉式铁铜矿床稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 24(1): 25~32.

杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 等. 2008b. 新疆阿尔泰山蒙库铁矿床的成矿流体及成矿作用[J]. 矿床地质, 27(6): 659~680.

杨富全, 毛景文, 徐林刚, 等. 2007. 新疆蒙库铁矿床稀土元素地球化学及对铁成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 23(10): 2443~2456.

杨富全, 毛景文, 闫升好, 等. 2008a. 新疆阿尔泰山蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. 地质学报, 82(4): 485~499.

叶庆同. 1982. 粤东一些铁矿床中磁铁矿的表型特征及其成因意义[J]. 岩矿测试, 1(1): 44~51.

应立娟, 王登红, 梁婷, 等. 2006. 新疆阿尔泰山乔夏哈拉铁铜金矿床磁铁矿的化学成分标型特征和地质意义[J]. 矿物学报, 26(1): 59~68.

张建中, 冯秉寰, 金浩甲, 等. 1987. 新疆阿尔泰山阿巴宫-蒙库海相火山岩与铁矿的成生关系及成矿地质特征[J]. 中国地质科学院西安地质研究所所刊, 20: 89~180.

张振福. 2003. 新疆阿尔泰山一带典型铁矿床特征、成因及找矿前景分析[J]. 地质找矿论丛, 18(增刊): 80~83.

张志欣, 杨富全, 柴凤梅, 等. 2011. 新疆阿尔泰山吐布拉克铁矿床稀土元素地球化学研究[J]. 矿床地质, 30(1): 87~102.

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. 1992. 我国一些矿区矽卡岩中石榴石的研究[J]. 矿物学报, 4: 296~304.

赵一鸣. 2002. 矽卡岩矿床研究的某些重要新进展[J]. 矿床地质, 21(2): 113~121.

赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 等. 1990. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1~351.

赵一鸣, 谭慧静, 许振南, 等. 1983. 闽西南地区马坑式钙矽卡岩型铁矿床[J]. 中国地质科学院矿产地质研究所所刊, 1~141.

赵一鸣, 张铁男, 林文蔚. 1997. 我国矽卡岩矿床中的辉石和似辉石特征及其与金属矿化的关系[J]. 矿床地质, 16(4): 318~329.

赵永鑫. 1992. 长江中下游地区接触带铁矿床形成机理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~120.

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.