

文章编号: 0254 - 5357(2013)03 - 0510 - 12

新疆准噶尔北缘托斯巴斯套铁铜金矿床矽卡岩和磁铁矿矿物学特征及其地质意义

吕书君^{1,2}, 杨富全^{3*}, 柴凤梅⁴, 张志欣⁵, 李强³

- (1. 湖南省地质矿产勘查开发局 407 队, 湖南 怀化 418000;
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 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;
4. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 新疆 乌鲁木齐 830049;
5. 中国科学院新疆生态与地理研究所 新疆矿产资源研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:托斯巴斯套铁铜金矿床赋存于中泥盆统北塔山组火山岩与闪长(玢)岩的接触带中,矿体呈脉状、透镜状,矿体及其周围发育大量矽卡岩。本文分别利用电子探针、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),对托斯巴斯套铁铜金矿附近的石榴子石、辉石、绿帘石的化学组分及磁铁矿的主量及微量元素开展研究。结果表明:矽卡岩矿物中石榴子石端员组分以钙铝榴石-钙铁榴石系列为主,辉石端员组分以透辉石为主,绿帘石化学成分富铁富钙,这些特点表明矿区矽卡岩具有钙矽卡岩特征。矽卡岩是由岩浆热液流体交代北塔山组基性火山岩而形成的,磁铁矿的形成与矽卡岩的退化变质作用有关。在石英-硫化物-碳酸盐阶段形成铜和金矿化。

关键词:托斯巴斯套; 准噶尔北缘; 铁铜金矿床; 矽卡岩; 磁铁矿; 电子探针分析

中图分类号: P612; P588.312; P578.46 **文献标识码:** A

新疆准噶尔北缘是中亚造山带的重要组成部分,位于西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块的结合部位,为显生宙增生造山带^[1-4]。该带蕴含丰富的矿产资源,已发现喀拉通克大型铜镍矿^[5]、玉勒肯哈腊苏中型铜矿、希勒克特哈腊苏中型铜矿、希勒库都克中型铜钼矿、索尔库都克中型铜钼矿、萨尔布拉克小型金矿、乔夏哈拉小型铁铜金矿、老山口小型铁铜金矿(包括托斯巴斯套铁铜金矿)等。老山口铁铜金矿床位于准噶尔北缘,距青河县城 41 km,自北西向南东依次由四个矿段组成,其中Ⅳ矿段又称托斯巴斯套铁铜金矿。托斯巴斯套铁铜金矿于 1986 年发现,为铜金矿点,后经多年勘查,确定为小型铁铜金多金属矿床。

托斯巴斯套铁铜金矿床研究程度较低,前人仅对矿床地质特征、矿物组合进行了初步的研

究^[6-10]。对于其成因类型一直存在着争议,主要有以下几种观点:与火山机构有关的中-低温火山热液型矿床、火山-沉积叠加改造型、火山热液型、IOCG 型^[6-10],这些观点的主要认识为:成矿与闪长岩类岩浆活动有关,矿区多处发育绿帘石、石榴子石、绿泥石等蚀变,热液活动明显。矿体附近发育一套矽卡岩矿物组合,针对矿区矽卡岩是如何形成的,其与铁、铜、金存在的关系等问题,目前还缺乏系统研究。本文在详细的野外观察基础上,分别采用电子探针、微量及稀土元素分析,重点对托斯巴斯套铁铜金矿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,为深入研究准噶尔北缘地区铁矿床的成矿机制及成矿规律提供新的依据。

收稿日期: 2012 - 02 - 21; 接受日期: 2013 - 02 - 05
基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费(201211073); 国家科技支撑计划项目(2011BAB06B03 - 02; 2006BAB07B02 - 01); 国家自然科学基金项目(40972069)
作者简介: 吕书君,硕士研究生,矿床学与矿床地球化学专业。E-mail: lvshujun1314520@126.com。
通讯作者: 杨富全,研究员,主要从事矿床地质、地球化学研究。E-mail: fuquanyang@163.com。

矿石构造有条带状、脉状、角砾岩状、浸染状、网脉状、块状构造。矿石结构主要为半自形-它形粒状结构、自组织结构、交代残余结构。矿石中主要金属矿物为磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、赤铁矿、磁黄铁矿和自然金,次为斑铜矿、方铅矿、闪锌矿等。脉石矿物主要有绿帘石、绿泥石、阳起石、石榴子石、角闪石、方解石、钾长石、钠长石、黑云母、绢云母、石英等。

2 矽卡岩矿物学特征及成矿期次

矿区围岩蚀变较发育,以矽卡岩化为主,其次为硅化、绢云母化、方解石化。矿区绿帘石化最为发育。绿帘石化、绿泥石化、透闪石化、方解石化与铁、铜、金矿化关系密切。矽卡岩矿物组合为石榴子石、透辉石、绿帘石、绿泥石、透闪石和阳起石(图3)。

根据野外及室内岩相学研究,将托斯巴斯套铁铜金矿成矿过程划分为两期:矽卡岩期和表生期(图4)。

第I期:矽卡岩期,又可以划分3个阶段:矽卡岩阶段、退化蚀变阶段和石英-硫化物-碳酸盐阶段。

矽卡岩阶段:主要形成石榴子石、透辉石、方柱

石等。石榴子石主要有两种类型:一类为粗粒石榴子石,呈浅棕-褐棕-褐红色,半自形-自形晶粒,粒径0.15~0.3 mm,环带结构较发育(图3a);另一类是细粒石榴子石,黑红色,粒径0.05~0.15 mm,他形-半自形粒状,见有磁铁矿分布其中(图3b);透辉石多呈半自形粒状-短柱状,粒度不一,平均在0.1~0.25 mm之间,浅绿-深绿色,弱多色性,正高突起,具辉石式解理,具鲜艳的II级干涉色,横断面对称消光(图3c~d)。

退化蚀变阶段:主要形成磁铁矿、绿帘石、绿泥石、透闪石、阳起石等矿物,是铁矿的主要成矿阶段。磁铁矿多呈他形-半自形粒状,部分呈自形晶粒状,粒度0.05~0.25 mm,呈条带状、浸染状、致密块状及团块状集合体产出,镜下见大量的磁铁矿与绿帘石、绿泥石、透闪石、阳起石呈条带状、放射状自组织结构(图3e~g)。绿帘石为黄绿色,多呈粒状、板状,粒径0.05~0.15 mm,弱多色性,正高突起,具有鲜艳的II级干涉色。绿泥石深绿色,呈片状、板状产出,多色性明显,正低突起。角闪石褐绿色,多呈粒

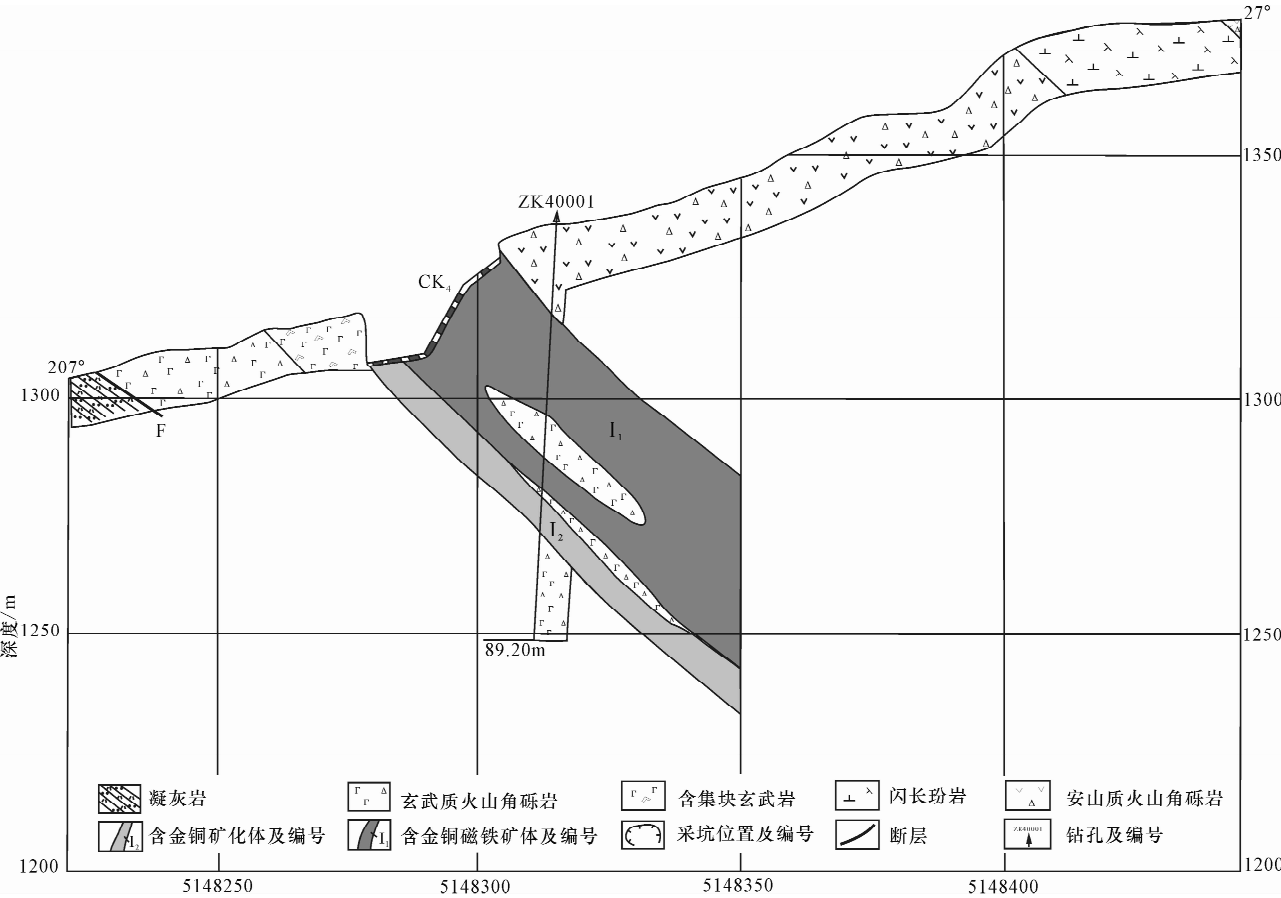


图2 托斯巴斯套铁铜金矿床矿体剖面图(据新疆有色地质勘查局地球物理探矿队,2003 修改)

Fig. 2 Cross-section of the Tuosibasitao ore deposit (modified from The Geophysical Prospecting Team of Geological-Ming Organization for Non-Ferrous Metals in Xinjiang, 2003)

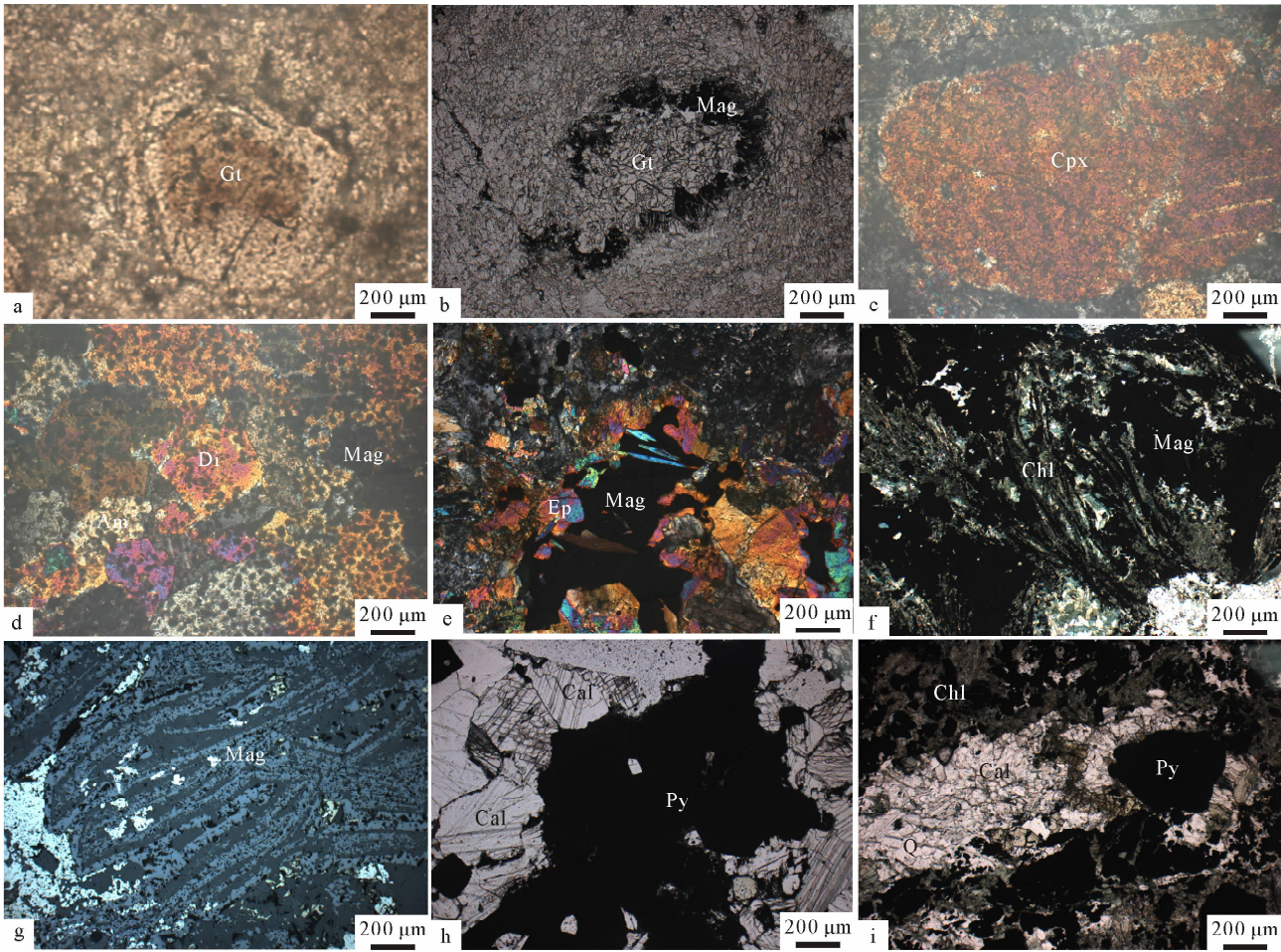


图 3 托斯巴斯套铁铜金矿床矽卡岩矿物特征

Fig. 3 Features of skarn minerals from the Tuosibasitao ore deposit

Gt—石榴子石; 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; Cal—方解石; Q—石英; Py—黄铁矿。

状、长柱状产出,多色性明显,正中突起,偶见闪石式解理,横断面对称消光。

石英-硫化物-碳酸盐阶段,主要形成黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、斑铜矿、自然金、钾长石、石英、方解石,是铜和金主要成矿阶段。黄铁矿、黄铜矿颗粒产于石英、方解石脉中及其两侧(图 3h~i)。

第Ⅱ期:表生期,主要形成褐铁矿、孔雀石、兰铜矿、黄钾铁钒和高岭土。

3 电子探针分析

3.1 样品及分析方法

对采自托斯巴斯套铁铜金矿区的 13 件样品中石榴子石、辉石、绿帘石及磁铁矿单矿物进行了电子探针分析,这些样品形成于矽卡岩阶段及退化蚀变阶段,岩石名称为石榴子石矽卡岩、绿帘石石榴子石矽卡岩、绿泥石石榴子石矽卡岩、含磁铁矿绿帘石矽卡岩、含磁铁矿石榴子石矽卡岩、绿帘石磁铁矿石、含黄铁矿磁铁矿石。

电子探针测试分析在中国地质大学(北京)地质测试中心完成,仪器为 EPMA-1600 型电子探针,测试加速电压 15 kV,束斑直径 1 μm,电流 18 × 10⁻⁸ A。

3.2 石榴子石分析

托斯巴斯套铁铜金矿床 9 件石榴子石分析结果见表 1。计算得出的石榴子石端员组分以钙铁榴石(And)为主,其变化范围为 31.79%~93.81%,平均 68.24%,其次是钙铝榴石(Gro=2.73%~59.23%,平均为 23.74%)与铁铝榴石(Alm=2.27%~8.41%,平均为 5.1%),少量锰铝榴石(0.62%~2.85%),部分样品中含少量的镁铝榴石(0.04%~2.22%)及钙铬榴石(0.07%~0.87%),属钙质矽卡岩。石榴子石端员组分图解(图 5)显示其端员组分为钙铁榴石-钙铝榴石系列,与新疆蒙库铁矿^[13]、新疆查岗尔铁矿^[14]、长江中下游地区矽卡岩型铁矿^[15-17]及世界大型矽卡岩型铁矿的石榴子石特征具有相似性^[18]。

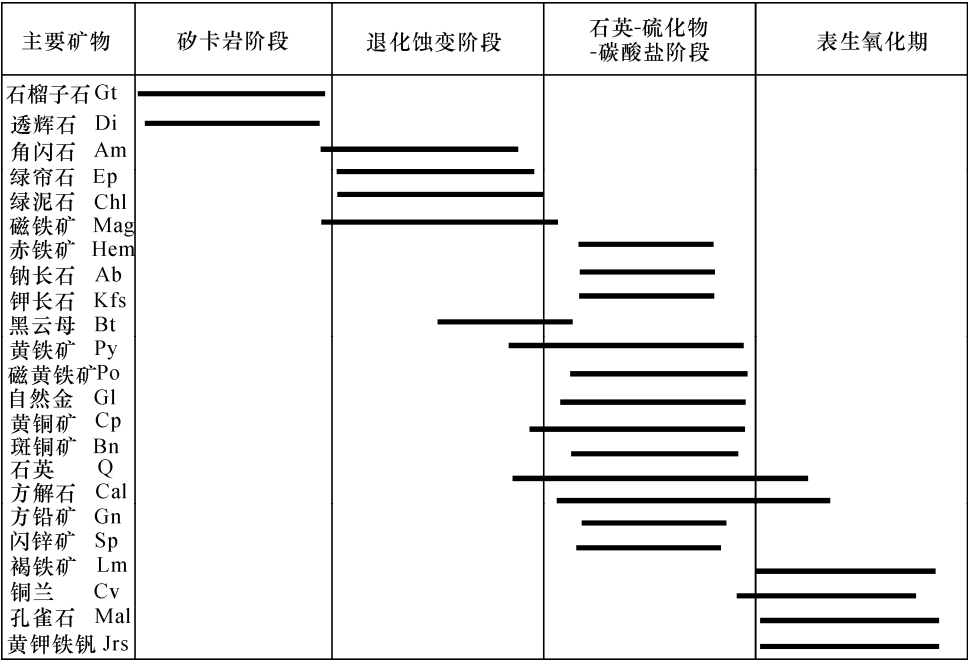


图 4 托斯巴斯套铁铜金矿床矿期次划分及矿物生成顺序

Fig. 4 Mineral sequence and ore-forming stages of the Tuosibasitao ore deposit

表 1 托斯巴斯套铁铜金矿床石榴子石电子探针分析结果及端员组分

Table 1 Electron microprobe analyses and end members of representative garnet from the Tuosibasitao ore deposit

元素	托斯巴斯套铁铜金矿床附近的矿石堆样品 $w_B/\%$								
	LSK60 - 1	LSK75 - 1	LSK75 - 2	LSK59 - 1	LSK59 - 2	LSK58 - 1	LSK58 - 2	LSK58 - 3	LSK58 - 4
SiO ₂	37.84	35.66	35.08	37.3	37.13	38.23	36.72	38.31	36.12
TiO ₂	0	0.2	0	0	0	0.05	2.23	1.67	3.17
Al ₂ O ₃	4.34	0.72	0.44	5.87	5.65	14.58	8.83	10.33	8.55
Cr ₂ O ₃	0.04	0	0.18	0.11	0	0.27	0	0.27	0.02
FeO	25.38	30.04	31.06	24.09	25.31	12.26	18.84	16.16	17.86
MnO	1.22	0.27	0.29	0.88	0.89	1.13	0.62	0.68	0.52
MgO	0.05	0.41	0.56	0	0	0.01	0.36	0.24	0.48
CaO	30.69	32.22	32.56	31.47	30.98	32.8	31.38	32.33	32.04
Si	3.0657	2.9467	2.8975	3.0134	3.0027	2.9974	2.9413	3.0066	2.8968
Ti	0	0.0124	0	0	0	0.0030	0.1344	0.0986	0.1913
Al	0.4144	0.0701	0.0428	0.5589	0.5385	1.3473	0.8336	0.9555	0.8082
Cr	0.0026	0	0.0118	0.0070	0	0.0167	0	0.0168	0.0013
Fe ³⁺	1.5392	1.9571	2.0138	1.4252	1.4597	0.6358	1.1160	0.9577	1.1319
Fe ²⁺	0.1804	0.1188	0.1318	0.2024	0.2520	0.1681	0.1461	0.1030	0.0660
Mn	0.0837	0.0189	0.0203	0.0602	0.0610	0.0750	0.0421	0.0452	0.0353
Mg	0.0060	0.0505	0.0690	0	0	0.0012	0.0430	0.0281	0.0574
Ca	2.6641	2.8527	2.8815	2.7240	2.6843	2.7554	2.6932	2.7186	2.7532
Ura	0.13	0	0.57	0.35	0	0.84	0	0.87	0.07
And	78.68	93.81	92.31	71.58	73.05	31.79	57.24	49.62	58.31
Pyr	0.21	1.66	2.22	0	0	0.04	1.47	0.97	1.97
Spe	2.85	0.62	0.65	2.02	2.03	2.50	1.44	1.56	1.21
Gro	11.98	2.73	5.05	19.28	16.51	59.23	34.85	43.42	36.18
Alm	6.15	3.91	4.25	6.78	8.41	5.60	5.00	3.56	2.27

注：Ura—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。

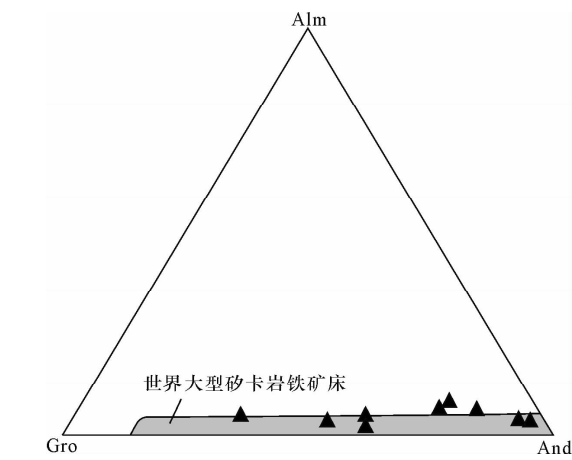


图 5 托斯巴斯套铁铜金矿床与世界大型矽卡岩铁矿床石榴子石端员组分图解(底图据 Meinert^[18])

Fig. 5 End members of garnet from the Tuosibasitao iron deposit and major skarn type iron deposits

And—钙铁榴石; Gro—钙铝榴石; Alm—铁铝榴石。

3.3 辉石分析

6 件辉石的电子探针分析结果及端员组分见表 2 和图 6。托斯巴斯套铁铜金矿矽卡岩矿物中辉石以透辉石为主,含少量普通辉石。透辉石的组分变化范围:Wo = 43. 89% ~ 46. 98%, En = 37. 10% ~ 43. 26%, Fs = 9. 70% ~ 17. 73%。1 件普通辉石的组分变化范围:En = 40. 36%, Fs = 31. 12%, Wo = 22. 72%。中国的矽卡岩型铁矿以富透辉石为特征,一般情况下透辉石含量能达到 50% ~ 90%,属钙质

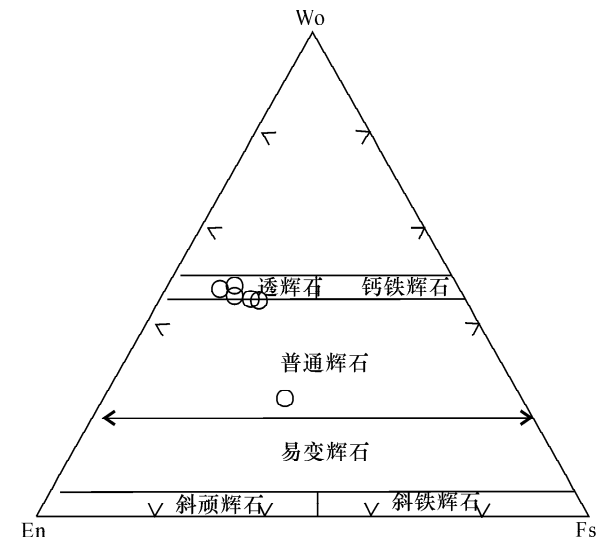


图 6 托斯巴斯套铁铜金矿床辉石分类图解(底图据 Morinoto 等^[23])

Fig. 6 Classification of clinopyroxenes from the Tuosibasitao iron deposit

Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—斜方铁辉石。

矽卡岩^[19-20]。托斯巴斯套铁铜金矿床矽卡岩中辉石以富透辉石为特征,与新疆蒙矿铁矿、西天山智博铁矿、海南石碌铁矿、长江中下游矽卡岩型铁矿的特征一致^[13,17,21-22]。

表 2 托斯巴斯套铁铜金矿床辉石电子探针分析结果、阳离子数及端员组分

Table 2 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of the representative clinopyroxenes from the Tuosibasitao iron deposit

元素	托斯巴斯套铁铜金矿附近的矿石堆			钻孔 ZK8004		矿石堆
	LSK42-1	LSK42-2	LSK42-3	ZK8004-9-1	ZK8004-10-2	LSK58-3
SiO ₂	53. 59	53. 12	52. 4	53. 54	48. 87	53. 65
TiO ₂	0. 08	0. 06	0	0. 16	1. 23	0. 15
Al ₂ O ₃	0. 45	0. 55	0. 73	0. 41	4. 6	0. 37
Cr ₂ O ₃	0	0	0. 09	0. 21	0. 07	0. 13
Fe ₂ O ₃	0	4. 72	1. 81	0	0	0
FeO	7. 4	7. 48	8. 59	7. 86	17. 32	6. 19
MnO	0. 3	0. 51	0. 48	0. 45	0. 99	0. 08
MgO	14. 37	14. 37	13. 98	14. 8	13. 19	15. 66
CaO	23. 47	23. 65	22. 37	22. 5	10. 33	23. 46
Na ₂ O	0. 27	0. 38	0. 29	0. 39	1. 46	0. 13
K ₂ O	0	0	0. 02	0	0. 63	0
Si	1. 9926	1. 9148	1. 9536	1. 9854	1. 8835	1. 9848
Al(IV)	0. 0074	0. 0016	0	0. 0146	0. 1165	0. 0152
Al(VI)	0. 0123	0	0	0. 0034	0. 0925	0. 0009
Ti	0. 0022	0. 0016	0	0. 0045	0. 0357	0. 0042
Cr	0	0	0. 0027	0. 0062	0. 0021	0. 0038
Fe ³⁺	0. 0152	0. 1280	0. 0508	0. 0361	0. 1345	0. 0173
Fe ²⁺	0. 2146	0. 2255	0. 2678	0. 2069	0. 4176	0. 1740
Mn	0. 0095	0. 0156	0. 0152	0. 0141	0. 0323	0. 0025
Mg	0. 7965	0. 7722	0. 7770	0. 8182	0. 7578	0. 8637
Ca	0. 9350	0. 9134	0. 8936	0. 8940	0. 4266	0. 9299
Na	0. 0195	0. 0266	0. 0210	0. 0280	0. 1091	0. 0093
K	0	0	0. 0010	0	0. 0310	0
Wo	46. 98	43. 89	44. 12	44. 76	22. 72	46. 57
En	40. 02	37. 10	38. 36	40. 96	40. 36	43. 26
Fs	12. 02	17. 73	16. 48	12. 88	31. 12	9. 70
Ac	0. 98	1. 28	1. 04	1. 40	5. 81	0. 47

注: Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—铁辉石; Ac—阳起石。

3.4 绿帘石分析

10 件绿帘石的电子探针分析结果(表 3)。表明绿帘石富铁(FeO = 13. 27% ~ 19. 73%)、富铝(Al₂O₃ = 19. 34% ~ 22. 81%)及钙(CaO = 19. 34% ~ 22. 81%)、贫硅(SiO₂ = 35. 99% ~ 37. 65%)及钛(TiO₂ = 0. 07% ~ 0. 38%)。

表3 托斯巴斯套铁铜金矿床绿帘石电子探针分析结果

元素	托斯巴斯套铁铜金矿附近的矿石堆								w _B /%	
									钻孔 ZK8004	
	LSK40-2	LSK40-3	LSK40-4	LSK40-5	LSK42-1	LSK42-2	LSK42-3	LSK85-2	ZK8004-10-1	ZK8004-10-2
SiO ₂	37.22	37.12	37.14	36.85	37.55	35.99	37.39	36.64	37.65	36.24
TiO ₂	0.21	0.07	0.28	0.17	0	0.14	0.37	0.38	0.09	0.24
Al ₂ O ₃	21.76	21.81	21.19	21.78	22.31	21.76	20.6	22.61	22.81	19.34
FeO ^T	14.84	14.93	15.63	15.04	14.39	15.98	15.99	13.97	13.27	19.73
Fe ₂ O ₃	2.23	2.24	2.34	2.26	2.16	2.4	2.4	2.1	1.99	2.96
MnO	0.09	0.17	0.18	0.46	0.16	0	0.21	0.08	0.45	0.6
MgO	0.08	0.04	0	0.16	0.17	0.1	0.19	0.34	0.48	0.3
CaO	22.28	21.62	21.61	21.76	21.79	21.06	22.19	21.64	21.37	20.23
总计	96.48	95.76	96.02	96.23	96.21	95.02	96.93	95.64	96.13	96.69

3.5 磁铁矿分析

10 件磁铁矿的电子探针分析结果见表 4。磁铁矿主要成分中 FeO^T变化于 89.47% ~ 93.51%, TiO₂ 含量为 0.02% ~ 0.26%, Al₂O₃ 含量为 0.12% ~ 0.93%, MnO 含量为 0.01% ~ 0.43%, MgO 含量为 0.02% ~ 0.22%, 与典型的接触交代型矿床钙矽卡岩中磁铁矿的化学组成 (TiO₂ 为 0.07% ~ 0.4%、Al₂O₃ 为 0.04% ~ 0.8%, MnO 为 0.1% ~ 2.15%, MgO 为 0.35% ~ 11.51%)^[24] 相比, TiO₂、Al₂O₃ 比较接近, MnO 含量明显低, MgO 则远远低于一般接触交代矿床的磁铁矿。磁铁矿的 TiO₂ - Al₂O₃ - MgO 图解可以反映磁铁矿成分与其成因之间的关系^[25-26]。图 7 中, 样品大多落在沉积岩-矽卡岩磁铁矿趋势区内; 图 8 中, 样品主要落在钙矽卡岩型及热液型范围, 两个样品点落在闪长岩与钙矽卡岩型及热液的过渡区内。由此说明, 托斯巴斯套铁铜金矿床的磁铁矿成因主要与钙矽卡岩有关。

4 微量及稀土元素分析

4.1 样品及分析方法

对采自托斯巴斯套铁铜金矿区的 5 件样品中的

磁铁矿单矿物进行了微量及稀土元素化学分析, 岩石名称为绿帘石磁铁矿石、含黄铁矿磁铁矿石。

微量和稀土元素测试分析在国家地质实验测试中心完成, 采用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 方法, 含量 > 10 × 10⁻⁶ 的元素分析精度优于 10%。

4.2 稀土元素特征

从表 5 看出, 磁铁矿总稀土元素含量较低, ΣREE 值为 2.87 × 10⁻⁶ ~ 11.48 × 10⁻⁶, 5 件样品的稀土元素配分模式 (图 9) 表现为轻稀土元素相对富集的右倾型 [LREEs/HREEs = 1.20 ~ 5.34; La_N/Yb_N = 0.87 ~ 6.32]。稀土特征比较复杂, 3 件样品具有负铈异常 (δEu = 0.69 ~ 0.81), 弱铈异常 (δCe = 0.77 ~ 0.87)。1 件样品 (LSK102) 有中等程度的正铈异常 (δEu = 1.36), 弱铈异常 (δCe = 0.81)。1 件样品 (样品编号 ZK8004-1) 铈异常不明显 (δEu = 1.06), 弱铈异常 (δCe = 0.83)。这与乔夏哈拉铁铜金矿床稀土元素特征 (ΣREEs = 0.73 × 10⁻⁶ ~ 63.90 × 10⁻⁶; δEu = 1.71 ~ 3.75^[27-28])、蒙库铁矿 (ΣREEs = 10.75 × 10⁻⁶ ~ 71.10 × 10⁻⁶; δEu = 1.33 ~ 2.96^[29]) 有一定差异。

表4 托斯巴斯套铁铜金矿床磁铁矿电子探针分析结果

元素	托斯巴斯套铁铜金矿床附近的矿石堆 w _B /%									
	LSK75-4	LSK78-3	LSK79-2	LSK80-2	LSK81-1	LSK82-1	LSK83-1	LSK83-3	LSK85-1	LSK85-3
SiO ₂	0.61	1.98	0.02	1.19	1.25	0.06	0.44	0.65	1.35	0.95
TiO ₂	0.02	0.08	0	0.26	0	0	0.23	0	0	0.04
Al ₂ O ₃	0.26	0.93	0.24	0.41	0.37	0.12	0.46	0	0.24	0.28
FeO ^T	90.89	89.47	92.92	91.94	91.36	92.57	91.66	93.51	90.36	92.04
MnO	0.43	0.28	0	0	0.34	0.01	0.39	0.29	0.15	0.12
MgO	0.04	0.22	0.07	0.1	0	0	0.08	0.17	0.02	0
CaO	0.05	0.21	0.16	-	0.09	0.1	0	0.34	0.27	0.14
Na ₂ O	0	0	0	0.28	0	0	0	0	0	0
K ₂ O	0	0	0	0.14	0	0	0	0	0	0
总计	92.29	93.16	93.41	94.32	93.41	92.87	93.26	94.96	92.39	93.56

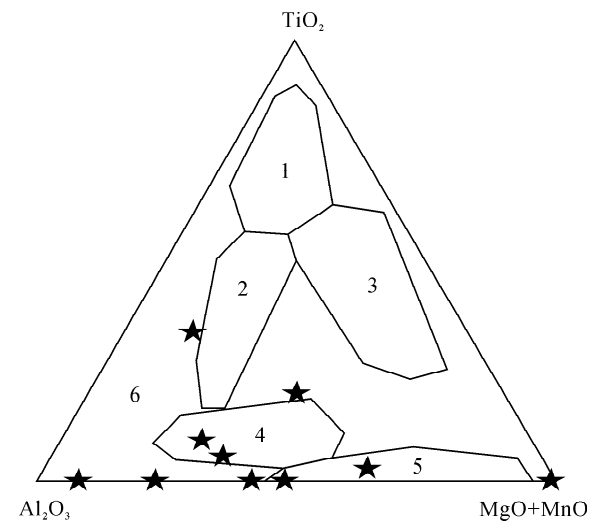


图 7 托斯巴斯套铁铜金矿床磁铁矿 TiO₂ - Al₂O₃ - MgO + MnO 图解

Fig. 7 TiO₂-Al₂O₃-MgO + MnO diagram of magnetite from the Tuosibasitao iron deposit

1—副矿物型; 2—岩浆熔离钛磁铁矿型; 3—火山岩型; 4—热液型; 5—砂卡岩型; 6—沉积变质型。

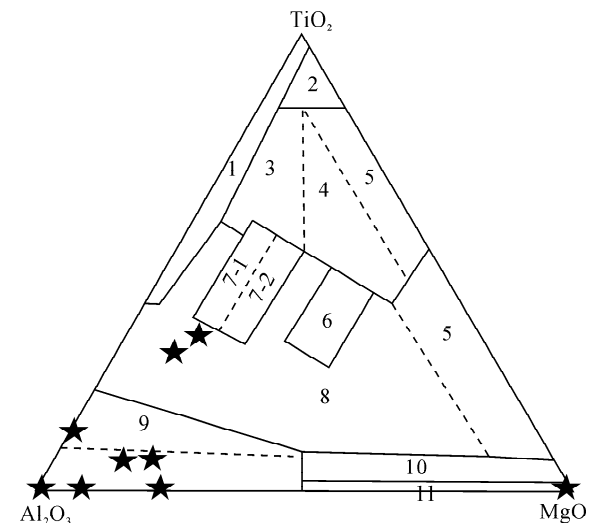


图 8 托斯巴斯套铁铜金矿床磁铁矿 TiO₂-Al₂O₃-MgO 图解

Fig. 8 TiO₂-Al₂O₃-MgO diagram of magnetite from the Tuosibasitao iron deposit

1—花岗岩区; 2—玄武岩区; 3—辉长岩区; 4—橄榄岩区; 5—碳酸岩区; 6—金伯利岩区; 7-1—角闪岩区; 7-2—闪长岩区; 8—过渡区; 9—热液型及钙砂卡岩型(虚线以上主要为深成热液型,以下为热液型及钙砂卡岩型); 10—热液型、镁砂卡岩型; 11—沉积变质、热液叠加型。

4.3 微量元素特征

本矿床磁铁矿与岩浆型(Sc、Ni、Zn、Cu、Ga 组合)有一定差别,而与砂卡岩型(Co、Ga、Ge 含量高)和热液型磁铁矿(Cu 含量较高)较为相似^[30]。不同

表 5 托斯巴斯套铁铜金矿床磁铁矿微量及稀土元素组成

Table 5 Trace elements and REEs compositions of magnetite from the Tuosibasitao iron deposit

元素	$w_B/(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$				
	托斯巴斯套矿附近的矿石堆			钻孔 ZK8004	矿石堆
	LSK100	LSK101	LSK102	ZK8004 - 1	LSK82
La	0.73	0.53	0.27	1.31	1.73
Ce	1.3	0.86	0.57	2.17	3.47
Pr	0.21	0.12	0.1	0.26	0.5
Nd	0.85	0.54	0.52	1.07	2.25
Sm	0.19	0.14	0.23	0.23	0.6
Eu	0.05	0.04	0.14	0.09	0.18
Gd	0.26	0.19	0.42	0.29	0.76
Tb	0.04	0.03	0.07	0.04	0.12
Dy	0.27	0.17	0.44	0.25	0.74
Ho	0.05	0.03	0.09	0.05	0.16
Er	0.15	0.1	0.24	0.15	0.45
Tm	0.02	0.02	0.03	0.02	0.06
Yb	0.16	0.09	0.21	0.14	0.39
Lu	0.03	0.01	0.03	0.02	0.07
Y	1.43	0.92	2.28	1.43	3.93
ΣREEs	4.31	2.87	3.36	6.09	11.48
LREEs	3.33	2.23	1.83	5.13	8.73
HREEs	0.98	0.64	1.53	0.96	2.75
$\frac{\text{LREEs}}{\text{HREEs}}$	3.40	3.48	1.20	5.34	3.17
$\frac{\text{La}_N}{\text{Yb}_N}$	3.08	3.98	0.87	6.32	3.00
δEu	0.69	0.75	1.36	1.06	0.81
δCe	0.77	0.77	0.81	0.83	0.87
Sc	6.62	2.31	5.1	2.42	9.76
Rb	4.53	0.59	3.09	0.86	4.7
Sr	28.9	20.9	14.6	32.6	14.2
Ba	8.69	7.44	17.3	3.76	23.5
Cr	613	810	258	891	286
Co	23.9	112	3.62	88.4	26.1
Ni	326	701	8.01	351	412
$\frac{\text{Ni}}{\text{Co}}$	13.64	6.26	2.21	3.97	15.79
V	246	162	125	435	119
Cu	166	269	78.6	368	1877
Pb	5.22	3.8	2.58	2.27	6.44
Zn	132	158	38	95.8	113
Hf	0.28	0.13	0.19	0.15	0.37
Ga	5.88	4.76	7.34	6.14	9.57
Ge	2.69	2.99	3.02	2.53	2.45
Nb	1.58	1.17	0.76	1.28	0.86
Ta	0.49	0.49	0.39	0.44	0.09
Th	0.17	0.08	0.15	0.13	0.21
U	0.36	0.24	0.92	0.64	0.53
Cd	0.17	0.06	0.04	0.4	0.22
In	0.04	0.06	0.03	0.07	0.18
Tl	0.14	0.05	0.04	0.03	0.02
As	14	11.2	8.72	40.1	17.1

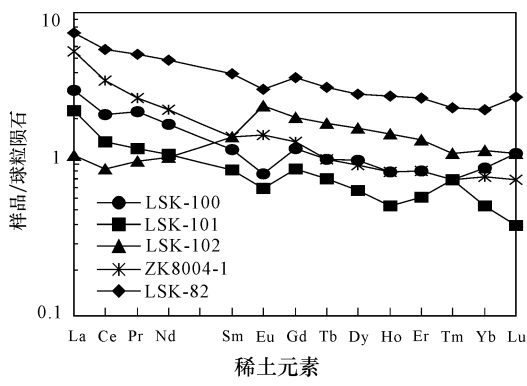


图9 托斯巴斯套铁铜金矿床磁铁矿稀土元素配分模式^[35]
Fig. 9 Chondrite-normalized REEs patterns of magnetite from the Tuosibasitao iron deposit^[35]

类型磁铁矿都含有 Co 和 Ni,一般是 Co 含量大于 Ni 含量,且不同成因磁铁矿在 Co、Ni 含量和 Ni/Co 比值上有明显差别^[31]。托斯巴斯套磁铁矿化学成分中 Co 的平均含量为 50.81 $\mu\text{g/g}$ (表 5),与矽卡岩型铁铜矿床磁铁矿(70 $\mu\text{g/g}$)较接近;Ni 的平均含量为 359.60 $\mu\text{g/g}$,介于矽卡岩型铜铁矿床磁铁矿(65 $\mu\text{g/g}$)和热液型铁铜矿床磁铁矿(440 $\mu\text{g/g}$)之间^[32]。磁铁矿的 Ni/Co 比值为变化较大,为 2.21 ~ 15.79,与典型的矽卡岩成因的磁铁矿(Ni/Co 小于 2^[32-33])存在一定差别。

一般认为 Ni 比 Co 更易于在地壳深部富集,较高的 Ni/Co 比值代表了深源的特征,且物质来源与基性火山活动有关^[34],托斯巴斯套磁铁矿 Ni/Co 较高,反映其成因与深源物质有关,这与矿床赋存于基性火山岩中有关。

5 讨论分析

5.1 矽卡岩的类型

近年来,一些学者提出:矽卡岩不仅仅形成于中酸性、中基性岩体与碳酸盐岩的接触带上,在中酸性、中基性岩体与火山岩围岩中也可以形成^[36-39]。根据矽卡岩生成机理的不同^[40],划分出变质矽卡岩和交代矽卡岩两大类,且提出:以火山岩为围岩的矽卡岩,属于交代矽卡岩,是大范围的岩浆热液流体渗透与火山岩反应的结果,并受热液流体性质控制。托斯巴斯套铁铜金矿床中矿体产于安山质火山角砾岩、含集块玄武质火山角砾岩与闪长玢岩的接触带内,矿体附近发育大量的矽卡岩矿物,矿体与矽卡岩密切共生。托斯巴斯套铁铜金矽卡岩矿物组分的研

究表明,其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,本文认为产于闪长(玢)岩岩体内外接触带中的矿体与围岩(安山质火山角砾岩、玄武质火山角砾岩、玄武岩)中的大量矽卡岩矿物是中酸性岩浆热液交代火山岩的结果,与典型的交代灰岩形成的矽卡岩有所不同。

交代矽卡岩按其矿物组成不同及其被交代围岩的差异,划分为钙矽卡岩和镁矽卡岩两类^[40]。钙矽卡岩主要由钙铁-钙铝系列石榴子石、透辉石-钙铁辉石系列辉石、硅灰石和方柱石等组成;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。在此基础上,又进一步划出了锰质矽卡岩和碱质矽卡岩,锰质矽卡岩的矿物组成有蔷薇辉石、铁铝榴石-锰铝榴石过渡系列石榴子石、锰透辉石、锰钙铁辉石、锰橄榄石和日光榴石等。其中,Fe 矿化主要与前两种类型有关,锰质矽卡岩主要与 Pb、Zn、Ag 矿化有关,碱质矽卡岩主要与 W、Sn、Be 矿化有关,Au 矿化大多产于离接触带有一定距离的钙铁辉石矽卡岩中^[36,41]。托斯巴斯套铁铜金矿体及其周围发育大量的矽卡岩矿物,主要类型为石榴子石矽卡岩、透辉石矽卡岩、绿帘石-透辉石矽卡岩、绿泥石-绿帘石矽卡岩、绿帘石矽卡岩。石榴子石端员组分以钙铁榴石-钙铝榴石系列为主,辉石以透辉石为主,绿帘石富铁富钙,这些特点表明托斯巴斯套铁铜金矿床矽卡岩具有钙矽卡岩特征。

5.2 矽卡岩与铁矿关系

托斯巴斯套铁铜金矿床中铁矿体呈脉状、透镜状赋存于中泥盆统北塔山组火山熔岩和火山碎屑岩与闪长(玢)岩的接触带中,矿体及其周围发育大量的矽卡岩矿物,矽卡岩与铁矿体沿岩脉外接触带呈不规则状分布,接触带上发育矽卡岩化与孔雀石化。磁铁矿的主量与微量元素特征表明,磁铁矿的形成与钙矽卡岩及热液作用有关。对我国矽卡岩型矿床的硫同位素组成进行研究发现^[42]:大多数矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值比较均一,变化范围较小,表明矿床的硫源是单一的深部岩浆来源,局部的高值说明有地壳硫源的混入。托斯巴斯套铁铜金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 变化于 0‰ ~ 3‰^[43],表明硫的来源比较单一,且为岩浆硫来源。目前,对世界上大量的不同类型矽卡岩型矿床的氢氧同位素研究表明,岩浆流体和大气降水在矽卡岩矿床形成中起到了重要的作用^[44-45]。氢氧同位素特征:石榴子石和方解石 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 值为 -144.0‰ ~ -84.0‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -2.4‰ ~ 3.5‰^[43],与成矿

流体主要来自于正常岩浆水或者是后期有大气降水混入的蒙库铁矿床(δD_{SMOW} 值为 $-127.0‰ \sim -81.0‰$, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 $-5.1‰ \sim 5.33‰$ ^[46])、湖南新田岭矽卡岩型矿床(δD_{SMOW} 值为 $-32.1‰ \sim -72.9‰$, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 $4.73‰ \sim 7.42‰$ ^[42])相似,表明成矿流体主要为岩浆水,混合大气降水。碳同位素特征: $\delta^{13}C_{PDB}$ 变化于 $-6.8‰ \sim -3.5‰$,成矿流体中碳主要来自闪长质岩浆。结合其野外地质特征,认为矿床中的矽卡岩是由岩浆热液流体交代北塔山组基性火山岩(熔岩和火山角砾岩)所形成,在矽卡岩阶段首先形成了钙铁榴石-钙铝榴石系列及透辉石等矿物,退化蚀变阶段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,伴随矽卡岩的退化蚀变作用,导致铁元素大量沉淀,形成了托斯巴斯套矽卡岩型磁铁矿矿体。在石英-硫化物-碳酸盐阶段,在闪长(玢)岩和玄武质火山岩的接触带上发育钾长石化、硅化、碳酸盐化等,铜、金等金属元素以硫化物的形式从流体中大量沉淀,矿化以细脉状、网脉状等充填于构造裂隙中,叠加在早期磁铁矿体之上,空间上具有“下铁下铜”的特征。

6 结语

本文分别利用电子探针、电感耦合等离子体质谱分析技术对托斯巴斯套铁铜金矿附近的石榴子石、辉石、绿帘石的化学组分及磁铁矿的主量及微量元素特征开展研究,结果表明矽卡岩为钙矽卡岩,磁铁矿与矽卡岩具有密切的关系。矽卡岩是由岩浆热液流体交代北塔山组基性火山岩而形成的,磁铁矿的形成与矽卡岩的退化变质作用有关。在石英-硫化物-碳酸盐阶段形成铜和金矿化。本文通过对托斯巴斯套铁铜金矿床中的矽卡岩矿物及磁铁矿的系统研究,初步厘清了矽卡岩的类型及其与矿化的关系,对铁铜金矿的成因认识、成矿规律及勘探工作具有一定的意义。

致谢: 电子探针分析实验得到了中国地质大学(北京)电子探针实验室尹京武和郝金华老师的悉心指导和帮助,微量与稀土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!

7 参考文献

[1] Sengor A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of

the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364: 299-307.

[2] Windley B F, Kroner A, Guo J H, Qu G S, Li Y Y, Zhang C. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution [J]. *Journal of Geology*, 2002, 110: 719-739.

[3] Xiao W J, Windley B F, Badarch G, Sun S, Li J Y, Qin K Z, Wang Z. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: Implications for the growth of Central Asia [J]. *Journal Geology Society*, 2004, 161: 339-342.

[4] Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, Chai F M, Wu H, Chen S P, Cheng L S, Yang J M, Zhang C Q. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 184-203.

[5] 张作衡,柴凤梅,杜安道,张招崇,闫升好,杨建民,屈文俊,王志良. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测年及成矿物质来源示踪[J]. 岩石矿物学杂志,2005,24(4): 285-293.

[6] 刘家远. 新疆青河老山口地区岩浆隐蔽爆破作用、爆破角砾岩及成矿意义[J]. 新疆地质,2001,19(4): 241-245.

[7] 李泰德. 新疆富蕴县乔夏哈拉金铜铁矿地质特征及成因分析[J]. 地质与勘探,2002,38(1): 18-21.

[8] 李泰德,王梓嘉. 新疆青河县老山口矿区IV矿段铁铜金矿成矿特征分析[J]. 新疆有色金属,2009(2): 19-25.

[9] 程剑. 新疆青河县老山口金铜铁矿IV矿段地质特征及成因探讨[J]. 新疆有色金属,2004(Z1): 22-25.

[10] 路彦明,聂凤军,范俊杰,云飞,李成文. 东准噶尔盆地东北缘发现氧化铁型铜-金(IOCG)矿床[J]. 地球学报,2009,30(2): 277-278.

[11] 何国琦,成守德,徐新,李锦轶,郝杰. 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,2004: 1-65.

[12] 吕书君,杨富全,柴凤梅,张希兵,姜丽萍,刘锋,张志欣,耿新霞,欧阳刘进. 东准噶尔北缘老山口铁铜金矿区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及意义[J]. 地质论评,2012,58(1): 149-164.

[13] Xu L G, Mao J W, Yang F Q, Li J G, Cai Y B, Zheng J M. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39: 423-440.

- [14] 洪为,张作衡,赵军,王志华,李凤鸣,石福品,刘兴忠. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志,2012, 31(2): 191 – 211.
- [15] 赵永鑫. 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,1992: 1 – 120.
- [16] 赵斌,李统锦,李昭平. 我国一些矿区矽卡岩中石榴子石的研究[J]. 矿物学报,1992(4): 296 – 304.
- [17] 束学福. 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, 2004, 23(3): 219 – 224.
- [18] Meinert L D. Skarns and skarn deposits [J]. *Geoscience Canada*, 1992, 19: 145 – 162.
- [19] 赵斌, Barton M D. 接触交代矽卡岩型矿床中石榴子石和辉石成分特点及其与矿化的关系[J]. 矿物学报,1987, 7(1): 1 – 8.
- [20] 赵一鸣,张铁男,林文蔚. 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,1997, 16(4): 318 – 329.
- [21] 徐林刚,毛景文,杨富全,叶会寿,郑建民,李建国,蔡永彪,查小玲,高建京. 新疆蒙库铁矿床矽卡岩矿物学特征及其意义[J]. 矿床地质,2007, 26(4): 455 – 463.
- [22] 蒋宗胜,张作衡,王志华,李凤鸣,田敬全. 新疆西天山智博铁矿床蚀变矿物学、矿物化学特征及矿床成因探讨[J]. 矿床地质,2012,31(5): 1051 – 1066.
- [23] Morimoto N, Fabries J, Ferguson A K. Nomenclature of pyroxenes [J]. *Mineralogical Magazine*, 1988, 52: 535 – 550.
- [24] 徐国风,邵洁涟. 磁铁矿的表型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探,1979(3): 30 – 37.
- [25] 陈光远,黎美华,汪雪芳. 弓长岭铁矿成因矿物学专辑[J]. 矿物岩石,1984, 4(2): 14 – 42.
- [26] 陈光远,孙岱生,殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆:重庆出版社,1987: 234 – 235.
- [27] 闫升好,张招崇,王义天,陈柏林,周刚,何立新. 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,2005, 24(1): 25 – 35.
- [28] 应立娟,王登红,梁婷,周汝洪,马军,屈文俊,陈振宇. 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,2006, 26(1): 59 – 68.
- [29] 杨富全,毛景文,徐林刚,张岩,刘锋,黄成林,周刚,刘国仁,代军治. 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,2007, 23(10): 2443 – 2456.
- [30] 阙梅英. 云南罗茨鹅头厂铁矿床主要铁矿物特征及矿床成因探讨[J]. 矿物岩石,1984(1): 57 – 69.
- [31] 叶庆同. 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,1982, 1(1): 44 – 51.
- [32] 王奎仁. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥:安徽教育出版社,1989: 108 – 129.
- [33] 汤蔡联. 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,1990(4): 32 – 36.
- [34] 严炳铨,吴克隆,王文腾. 福建漳州复式岩体磁铁矿的成因矿物学特征[J]. 福建地质,1993, 12(1): 1 – 16.
- [35] Taylor S R, Mclennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. Blackwell: Oxford Press, 1985: 1 – 312.
- [36] 赵一鸣. 矽卡岩矿床研究的某些重要新进展[J]. 矿床地质,2002, 21(2): 113 – 121.
- [37] 张遵遵,李泽琴,陈晓雁,侯春秋,陈实识. 矽卡岩的多成因性及矽卡岩型矿床找矿评价[J]. 地质找矿论丛,2011, 26(2): 157 – 161.
- [38] 程家龙,赵永鑫,柳丰华. 矽卡岩型矿床的成矿作用和地球化学研究综述[J]. 地质找矿论丛,2009, 24(4): 329 – 358.
- [39] Meinert L D, Lentz D R, Newberry D J. A special issue devoted to skarn deposits [J]. *Economic Geology*, 2000, 95: 1183 – 1184.
- [40] Einaudi M T, Meinert L D, Newberry R J. Skarn deposits [J]. *Economic Geology*, 1981, 75: 317 – 391.
- [41] 毛景文,李红艳,宋学信. 湖南柿竹园钨锡钼铋多金属矿床地质与地球化学[M]. 北京:地质出版社,1998: 1 – 215.
- [42] 赵一鸣,沈文彬. 中国矽卡岩型矿床[M]. 北京:地质出版社,1990.
- [43] 吕书君,张志欣,杨富全,柴凤梅,张希兵,刘锋,姜丽萍,耿新霞. 准噶尔北缘老山口铁铜金矿床成矿流体及成矿机制[J]. 矿床地质,2012,31(3): 517 – 534.
- [44] Lanfranchini M E, de Barrio R E, Etcheverry R O. Geology and chemistry of the El Abuelo calcic Fe-skarn and related Cu-(Ag)-bearing hydrothermal veins, Chubut Province, southern Argentina [J]. *Exploration and Mining Geology*, 2007, 16(3 – 4): 145 – 158.
- [45] Buicka I S, Cartwright I. Stable isotope constraints on the mechanism of fluid flow during contact metamorphism around the Marulan Batholith, NSW, Australia [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69 – 70: 291 – 295.
- [46] 杨富全,毛景文,柴凤梅,刘锋,周刚,耿新霞,刘国仁,徐林刚. 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,2008, 27(6): 659 – 680.

Mineralogical Characteristics of Skarn in Tuosibasitao Iron-Copper-Gold Deposits of the Northern Margin of Junggar, Xinjiang, and Their Geological Significance

LÜ Shu-jun^{1,2}, YANG Fu-quan^{3*}, CHAI Feng-mei⁴, ZHANG Zhi-xin⁵, LI Qiang³

(1. 407 Team of Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Hunan Province, Huaihua 418000, China;

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources; Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

4. Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, China;

5. Xinjiang Research Center for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: The Tuosibasitao Fe-Cu-Au mineral deposit mainly occurs in the contact zone between the diorite porphyrite and basaltic volcanic rock of Middle Devonian Beitashan Formation in the forms of massives, heterogeneous gobbets, veinlets, breccia and veinlet-disseminated. The ore bodies in the ore deposit occur as stratoids or lenses, surrounded by skarn. The major and trace elements in magnetite, and chemical components in garnet, clinopyroxene and epidote from Tuosibasitao deposit were studied by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) and Electron microprobe analyse. The results demonstrate that the end member of garnet is mainly grossularite and andradite. The composition of pyroxene was mainly diopside, with a small amount of augite. The epidote was enriched in Fe and Ca. The composition of these skarn minerals suggest that skarn in Tuosibasitao ore deposit is calcic skarn. In combination with the geological characteristics, it is possible that the skarns are formed by hydrothermal interaction with metamorphic volcanic, and the formation of magnetite is related to the retrogressive metamorphism of the skarn. Copper and gold mineralization occurred during the quartz-sulphide-carbonate period.

Key words: Tuosibasitao; the northern margin of Junggar; iron-copper-gold deposit; skarn; magnetite; electron microprobe analysis