

# 新疆西天山敦德铁矿区矽卡岩成因： 矿物学和稀土元素地球化学约束

葛松胜<sup>1</sup>，杜杨松<sup>1</sup>，王树星<sup>2</sup>，李大鹏<sup>3</sup>，庞振山<sup>4</sup>，  
沈立军<sup>1</sup>，王开虎<sup>1 5</sup>，晋晓明<sup>1</sup>

(1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室，中国地质大学 地球科学与资源学院，北京 100083；

2. 山东省第八地质矿产勘查院，山东 日照 276826；3. 山东省地质科学实验研究院，山东 济南 250013；

4. 中国地质调查局 发展研究中心，北京 100037；5. 中化地质矿山总局，北京 100101)

**摘要：**敦德铁矿是新疆阿吾拉勒铁矿带内近年新发现的大型铁矿之一，矿体赋存于下石炭统大哈拉军山组火山岩地层中，与矽卡岩密切共生。岩相学、矿相学及矿物化学研究表明，敦德铁矿矽卡岩主要分为火山变质成因矽卡岩和热液交代成因矽卡岩两种类型。火山变质期矽卡岩中石榴子石的端元组分以钙铝榴石为主，辉石端元组分主要为透辉石。热液交代期矽卡岩中石榴子石的端元组分以钙铁榴石为主，辉石端元组分主要为透辉石。火山变质期磁铁矿具有富  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、贫  $\text{MgO}$ 、高  $\text{TiO}_2$  的特点，属于岩浆成因的磁铁矿。热液交代期磁铁矿具有富  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ ，贫  $\text{MgO}$ 、低  $\text{TiO}_2$  的特点，为热液交代成因磁铁矿。本区矽卡岩与地层中的凝灰岩无论在稀土总量上还是在配分模式均十分相近。这暗示敦德铁矿床中的矽卡岩与正常的矽卡岩形成方式不同，不是中酸性岩浆与碳酸盐岩地层接触交代的产物，而是安山质凝灰岩经热变质及热液交代两种作用形成。磁铁矿矿石与矽卡岩在空间上共存，在时间上也经历了大致相同的发展演化。

**关键词：**敦德铁矿床；矽卡岩；电子探针分析；稀土元素；阿吾拉勒；新疆

中图分类号：P611.1；P57

文献标志码：A

文章编号：1000-8527(2014)01-0061-12

## Genesis of Skarn from Dundu Iron Deposit in Western Tianshan, Xinjiang: Mineralogical and REE Constraints

GE Song-sheng<sup>1</sup>, DU Yang-song<sup>1</sup>, WANG Shu-xing<sup>2</sup>, LI Da-peng<sup>3</sup>, PANG Zhen-shan<sup>4</sup>,  
SHEN Li-jun<sup>1</sup>, WANG Kai-hu<sup>1 5</sup>, JIN Xiao-ming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. The 8th Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong Province, Rizhao, Shandong 276826, China;

3. Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Jinan, Shandong 250013, China; 4. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China; 5. China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The Dundu iron deposit, discovered in recent years, is one of the large-scale iron deposits in the Awulale ore belt in Xinjiang. The ore body is hosted in the metamorphosed volcanoclastic-sedimentary sequence of Dahalajunshan Formation of Lower Carboniferous, and is obviously controlled by fracture and closely associated with skarn. Detailed study on main skarn minerals such as garnet, diopside and magnetite by means of electron microprobe analysis and microscopic observation show that the skarn from the Dundu iron deposit can be divided into two types, i. e. volcanic metamorphic skarn and hydrothermal metasomatic skarn. Volcanic metamorphic skarn is composed of garnet (mainly grossularite) and augite (mainly diopside) and was formed in a reductive environment. Hydrothermal metasomatic skarn is composed of garnet (mainly andradite) and augite

收稿日期：2013-03-05；改回日期：2013-09-23；责任编辑：戚开静。

基金项目：中国地质调查局项目“天山成矿带地质矿产调查评价”(1212011120497)。

作者简介：葛松胜，男，硕士研究生，1988年出生，矿物学、岩石学、矿床学专业，主要从事典型矿床研究工作。

Email: gesongsheng66@sina.com。

(mainly diopside), and was formed in a oxidizing environment. Volcanic metamorphic stage magnetite contains high  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  and low  $\text{MgO}$ , belonging to magmatic origin type. Hydrothermal metasomatic stage magnetite contains high  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ , low  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ , belonging to hydrothermal metasomatic type. The skarn has similar total REE content to that of the andesitic tuff in the stratum, and both show similar patterns. The above characteristics indicate that the skarn in the Dundee iron deposit might be resulted from thermal metamorphism and hydrothermal metasomatism. The iron ores and skarn spatially coexist and have experienced similar development and evolution.

**Key words:** Dundee iron deposit; skarn; electron microprobe analysis; REE; Awulale; Xinjiang

## 0 引言

新疆阿吾拉勒铁矿带位于博罗科努早古生代岛弧-弧后带和哈尔克-巴伦台早古生代沟弧带的交界部位,晚古生代区内构造活动复杂,火山-岩浆活动频繁,火山机构十分发育,尤其是石炭系的火山岩和华力西晚期的中基性岩体非常发育,成矿地质条件十分有利<sup>[1]</sup>。

近年来,在阿吾拉勒铁矿带内相继发现了式可布台、查岗诺尔、备战和敦德等十余处大型铁矿。这类矿床大多赋存于大哈拉军山组中基性火山岩中,矿石品位较高,矿体的顶底板多为绿帘石、石榴子石矽卡岩或者硅化、矽卡岩化的火山岩。前人通过对区域成矿规律<sup>[2-7]</sup>、大陆动力学<sup>[8-10]</sup>、火山岩岩石学和地球化学<sup>[11-16]</sup>以及火山成矿作用<sup>[17-22]</sup>的研究,认为带内铁矿床的形成和早石炭世火山岩以及后期的热液作用密切相关。但是对在各个矿区普遍产出的矽卡岩及其与成矿的关系尚缺乏系统的研究,这些矽卡岩或矿化较强,或与矿体密切共生。查明这类矽卡岩的矿物学、地球化学特征及形成机制,对研究区内岩浆热液过程及其与铁矿床形成的关系具有重要意义。本文分别选择阿吾拉勒裂谷带内敦德矿区的矽卡岩和磁铁铁矿石,在野外地质调查的基础上,对其进行详细的矿物学和稀土元素地球化学研究,分析矽卡岩的形成机制,并讨论其与成矿的关系,以期深化对研究区内铁矿床形成机制的认识。

## 1 地质背景和矿床地质特征

敦德铁矿床位于伊犁-中天山陆壳板块的伊犁晚古生代裂谷带内(图1(a))。矿区内出露的地层和岩浆岩主要有下石炭统大哈拉军山组第三亚组的火山岩地层、第四纪冰川堆积物(图1(b))以及矿区西南部出露的一套钾质花岗岩,花岗岩呈

条带状分布,与火山岩地层为侵入接触关系。大哈拉军山组地层主要为灰褐色、浅灰绿色、灰白色的玄武质(晶屑)凝灰岩,灰白色、浅肉红色、浅褐色安山岩、蚀变安山岩,灰绿色绿帘石、绿泥石化玄武质凝灰岩等。磁铁铁矿石赋存于本套地层中,矿体走向  $300^\circ \sim 330^\circ$ , 倾角  $50^\circ \sim 75^\circ$ , 构造上主要表现为走向呈北西向至南东向的单斜构造。

矿体在剖面上呈板状、透镜状产出。矿区目前圈定了7条铁矿体,其中原生露头3处,呈南北向及近东西向分布于矿区的东部及西部。矿区内主要的矿体为东部的隐伏矿体,其地表有一部分被第四系的残坡积物覆盖。矿体的围岩均有石榴子石-透辉石化、石榴子石化、透辉石化、绿帘石-绿帘石化、碳酸盐化等蚀变,这些蚀变与成矿关系密切,对矿床的形成具有一定的贡献。

矿区内矿石构造主要为块状构造、稠密浸染状构造、稀疏浸染状构造、脉状构造,矿石主要结构为自形-半自形粒状结构,磁铁晶晶体为五角十二面体和八面体的聚形。矿石矿物主要为磁铁矿,其次为方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿及极少量的黄铜矿,脉石矿物主要有辉石、石榴子石、方解石、绿帘石和绿泥石。本文研究的样品主要取自敦德铁矿床3788平硐(图2)及露天采场。

## 2 蚀变及矿化期次划分

矽卡岩化蚀变在矿区内普遍发育,尤其在与矿体相邻的凝灰岩内更为发育,区内的矽卡岩主要为石榴子石矽卡岩和透辉石-石榴子石矽卡岩,还有少量的透辉石-绿帘石矽卡岩。矽卡岩的矿物组合以石榴子石和透辉石为主,其次为绿帘石、绿泥石、石英和方解石等(图3,图4)。

通过对手标本及显微镜下矿物组合及穿插关系的观察,将敦德铁矿床的形成过程划分为火山

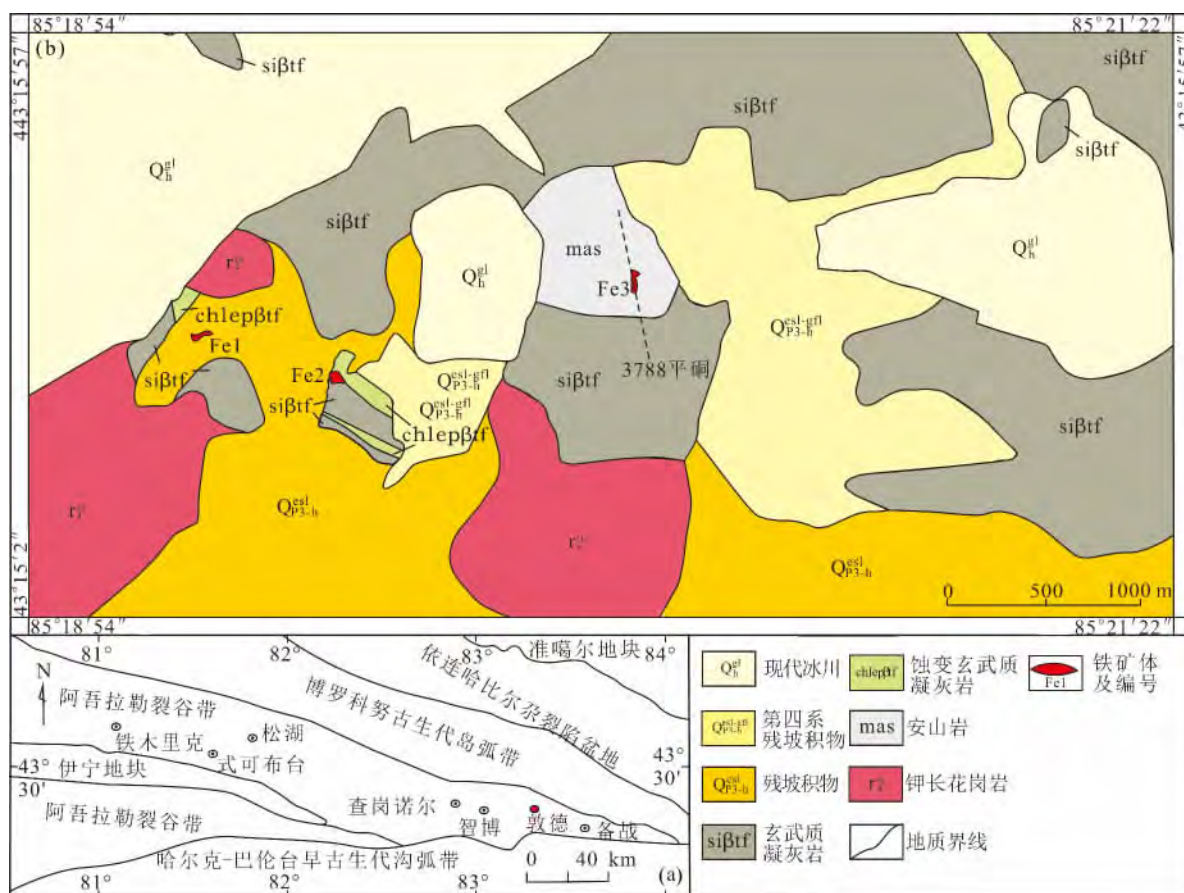


图1 西天山大地构造略图(a)及敦德矿区地质图(b)(据文献①修编)

Fig. 1 Tectonic sketch map of the Western Tianshan orogenic belt( a) and sketch geological map of the Dundee iron deposit areas( b) ( modified from reference ①)

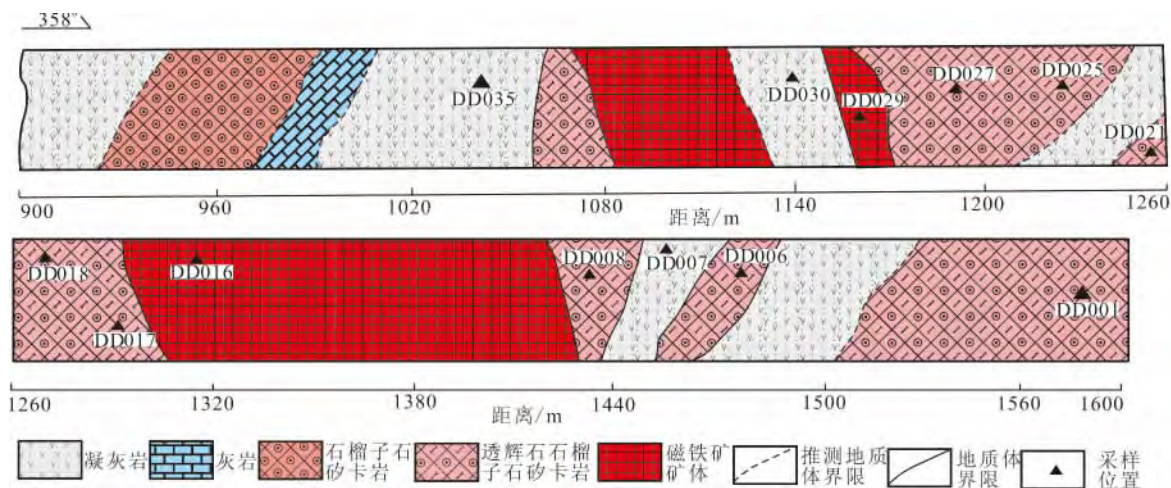


图2 敦德铁矿3788平硐示意图

Fig. 2 Schematic map of tunnel 3788 in the Dundee iron deposit

变质期和热液交代期,后者可进一步划分为4个阶段。在两次成矿期形成两种类型不同的矽卡岩,即火山变质成因矽卡岩和热液交代成因矽卡岩。

① 新疆地质矿产开发局第三地质大队. 新疆和静县敦德锌铁矿勘查报告. 2011.



砂卡岩与安山质凝灰岩界线模糊(图 3A), 安山质凝灰岩中可见磁铁矿颗粒(图 3B), 部分未蚀变完全的凝灰岩中残留有斜长石斑晶(图 3C)。火山变质期形成的矿物主要是石榴子石、透辉石及磁铁矿。石榴子石主要为细粒-粗粒结构, 呈浅棕-褐棕色, 自形-半自形晶粒, 粒径 0.05 ~ 0.80 mm。透辉石自形-半自形粒状或短柱状, 正交偏光下为二级蓝绿色至橙黄色, 粒径为 0.30 ~ 0.50 mm(图 3C 和 D)。火山变质期磁铁矿石主要由安山质凝灰岩中的磁铁矿富集形成, 在火山变质期

砂卡岩中可见由磁铁矿细小颗粒组成的团块状磁铁矿(图 3D)。部分样品中可见火山变质期石榴子石被热液交代期石榴子石穿插交代(图 3E) 以及被穿插交代的石榴子石内部保留火山岩的副矿物(如磷灰石(图 3F)、锆石等)的现象。

## 2.2 热液交代期

安山质凝灰岩受到后期热液的交代作用(图 4A), 主要形成石榴子石-透辉石砂卡岩和绿帘石-透辉石砂卡岩, 在热液交代期可形成浸染状、块状的磁铁矿。

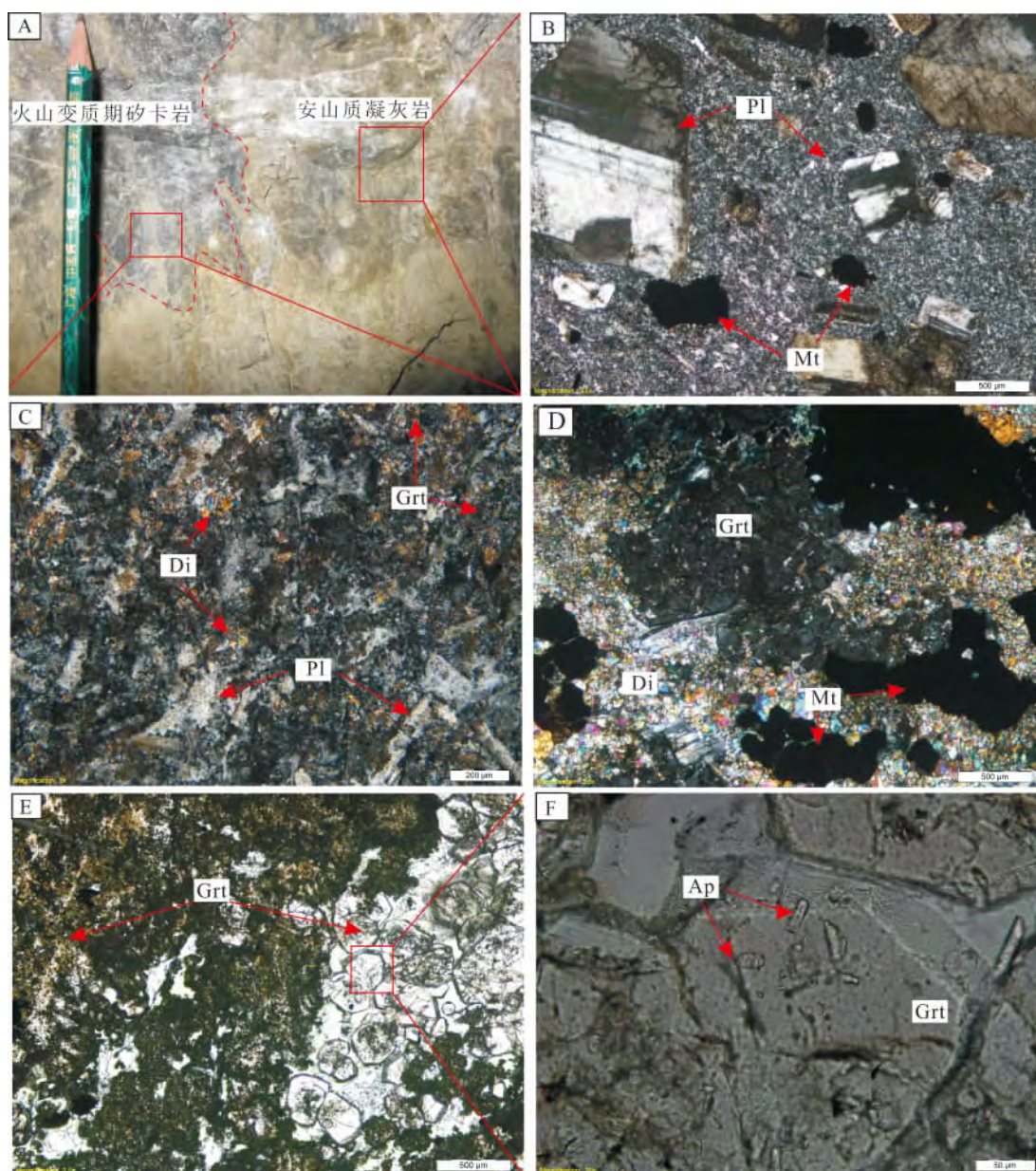


图 3 新疆敦德铁矿床火山变质期矿物学特征

Fig. 3 Mineral features of volcanic metamorphic stage from the Dundee iron deposit in Xinjiang

A. 火山变质期砂卡岩与安山质凝灰岩界限模糊; B. 磁铁矿 (Mt) 充填于斜长石斑晶 (Pl) 之间 (正交偏光); C. 安山质凝灰岩受热发生砂卡岩化蚀变 (正交偏光); D. 变质砂卡岩中磁铁矿交代透辉石 (Di) 和石榴子石 (Grt) (正交偏光); E. 热液交代期石榴子石穿插交代早期火山变质期石榴子石 (单偏光); F. 火山变质期石榴子石内部可见磷灰石 (Ap) (单偏光)



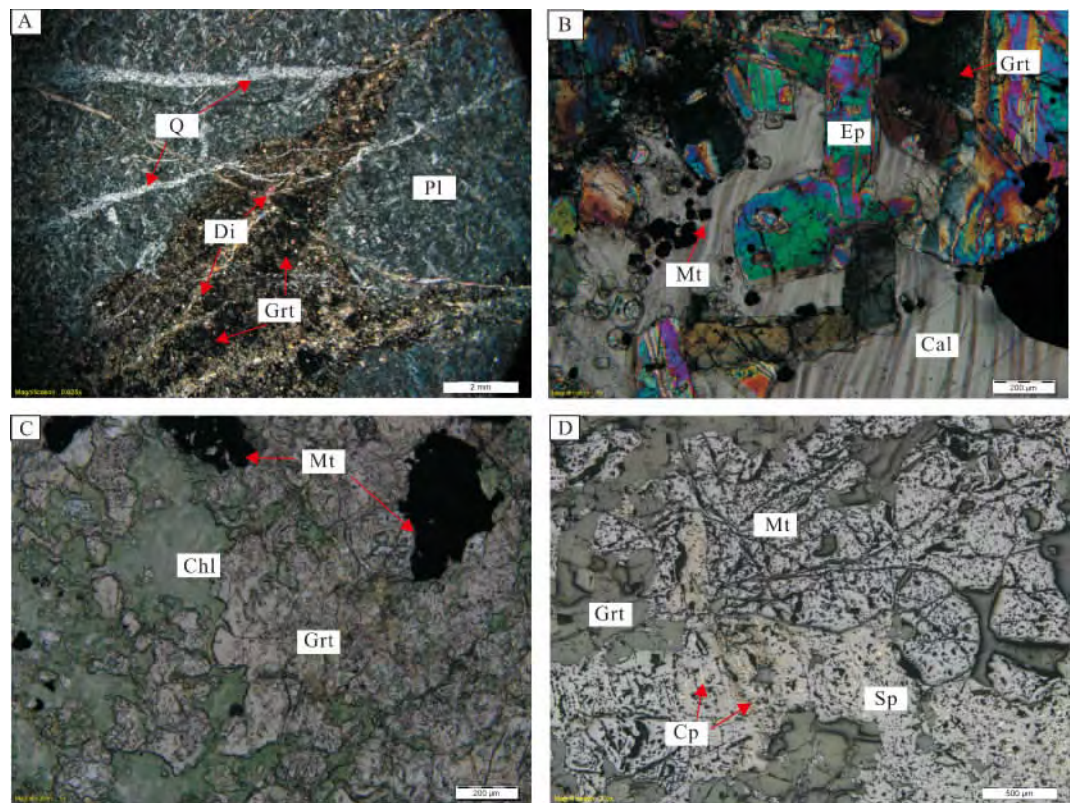


图 4 新疆敦德铁矿床热液交代期矿物学特征

Fig. 4 Mineral features of hydrothermal metasomatic stage from the Dundee iron deposit in Xinjiang  
A. 热液沿裂隙交代安山质凝灰岩形成石榴子石 (Grt) 和透辉石 (Di) (正交偏光); B. 绿帘石 (Ep) 交代石榴子石 (正交偏光); C. 绿泥石 (Chl) 交代石榴子石 (单偏光); D. 含乳滴状黄铜矿 (Cp) 的闪锌矿 (Sp) 交代磁铁矿 (Mt) (反射光)

早矽卡岩阶段主要形成石榴子石、透辉石等矿物，属于无水矽卡岩阶段。石榴子石为热液交代期矽卡岩中最常见的矿物之一，呈黄褐色(图 4A, B, C)。透辉石在单偏光下呈淡绿色，正交偏光下为二级蓝绿色至橙黄色，粒径 0.10 ~ 0.40 mm，镜下多为自形一半自形粒状或短柱状，与石榴子石共生，弱多色性，正高突起，具辉石式解理，横断面对称消光(图 4A)；晚矽卡岩阶段主要形成磁铁矿、绿帘石、绿泥石等，属于含水矽卡岩阶段，是主要的成矿阶段。绿帘石在单偏光镜下呈草绿 - 黄绿色，半自形晶粒状(图 4B)，粒度为 0.05 ~ 0.15 mm，正交偏光镜下为 II - III 级不均匀的干涉色，正高突起。绿泥石呈深绿色，粒度一般在 0.1 mm 左右，呈片状、板状交代早期形成的石榴子石(图 4C)。磁铁矿为它形一半自形晶粒状，部分呈自形晶粒状，呈浸染状、稠密浸染状及致密块状分布(图 4C, D)，部分磁铁矿中含有少量的脉石矿物及金属硫化物包裹体。石英硫化物阶段主要形成金属硫化物、石英、方解石等，金属硫化物主要为闪锌矿、黄铁矿，其次为黄铜

矿和磁黄铁矿，呈星点状、细脉状、浸染状、团块状产出于石英脉中及两侧，部分闪锌矿中可见有乳滴状黄铜矿产出(图 4D)。到碳酸盐阶段，方解石主要以脉体形式贯入裂隙中，脉体大小不一，细脉宽仅几毫米，粗脉粒径可达 5 ~ 8 cm，常见自形程度较高的石榴子石。

敦德铁矿床矿物生成顺序见图 5。

矿 物	火山变质期	热液交代期			
		早矽卡岩阶段	晚矽卡岩阶段	石英-硫化物阶段	碳酸盐阶段
石榴子石	——	——			
透辉石	——	——			
绿帘石			——		
绿泥石			——		
磁铁矿	——		——		
石英				——	——
黄铁矿				——	
黄铜矿				——	
磁黄铁矿				——	
闪锌矿				——	
方解石					——

图 5 敦德铁矿床矿物生成顺序表

Fig. 5 Mineral paragenesis in the Dundee iron deposit

### 3 矿物学

本次研究中主要矽卡岩矿物及磁铁矿的矿物学分析在中国地质大学(北京) 科学研究院电子探针室完成, 仪器型号为 EPMA-1600 型电子探针分析仪, 测试条件为加速电压 15 kV, 探针电流  $18 \times 10^{-8}$  A, 束斑直径 1  $\mu\text{m}$ 。

#### 3.1 石榴子石

敦德铁矿两期石榴子石均为钙质系列(表 1, 图 6)。火山变质期石榴子石端元组分(DD008、DD018、DD027)以钙铝榴石(Gro)为主, 其变化范围为 55.39% ~ 76.59%, 其次是钙铁榴石(And, 6.84% ~ 33.26%) 和铁铝榴石(Alm, 5.53% ~ 11.77%) 以及少量的锰铝榴石(Spe, 3.75% ~ 4.65%) 和镁铝榴石(Pyr, 0.73% ~ 1.90%)。热液交代期石榴子石的端元组分(DD059、DD072、DD076)以钙铁榴石为主, 其变化范围是 78.09% ~ 89.22%, 其次是钙铝榴石(Gro, 7.67% ~ 16.37%) 和铁铝榴石(Alm, 1.43% ~ 6.64%) 以及少量的镁铝榴石(Pyr, 0.79% ~ 2.07%) 和锰铝榴石(Spe, 0.26% ~ 1.04%)。

石榴子石的端元组分图解(图 6)显示, 敦德铁矿的石榴子石为钙铝榴石-钙铁榴石系列, 这种特点与长江中下游<sup>[23-24]</sup>、新疆阿尔泰<sup>[25]</sup>、新疆蒙库<sup>[26]</sup> 以及青海祁漫塔格地区<sup>[27]</sup> 矽卡岩型铁矿的石榴子石特征一致, 与世界上主要的大型矽卡岩型铁矿的石榴子石的特点也具有可比性。

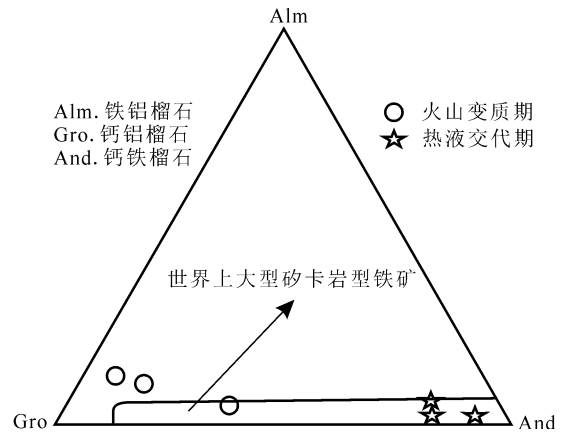


图 6 敦德铁矿床与世界上大型矽卡岩型铁矿床石榴子石端元组分图解(底图据文献 [28])

Fig. 6 End members of garnet from the Dundee iron deposit and major skarn iron deposits in the world (base map after reference [28])

#### 3.2 辉石

由表 2 及图 7 可知, 敦德铁矿无论火山变质期还是热液交代期, 矽卡岩中的辉石均以透辉石为主。辉石的组分变化范围分别为: Jo, 1.38% ~ 6.62%; Di, 75.19% ~ 90.75%; Hd, 7.87% ~ 22.41%。一般情况下, 与矽卡岩型铁矿有关的辉石主要为透辉石-钙铁辉石系列, 其中钙铁辉石占辉石总数的 80% 以上, 其他种类辉石常小于 10%<sup>[29-30]</sup>, 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% ~ 90%, 属钙质矽卡岩<sup>[23,31]</sup>。敦德铁矿矽卡岩中辉石以富透辉石为特征, 与中国主要矽卡岩型铁矿中钙质矽卡

表 1 敦德铁矿床石榴子石电子探针分析结果( $w_B/\%$ )

Table 1 Results of electron microprobe analyses of representative garnets from the Dundee iron deposit(%)

期次	样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	氧化物总量	Si	Ti
火山变质期	DD008	38.02	0.17	13.40	12.28	1.75	0.48	31.23	0.11	—	97.44	3.036	0.010
	DD018	38.42	0.84	16.89	8.79	2.12	0.19	30.56	0.12	—	97.93	3.031	0.050
	DD027	39.20	0.76	18.07	7.61	1.76	0.28	30.99	0.01	—	98.68	3.054	0.045
热液交代期	DD059	34.77	0.02	2.71	25.26	0.44	0.50	32.47	0.07	—	96.18	2.932	0.001
	DD072	35.86	0.41	4.64	23.26	0.29	0.29	32.29	0.10	—	97.14	2.966	0.026
	DD076	36.35	0.05	3.45	24.94	0.11	0.11	31.00	0.10	—	96.19	3.051	0.003
期次	样品号	Al	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn	Mg	Ca	离子总量	And	Pyr	Spe	Gro	Alm
火山变质期	DD008	1.261	0.668	0.167	0.118	0.057	2.672	7.989	33.260	1.900	3.930	55.390	5.530
	DD018	1.570	0.290	0.301	0.142	0.022	2.583	7.989	14.260	0.730	4.650	70.490	9.870
	DD027	1.659	0.141	0.365	0.116	0.033	2.587	8.001	6.840	1.050	3.750	76.590	11.770
热液交代期	DD059	0.269	1.801	—	0.031	0.063	2.934	8.032	89.221	2.072	1.036	7.672	—
	DD072	0.452	1.585	0.042	0.020	0.036	2.862	7.989	80.314	1.208	0.681	16.372	1.425
	DD076	0.341	1.572	0.200	0.008	0.024	2.788	7.989	78.090	0.790	0.260	14.230	6.640

注: TFeO 为全铁氧化物, 包含 Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 的氧化物 “—” 表示低于检测限; And 为钙铁榴石; Pyr 为镁铝榴石; Spe 为锰铝榴石; Gro 为钙铝榴石; Alm 为铁铝榴石; And + Pyr + Spe + Gro + Alm = 1; 探针数据由中国地质大学(北京) 科学研究院电子探针室分析测试。

表 2 敦德铁矿床辉石电子探针分析结果(  $w_B/\%$  )

Table 2 Results of electron microprobe analyses of representative clinopyroxenes from the Dundee iron deposit( % )

期次	样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	氧化物总量	Si	Al <sup>4+</sup>
火山变质期	DD008	51.61	0.23	2.30	5.51	0.92	14.80	23.33	0.14	—	98.84	1.924	0.076
	DD017	54.04	—	0.09	5.08	0.69	15.06	24.13	0.24	—	99.33	2.005	—
	DD018	51.14	0.08	2.45	7.11	0.77	13.68	23.46	0.10	—	98.79	1.920	0.080
	DD025	53.49	0.01	1.17	5.62	0.80	14.46	23.50	0.09	—	99.14	1.989	0.011
热液交代期	DD060	53.17	—	0.79	3.55	2.16	15.26	24.01	0.07	—	99.01	1.977	0.023
	DD064	54.80	0.25	—	2.53	0.45	16.82	24.09	0.12	—	99.06	2.011	—
	DD076	53.90	—	1.82	3.42	0.68	15.68	23.79	—	—	99.29	1.979	0.021

期次	样品号	Al <sup>6+</sup>	Ti	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn	Mg	Ca	原子总含量	Jo	Di	Hd
火山变质期	DD008	0.025	0.006	0.047	0.129	0.029	0.823	0.932	4.001	2.83	80.10	17.07
	DD017	0.004	—	0.003	0.159	0.022	0.833	0.959	4.001	2.13	81.96	15.91
	DD018	0.029	0.002	0.052	0.177	0.024	0.766	0.944	4.001	2.40	75.19	22.41
	DD025	0.040	—	—	0.180	0.025	0.801	0.936	3.989	2.50	79.62	17.87
热液交代期	DD060	0.012	—	0.015	0.098	0.068	0.846	0.957	4.000	6.62	82.37	11.01
	DD064	—	0.007	—	0.080	0.014	0.920	0.947	3.987	1.38	90.75	7.87
	DD076	0.058	—	—	0.108	0.021	0.858	0.936	3.982	2.14	86.92	10.94

注: TFeO 为全铁氧化物, 包含 Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 的氧化物 “—”表示低于检测限; Jo 为锰钙辉石; Di 为透辉石; Hd 为钙铁辉石; Jo + Di + Hd = 1; 数据由中国地质大学(北京) 科学研究院电子探针室分析测试。

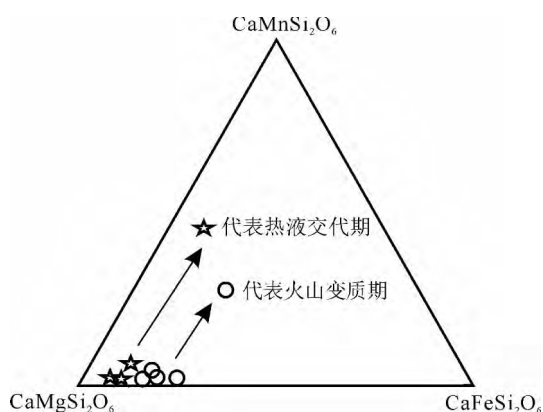


图 7 敦德铁矿床辉石分类图解(底图据文献 [32])

Fig. 7 Classification of clinopyroxenes from the Dundee iron deposit( base map after reference [32])

岩<sup>[32]</sup>中富透辉石的特点一致(图 7)。此外,与火山变质期矽卡岩中透辉石相比,热液交代期矽卡岩中透辉石的含铁量较低(图 7),显示从成矿的早期到成矿的晚期辉石的铁质有析出的趋势。

### 3.3 磁铁矿

根据矿物共生组合及相互穿插关系,可将本区磁铁矿分为火山变质期磁铁矿和热液交代期磁铁矿两种类型,对两期的磁铁矿进行电子探针分析,结果列于表 3。

火山变质期的磁铁矿的主要组成为 SiO<sub>2</sub> (0 ~ 0.98%)、TiO<sub>2</sub> (0.63% ~ 3.72%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.28%

~ 2.01%)、MnO (0 ~ 0.52%)、MgO (0 ~ 0.03%)、FeO (29.67% ~ 31.35%, 平均 30.31%) 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (62.27% ~ 65.64%, 平均 63.98%)。火山变质期磁铁矿具有富 Al、Mn, 贫 Mg, 高 Ti 的特点。与岩浆型铁矿中磁铁矿的化学成分标型特征相似<sup>[33]</sup>, 但是 FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量均低于理论值, 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO 含量偏高, 这可能是磁铁矿在重结晶的过程中, 混入了一定量的铝、锰所致。在磁铁矿的 TiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - MgO 成因图解(图 8)中, 火山变质期磁铁矿落入酸性 - 碱性岩浆区。

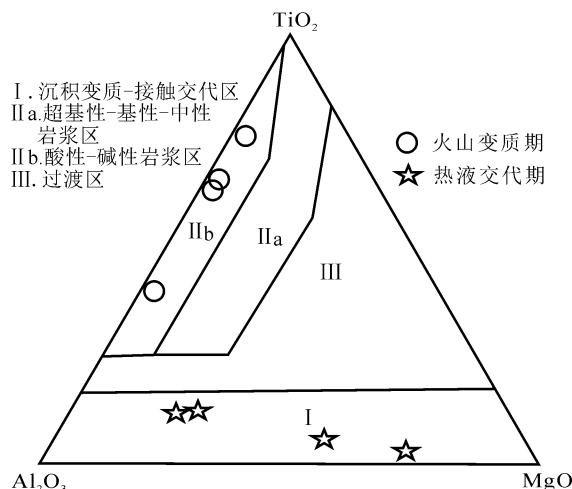


图 8 敦德铁矿磁铁矿成因图解(底图据文献 [36])

Fig. 8 Ternary plot of magnetite from the Dundee iron deposit (base map after reference [36])

表 3 敦德铁矿床磁铁矿电子探针分析结果(  $w_B/\%$  )

Table 3 Results of electron microprobe analyses of representative magnetites from the Dundee iron deposit( % )

期次	样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	氧化物总量	
火山变质期	DD001-1	—	3.72	2.01	86.65	0.50	0.03	—	—	—	92.91	
	DD001-2	0.19	0.71	0.98	88.43	0.52	—	—	—	—	90.83	
	DD001-3	0.98	0.95	0.28	88.63	—	—	—	—	—	90.84	
	DD001-4	0.15	0.63	0.32	89.01	0.32	—	—	—	—	90.43	
热液交代期	DD029-1	—	0.18	1.46	87.00	1.39	0.66	—	—	—	90.68	
	DD029-3	—	0.43	2.29	87.62	1.31	0.71	0.11	—	—	92.47	
	DD049-3	0.09	0.07	0.44	89.78	0.73	0.60	0.01	0.37	0.02	92.11	
	DD049-4	0.20	0.04	0.30	88.03	1.78	0.87	—	0.16	—	91.38	
期次	样品号	Si	Ti	Al	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn	Mg	Ca	Na	K	原子总含量
火山变质期	DD001-1	0.005	0.016	0.013	1.936	1.014	0.009	—	—	—	—	2.994
	DD001-2	—	0.017	0.139	1.807	0.963	0.050	—	—	—	—	2.975
	DD001-3	0.005	0.015	0.105	1.838	0.931	0.046	0.036	—	—	—	2.976
	DD001-4	0.006	0.018	0.117	1.816	0.934	0.048	0.035	—	—	—	2.974
热液交代期	DD029-1	—	0.005	0.060	1.923	0.922	0.041	0.034	—	—	—	2.984
	DD029-3	—	0.011	0.091	1.874	0.926	0.038	0.036	0.004	—	—	2.979
	DD049-3	0.003	0.002	0.018	1.998	0.891	0.021	0.031	—	0.025	0.001	2.989
	DD049-4	0.007	0.001	0.012	1.981	0.877	0.052	0.045	—	0.011	—	2.986

注: TFeO 为全铁氧化物, 包含 Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 的氧化物 “—” 表示低于检测限; 数据由中国地质大学(北京) 科学研究院电子探针室分析测试。

热液交代期的磁铁矿的主要组成为 SiO<sub>2</sub> ( 0 ~ 0.20% )、TiO<sub>2</sub> ( 0.04% ~ 0.43% )、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( 0.30% ~ 2.29% )、MnO ( 0.73% ~ 1.78% )、MgO ( 0.60% ~ 0.87% )、FeO ( 27.70% ~ 29.70% , 平均 28.67% ) 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( 65.89% ~ 69.77% , 平均 67.57% )。热液交代期磁铁矿具富 Al、Mn, 贫 Mg, 低 Ti 的特点, 本期磁铁矿具有较低的 TiO<sub>2</sub> 含量, 明显区别于火山变质期磁铁矿, 与钙质矽卡岩型铁矿中的磁铁矿<sup>[33-35]</sup> 组成类似。在磁铁矿的 TiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - MgO 成因图解(图 8) 中, 热液交代期磁铁矿落入沉积变质 - 接触交代区。

#### 4 稀土元素地球化学

本研究在对敦德铁矿中凝灰岩、矽卡岩及磁铁矿矿石详细手标本和显微镜观察后, 挑选较新鲜的样品并将其碎成粉末, 利用核工业北京地质研究院分析测试研究中心的 Element I 型 HR - ICP - MS( 美国 Finnigan MAT 制造) 进行微量元素化学分析, 测试结果见表 4。

采自 3788 平硐的 2 件凝灰岩样品( DD007、DD035) 具有相似的稀土元素配分模式(图 9), 均表现为轻稀土富集、Eu 负异常的右倾模式。稀土总量(  $\Sigma\text{REE}$  ,  $157.63 \times 10^{-6} \sim 161.89 \times 10^{-6}$  ) 较高, 轻、重稀土分异较明显,  $w(\Sigma\text{LREE}) / w(\Sigma\text{HREE})$  为 3.76 ~ 4.62, LREE 和 HREE 内部均有分异, 其

中( La/Sm )<sub>N</sub> 为 1.78 ~ 2.94, ( Gd/Yb )<sub>N</sub> 为 1.13 ~ 1.15, 但 LREE 本身分异更强烈一些; Eu(  $\delta\text{Eu} = 0.61 \sim 0.88$  ) 和 Ce(  $\delta\text{Ce} = 0.86 \sim 0.97$  ) 均有轻微的负异常, 这可能与岩浆源区氧逸度较低且存在斜长石的分离结晶作用有关。

矽卡岩火山变质期矽卡岩( DD027) 和热液交代期矽卡岩( DD006) 的稀土元素配分模式(图 9) 明显不同。虽然二者稀土总量(  $\Sigma\text{REE}$  分别为  $181.08 \times 10^{-6}$  和  $141.33 \times 10^{-6}$  ) 相近, 轻、重稀土分异均较明显,  $\Sigma\text{LREE} / \Sigma\text{HREE}$  分别为 5.24 和 4.15, Ce(  $\delta\text{Ce}$  分别为 0.90 和 0.94) 均显示轻微的负异常, 但是火山变质期矽卡岩( DD027) 中 Eu(  $\delta\text{Eu} = 0.90$  ) 为负异常, 而热液交代期矽卡岩( DD006) 则显示为 Eu(  $\delta\text{Eu} = 1.45$  ) 正异常。两期矽卡岩 Eu 异常现象反映其形成环境的变化, 火山变质期矽卡岩具 Eu 负异常, 表明 Eu 以 Eu<sup>2+</sup> 状态存在并在还原条件下进入矽卡岩中的石榴子石中<sup>[37-38]</sup>。其原因是八面体配位的 Eu<sup>2+</sup> 离子半径大于石榴子石中八配位的 Ca<sup>2+</sup>, 不利于类质同象置换, 从而导致 Eu 亏损。而八配位的 Eu<sup>3+</sup> 与石榴子石中八配位的 Ca<sup>2+</sup> 离子半径相近, 易于进行类质同象置换, 从而导致 Eu 正异常。热液交代期矽卡岩具 Eu 正异常, 说明矽卡岩在较高温度及氧化的条件下形成, Eu 以 Eu<sup>3+</sup> 的形式赋存于矽卡岩中的石榴子石中。



表 4 敦德铁矿床岩石稀土元素含量特征

Table 4 Contents and relevant parameters of REEs of rocks from the Dundu iron deposit

样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
DD006	热液交代期矽卡岩	22.80	48.60	6.65	26.50	6.26	3.06	6.54	1.23	7.70	1.61	4.95	0.62
DD027	火山变质期矽卡岩	36.00	67.00	8.25	32.20	6.59	1.99	6.87	1.33	7.64	1.60	5.30	0.75
DD007	凝灰岩	33.00	55.30	6.35	25.90	7.05	1.98	6.56	1.29	7.47	1.73	4.84	0.71
DD035	凝灰岩	23.10	53.80	7.60	33.60	8.16	1.64	8.16	1.67	8.68	2.06	5.87	0.95
DD029	热液交代期矿石	3.80	5.29	0.51	1.67	0.33	0.09	0.56	0.11	0.76	0.15	0.45	0.06
DD052	火山变质期矿石	56.10	58.00	4.76	13.00	1.75	0.52	1.78	0.31	1.43	0.31	0.93	0.15
样号	岩性	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	ΣLREE/ΣHREE	δEu	(La/Yb) <sub>N</sub>	(La/Sm) <sub>N</sub>	(Gd/Yb) <sub>N</sub>	δCe	
DD006	热液交代期矽卡岩	4.12	0.69	141.33	113.87	27.46	4.15	1.45	3.73	2.29	1.28	0.94	
DD027	火山变质期矽卡岩	4.86	0.69	181.08	152.03	29.05	5.23	0.90	4.99	3.44	1.14	0.90	
DD007	凝灰岩	4.70	0.75	157.63	129.58	28.05	4.62	0.88	4.73	2.94	1.13	0.86	
DD035	凝灰岩	5.72	0.88	161.89	127.90	33.99	3.76	0.61	2.72	1.78	1.15	0.97	
DD029	热液交代期矿石	0.45	0.10	14.34	11.69	2.65	4.42	0.65	5.67	7.20	0.99	0.80	
DD052	火山变质期矿石	0.85	0.07	139.94	134.13	5.82	23.07	0.88	44.50	20.16	1.69	0.65	

注: 样品测试由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成; 稀土元素含量单位为  $10^{-6}$ 。

火山变质期和热液交代期的磁铁矿矿石稀土元素配分模式明显不同(图 9), 表明二者的形成机制具有较大的差异。火山变质期的磁铁矿矿石(DD052)  $\Sigma\text{REE}$  ( $139.94 \times 10^{-6}$ ) 较高, 轻、重稀土分异强烈,  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 23.07$ , LREE 和 HREE 均发生明显的分异, 其中 LREE 分异明显,  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  为 20.16,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为 1.69; Eu( $\delta\text{Eu} = 0.88$ ) 和 Ce( $\delta\text{Ce} = 0.65$ ) 显示中等程度的负异常。热液交代期磁铁矿矿石(DD029) 的稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ ,  $14.34 \times 10^{-6}$ ) 明显降低, 这可能是由于热液作用使得稀土元素大量淋滤所致。但其轻、重稀土分异明显,  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  为 4.42; LREE 内部也发生了明显的分异, 其中  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  为 7.20, HREE 内部分异不明显,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为

0.99, Eu( $\delta\text{Eu} = 0.65$ ) 和 Ce( $\delta\text{Ce} = 0.80$ ) 属中等程度的负异常。

## 5 讨论

### 5.1 矽卡岩的成因

长期以来, 地质学者认为中酸性岩体侵入碳酸盐岩地层的接触带及附近是矽卡岩的标准产出环境, 这实际上是单成因观点<sup>[30]</sup>。现在看来, 矽卡岩形成的地质条件更为广泛, 矽卡岩不仅可由接触交代作用形成, 亦可由火山-次火山气液作用<sup>[40]</sup>、混合岩化作用<sup>[41-42]</sup>、区域变质作用<sup>[43]</sup>或接触变质作用<sup>[44]</sup>形成。各种不同成因的矽卡岩在我国都有广泛分布<sup>[45]</sup>。根据矿物的共生组合及相互穿插关系, 敦德铁矿矽卡岩可分为火山变质期矽卡岩和热液交代期矽卡岩, 其矿物学特征及 REE 特征显著差异反映了这两期矽卡岩成因的不同。

#### 5.1.1 火山变质期矽卡岩

火山变质期矽卡岩石榴子石的端元组分主要为钙铝榴石, 辉石的端元组分主要是透辉石。其 REE 配分模式有两个显著特点: 一是 LREE 富集的右倾配分模式, 二是 Eu 负异常现象。已有研究<sup>[46]</sup>证明, 在热变质阶段, 岩石体系处于相对封闭的状态, 流体/岩石比值较低, 因此流体对体系的 REE 影响很小, 变质产物的 REE 丰度和模式特征主要受原岩控制。该区火山变质期矽卡岩和大哈拉军山组地层中火山岩的稀土元素配分型式非常一致; 因此可推测敦德铁矿火山变质期矽卡岩

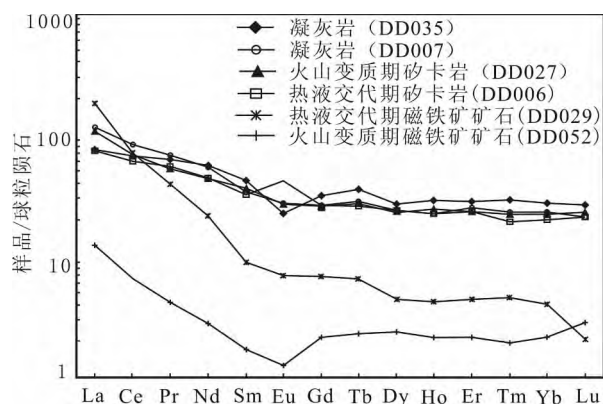


图 9 敦德铁矿床稀土元素配分模式

(球粒陨石标准化数值据文献 [39])

Fig. 9 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the Dundu iron deposit

为地层中安山质凝灰岩受热变质而形成。火山变质期矽卡岩具有 Eu 负异常,显示其形成于较还原的环境,这与钙铝榴石形成于弱氧化—弱还原条件下的事实相符。

### 5.1.2 热液交代期矽卡岩

热液交代期矽卡岩石榴子石的端元组分主要为钙铁榴石,辉石的端元组分主要是透辉石,属于交代矽卡岩中的钙矽卡岩,该类矽卡岩与我国一些典型的交代矽卡岩特征相同<sup>[47-48]</sup>。热液交代期矽卡岩 REE 配分模式有两个显著特点:一是 LREE 富集的右倾配分模式,二是 Eu 正异常现象。研究<sup>[49-51]</sup>表明,矽卡岩形成过程 REE 的重新分配受原岩中的浓度、流体相的 REE 浓度和 REE 寄主的次生矿物相在蚀变作用中释放 REE 的能力 3 个因素控制。由于流体搬运稀土元素的能力较弱,且稀土元素在沿裂隙搬运的过程中发生了流失,流体中的稀土元素总量较低,导致流体对矽卡岩体系的 REE 影响很小;因此,矽卡岩的 REE 配分模式主要受原岩和寄主的次生矿物相在蚀变作用中释放 REE 能力的影响。敦德铁矿热液交代矽卡岩和凝灰岩无论在稀土总量还是轻、重稀土分异的程度上都非常相似,可以推测热液交代期矽卡岩为气水热液交代大哈拉军山组凝灰岩而形成。二者唯一不同的是 Eu 的异常,笔者认为原因如下:根据矿物类质同象的置换原理,在不破坏晶体结构的条件下,离子半径相近的元素可以进行类质同象的置换,石榴子石中八配位的  $\text{Ca}^{2+}$  ( $r = 1.12 \text{ \AA}$ ),可容纳八配位的  $\text{Eu}^{3+}$  ( $r = 1.066 \text{ \AA}$ ),但不能容纳八配位的  $\text{Eu}^{2+}$  ( $r = 1.25 \text{ \AA}$ ),所以类质同象是石榴子石 Eu 正异常的重要因素之一,亦是矽卡岩中具有 Eu 正异常的重要原因之一。这与钙铁榴石在相对氧化的条件下生成的事实相符。

### 5.2 成岩成矿过程恢复

北天山现存的蛇绿岩带<sup>[52]</sup>显示该区晚古生代存在过一个有限的洋盆<sup>[53-54]</sup>,石炭纪末该洋盆逐渐消亡闭合时,曾向两侧俯冲,阿吾拉勒铁矿带位于岛弧带的内侧<sup>[55]</sup>。受俯冲作用的影响,岛弧型地壳根部发生部分熔融,形成富铁安山质岩浆<sup>[56]</sup>,岩浆沿深大断裂上侵、喷溢形成富铁的安山岩及安山质凝灰岩(图 3B)。岩石学和矿相学的研究表明,阿吾拉勒铁矿带中的安山质凝灰岩与磁铁矿的矿化关系密切,既是富矿的围岩,也是矿源岩。

随着二叠纪花岗质岩浆的侵位,敦德铁矿下

石炭统大哈拉军山组地层中富铁的安山质凝灰岩受热发生变质作用,随着温度的增高,岩石中产生化学活动性流体,流体可能来源于岩石孔隙水或矿物结构中的水,这种热流体促进了岩石中矿物组分的溶解和迁移,在特定的温压条件下,安山质凝灰岩通过变质结晶和交代的方式形成石榴子石和透辉石的矽卡岩矿物组合,部分未蚀变完全的安山质凝灰岩中可见残留的斜长石斑晶(图 3C)。由于大哈拉军山组火山岩地层中 Fe 含量普遍较高(图 3B),在热变质的过程中,地层中的成矿元素活化转移,发生磁铁矿的富集,形成有工业价值的磁铁矿矿石,这与火山变质期矽卡岩在显微镜下可见由细小颗粒状磁铁矿聚集成团块状磁铁矿(图 3D)的现象相符。在火山变质期,岩石体系处于相对封闭的状态,并无物质的带入带出,因此火山变质期的磁铁矿矿石(DD0052)继承了安山质凝灰岩中 REE 的配分特点,其稀土总量( $\Sigma\text{REE}, 139.94 \times 10^{-6}$ )与安山质凝灰岩稀土总量( $\Sigma\text{REE}, 157.63 \times 10^{-6} \sim 161.89 \times 10^{-6}$ )相近,均具有 Eu 的负异常。但是火山变质期磁铁矿矿石更加富集轻稀土元素,这可能是由于岩浆在分异磁铁矿的过程中,由于轻稀土元素离子半径较大,更易进入磁铁矿的晶格中所致。

岩浆演化的后期,岩浆房处于高温、负压状态,有利于雨水、地下水向负压带汇集并与岩浆热液混合,升温后的混合热液沿裂隙上升,与地层中的安山质凝灰岩发生交代作用。在交代的晚期,Fe 主要以络合物的形式被运移。随着温度的降低,角闪石、绿帘石、绿泥石和蛇纹石等含  $\text{OH}^-$  的晚矽卡岩阶段的矿物大量生成,使溶液中的  $\text{H}^+$  被大量消耗,从而导致溶液逐渐趋于碱性。就是在这种高氧逸度碱性的条件下,溶液中 Fe 的氯化物络合物发生水解,使磁铁矿大量沉淀<sup>[57-58]</sup>,从而形成磁铁矿矿石。由于热液流体的淋滤,热液交代期磁铁矿矿石(DD029)的稀土元素总量( $14.34 \times 10^{-6}$ )明显低于热液交代期矽卡岩稀土元素总量( $141.33 \times 10^{-6}$ ),但是其  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  比值与矽卡岩的相近,这种轻、重稀土分馏的一致性显示其与热液交代期矽卡岩的成因联系。

## 6 结 论

(1) 敦德铁矿床赋存于下石炭统大哈拉军山组火山岩地层中,受地层控制明显。与矿体密切关

生的矽卡岩可分为火山变质期矽卡岩和热液交代期矽卡岩两期。

(2) 火山变质期矽卡岩中石榴子石为钙铝榴石, 辉石主要为透辉石, 形成于较氧化的环境; 热液交代期矽卡岩中石榴子石主要为钙铁榴石, 辉石主要为透辉石, 为交代矽卡岩中的钙质矽卡岩, 形成于较还原的环境; 伴随两期矽卡岩可形成两期磁铁矿矿石, 两者在空间上共存, 在时间上也经历了大致相同的发展演化。

(3) 矽卡岩与地层中凝灰岩的 REE 配分特点相似, 暗示其并非中酸性岩浆与碳酸盐地层接触交代的产物, 而是凝灰岩受热变质及热液交代两期作用形成。

致谢: 野外期间得到了新疆维吾尔自治区地质调查院总工程师王磊, 教授级高工李凤鸣、屈迅及第三和十一地质大队的鼎力支持, 电子探针分析得到了尹京武老师悉心指导, 在此一并致谢!

#### 参考文献:

- [1] 田敬全, 胡敬涛, 易习正, 等. 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, 2009(8): 88-91.
- [2] 董连慧, 江云华, 王庆明. 新疆东天山、西天山、西南天山: 全国主要成矿远景区矿产资源评价重点选区研究 [R]. 北京: 中国地质调查局, 2003: 51-84.
- [3] 田薇. 新疆伊犁晚古生代裂谷陆相火山岩型铜(银)矿的成矿规律及其找矿前景: 以阿吾拉勒地区为例 [J]. 矿产与地质, 2006, 20(3): 237-242.
- [4] 张作衡, 毛景文, 王志良, 等. 新疆西天山达巴特铜矿床地质特征和成矿时代研究 [J]. 地质论评, 2006, 52(5): 683-689.
- [5] 张作衡, 王志良, 毛景文, 等. 西天山青布拉克基性杂岩体的地球化学特征 [J]. 地质学报, 2006, 80(7): 1005-1016.
- [6] 刘凤鸣. 阿吾拉勒山主要矿产分布规律 [J]. 新疆有色金属, 2007(增刊): 7-9.
- [7] 李凤鸣, 彭湘萍, 石福品, 等. 西天山石炭纪火山岩—沉积盆地铁锰矿成矿规律浅析 [J]. 新疆地质, 2011, 29(1): 55-60.
- [8] Allen M B, Windley B F, Zhang C. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia [J]. Tectonophysics, 1993, 220(1/4): 89-115.
- [9] 陈正乐, 李丽, 刘健, 等. 西天山隆升—剥露过程初步研究 [J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 625-636.
- [10] 高俊, 钱青, 龙灵利, 等. 西天山的增生造山过程 [J]. 地质通报, 2009, 28(12): 1804-1816.
- [11] 莫江平. 新疆阿吾拉勒铁矿陆相火山岩地质地球化学特征 [J]. 地质论评, 1999, 45(S1): 1111-1115.
- [12] 母瑞身, 田昌烈, 沙德铭, 等. 西天山吐拉苏—也里莫墩早石炭世火山岩带地质特征 [J]. 地质论评, 1999, 45(S1): 1078-1087.
- [13] 唐功建, 王强, 赵振华, 等. 西天山东塔尔别克金矿区安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学与岩石成因 [J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1341-1352.
- [14] 徐学义, 王洪亮, 马国林, 等. 西天山那拉提地区古生代花岗岩的年代学和锆石 Hf 同位素研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 691-709.
- [15] 朱明田, 武广, 解洪晶, 等. 新疆西天山莱历斯高尔斑岩型铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及流体包裹体研究 [J]. 岩石学报, 2010, 26(12): 3667-3682.
- [16] 朱明田, 武广, 解洪晶, 等. 新疆西天山科克赛岩体年代学、地球化学及地质意义 [J]. 岩石学报, 2011, 27(10): 3041-3054.
- [17] 张成和, 丁天府. 试论新疆天山地区石炭纪海相火山岩型铁矿成矿条件 [J]. 西北地质, 1984(3): 10-18.
- [18] 徐志刚, 张水哲. 天山槽褶皱系古生代火山作用及铁矿成矿关系 [J]. 中国地质科学院矿床地质研究所刊, 1985(3): 13-43.
- [19] 卢宗柳, 莫江平. 新疆阿吾拉勒富铁矿地质特征和矿床成因 [J]. 地质与勘探, 2006, 42(5): 8-11.
- [20] 杨明德, 莫江平, 蔡宏渊. 新疆阿吾拉勒西段穷布拉克铜矿地质特征及控矿条件分析 [J]. 矿产与地质, 2009, 23(3): 230-234.
- [21] 冯金星, 石福品, 汪邦耀, 等. 西天山阿吾拉勒成矿带火山岩型铁矿 [M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-177.
- [22] 汪邦耀, 胡秀军, 王江涛, 等. 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, 2011, 30(3): 385-402.
- [23] 赵斌, Barton M D. 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, 1987, 7(1): 1-8.
- [24] 束学福. 安庆矽卡岩型铁铜矿床地质地球化学特征及铁质来源研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(2): 219-224.
- [25] 张志欣, 杨福全, 罗五仓, 等. 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, 2011, 30(2): 267-280.
- [26] 徐林刚, 毛景文, 杨福全, 等. 新疆蒙库铁矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义 [J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 455-463.
- [27] 丰成友, 赵一鸣, 李大新, 等. 青海西部祁漫塔格地区矽卡岩型铜金多金属矿床的矽卡岩类型和矿物学特征 [J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1108-1115.
- [28] Meinert L D. Skarns and skarn deposits [J]. Geoscience Canada, 1992, 19: 145-162.
- [29] Einaudi M T, Meinert L D, Newberry R J. Skarn deposits [J]. Economic Geology, 1981, 75: 317-391.
- [30] Meinert L D. Gold skarn deposits geology and exploration criteria [M] // Keays R, Ramsay R, Groves D. The Geology of Gold Deposits: The Perspective in 1988. Michigan: Economic Geology Publishing Company, 1989: 537-552.



- [31] 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.
- [32] Zhao Y M, Li D X. Pb-Zn-Ag-bearing manganoan skarn of China [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 524-528.
- [33] 徐国风, 邵洁涟. 磁铁矿的标型特征及其实际意义 [J]. 地质与勘探, 1979(3): 30-37.
- [34] 真允庆, 马丽华, 李中生. 鞍山式铁矿与邯邢式铁矿的可能联系 [J]. 地球科学: 武汉地质学院学报, 1984, 27(4): 71-80.
- [35] 贾群子. 从磁铁矿的标型特征论天湖铁矿的成因 [J]. 西北地质, 1991, 12(1): 19-25.
- [36] 陈光远. 成因矿物学与找矿矿物学 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1987: 1-234.
- [37] 赵斌, 赵劲松, 刘海臣. 长江中下游地区若干 Cu(Au)、Cu-Fe(Au) 和 Fe 矿床中钙质矽卡岩的稀土元素地球化学 [J]. 地球化学, 1999, 28(2): 113-125.
- [38] 赵劲松, 邱学林, 赵斌. 大冶-武山矿化矽卡岩的稀土元素地球化学研究 [J]. 地球化学, 2007, 36(4): 400-412.
- [39] Boynton W V. Cosmochemistry of rare earth elements: meteorite studies [M] //Henderson. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [40] 梁祥济, 曲国林. 福建马坑铁矿床形成温度和压力实验的初步研究 [J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1982(4): 83-94.
- [41] 朱元龙, 吕士英. 河北省一混合岩化矽卡岩型铁矿床 [J]. 地质论评, 1966, 24(3): 223-230.
- [42] 王殿惠. 论双井子铁矿成因 [J]. 地质找矿丛论, 1987, 2(2): 72-83.
- [43] 俞建长. 福建平芹山透辉石矿床地质特征及成因探讨 [J]. 福州大学学报, 1994, 22(1): 98-105.
- [44] 王星, 肖荣阁, 杨立朋, 等. 青海谢坑铜金矿床石榴石矽卡岩成因研究 [J]. 现代地质, 2008, 22(5): 733-742.
- [45] 涂光炽. 地质学中的若干思维方法 [J]. 地质与勘探, 1981(7): 1-5.
- [46] 凌其聪, 刘丛强. 层控矽卡岩及其有关矿床形成过程的稀土元素行为: 以安徽冬瓜山矿床为例 [J]. 岩石学报, 2003, 19(1): 192-200.
- [47] Meinert L D. Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog mine, central Mining District, New Mexico [J]. Economic Geology, 1987, 82(3): 523-545.
- [48] Nakano T. Pyroxene geochemistry as an indicate or for skarn metallogenesis in Japan [M] //Lentz D R. Mineralized Intrusion Related Skarn Systems. Quebec: Mineralogical Association of Canada, 1998: 147-167.
- [49] Alderton D H M, Pearce J A, Potts P J. Rare earth element mobility during granite alteration: evidence from southwest England [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 49: 149-165.
- [50] Humphris S E. The mobility of the rare earth elements in the continental crust: intermediate and silicic rock-ore petrogenesis [M] //Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 317-340.
- [51] Chen J, Halls C, Stanley C J. Rare earth elements and patterns in major skarn minerals from Shizhuyuan W, Sn, Bi and Mo deposit, South China [J]. Geochemical Journal, 1992, 26: 147-158.
- [52] 黄汲清, 姜春发, 王作勋. 新疆及邻区板块开合构造手风琴式运动: 新疆地质科学(第1辑) [M]. 北京: 地质出版社, 1990: 3-16.
- [53] 张良臣, 吴乃元. 天山地质构造及演化史 [J]. 新疆地质, 1985, 3(3): 1-14.
- [54] 陈哲夫, 梁云梅. 新疆天山地质构造几个问题的探讨 [J]. 新疆地质, 1985, 3(2): 1-13.
- [55] 姜常义, 吴文奎, 谢广成, 等. 阿吾拉勒山西段二叠纪火山岩组合与构造环境分析 [J]. 西安地质学院院报, 1992, 14(4): 1-8.
- [56] 汪邦耀, 姜常义. 西天山查岗诺尔铁矿区石炭纪火山岩地球化学特征及岩石成因 [J]. 地质科技情报, 2011, 30(6): 18-27.
- [57] 艾永福, 金玲年. 石榴石成分与矿化的初步研究 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1981(1): 83-90.
- [58] 赵一鸣, 林文蔚, 张德全, 等. 交代成矿作用及其找矿意义: 几个重要含矿建造的研究 [M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1992: 1-47.