文章编号:0258-7106(2013)02-0380-17

# 弓长岭铁矿床物质来源及沉积古地理环境研究

# 王恩德 夏建明 赵纯福 付建飞 侯根群

(东北大学资源与土木工程学院,辽宁沈阳 110819)

摘 要 弓长岭沉积变质型铁矿床是中国鞍山式铁矿床的典型代表。研究表明,该铁矿床赋存于反 S 型褶皱 中 局部矿体出现褶曲现象。矿体产于主要由磁铁石英岩、斜长角闪岩、黑云母变粒岩和"蚀变岩"组成的含铁岩系 中。文章通过研究该地区铁矿石的构造、结构和矿物组合 结合常量、微量及稀土元素研究,揭示了该地区形成铁矿 床的物质来源与海底热液活动密切相关,在其形成过程中,很少或者没有含铝碎屑物质的加入,是由海洋化学沉积 形成的,形成于还原环境。通过研究与铁矿床空间关系密切的斜长角闪岩、黑云母变粒岩和"蚀变岩"的构造和结构 等,并利用常量、微量及稀土元素的测试结果,对斜长角闪岩、黑云母变粒岩和"蚀变岩"进行了原岩恢复研究,研究 结果显示,该区斜长角闪岩的原岩应为洋中脊拉斑玄武岩,黑云母变粒岩的原岩应为大陆岛弧的杂砂岩,而"蚀变 岩"的形成则与磁铁石英岩有着密切的关系。最后,提出了该地区铁矿床沉积的古地理环境为洋壳边缘、大陆岛弧 附近,其形成环境应相当于弧后盆地。

关键词 地质学 地球化学 海洋沉积 洋中脊玄武岩 杂砂岩 沉积环境 污长岭 中图分类号:P618.31 文献标志码:A

# Material sources and sedimentary environment of Gongchangling iron deposit

WANG EnDe, XIA JianMing, ZHAO ChunFu, FU JianFei and HOU GenQun

(Institute of Resource & Civil Engineering, Northeast University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

### Abstract

The Gongchangling iron deposit is a typical sedimentary-metamorphic iron deposit in Anshan-Benxi area; nevertheless, researches on the formation of the iron deposit have been very insufficient. Studies show that the iron deposit lies in a reverse S-shaped fold strata composed of plagioclase amphibolite, biotite leptynite, magnetite-quartzite and "altered rock". According to the investigation of structure and mineral assemblages of iron ore in combination with characteristics of major elements, REE and trace elements of iron ore, the authors have arrived at the following conclusions: the formation of iron deposit was closely related to mantle plumes; there was very little or no aluminum-bearing detrital material added to the iron deposit during its formation; the iron deposit was formed by marine chemical deposition and in a reducing environment. According to mineral assemblages of plagioclase-amphibolite, biotite leptynite and "altered rocks" in combination with features of major elements, REE and trace elements of plagioclase-amphibolite, biotite leptynite and "altered rocks", the authors made an analysis of the protolith, and the results show that plagioclase-amphibolite came from mid-ocean ridge basalt, biotite-leptynite came from greywacke near continental island arc, and the formation of "altered wall"

<sup>\*</sup> 本文得到国土资源部公益性行业科研专项基金(编号:201111002-2)国家 973 项目"我国富铁矿形成机制与预测研究"(编号: 2012CB416800)和教育部基金(编号:110601002)的联合资助

第一作者简介 王恩德,男,1957年生,博士生导师,教授,从事金属矿床成矿规律与成矿预测研究。Email:wnd@mail.neu.edu.cn 收稿日期 2012-04-16;改回日期 2013-01-31。许德焕编辑。

was closely related to magnetite-quartzite. It is held that the depositional environment for the iron deposit was the edge of the oceanic crust near the continental island arc.

**Key words:** geology, geochemistry, marine chemical deposition, MORB, greywacke, depositional environment, Gongchangling area

辽宁省鞍山-本溪地区(以下简称为鞍本地区) 是中国最主要的钢铁工业基地之一,蕴藏着极其丰 富的铁矿石资源,仅新中国成立后勘探获得的铁矿 石资源储量就达 120 亿吨,相当于全国铁矿石总量 的五分之一。鞍本地区的铁矿床属前寒武纪条带状 铁矿,在国外统称为条带状铁建造(BIF),在中国称 为鞍山式铁矿,是全球铁矿床中规模最大、储量最多 的一种类型(Cornelis 2005)。

弓长岭二矿区是鞍山式铁矿床的典型代表之 一。对该矿区的研究主要集中在富铁矿体的成因 上,而对铁矿床沉积环境的研究则较少,特别是对铁 矿床原始沉积地质构造环境的研究更少。只有周世 氡(1994)根据铁矿床与基性岩的关系,提出了该铁矿 床是由含 Fe,Si的大洋中脊等古火山活动中心附近的 水体,在向海盆边部运移过程中,与 pH 值和 Eh 值都 不同的陆地水发生了混合,从而导致沉积形成的。

本文通过研究该矿区铁矿石的构造、结构和矿物组合,并结合常量、微量与稀土元素的研究,揭示 了该铁矿床的物质来源,通过研究与铁矿床空间关 系密切的斜长角闪岩、黑云母变粒岩和"蚀变岩"的 构造和结构等,并利用常量、微量与稀土元素地球化 学方法对这些岩石进行了原岩恢复研究,最后,提出 了该铁矿床形成的古地理环境,这对认识该类铁矿 床的分布规律以及进一步找矿具有重要意义。

# 1 地质概况

鞍本地区的铁矿床主要分布在太古界鞍山群 内。鞍山群可分为茨沟组、大峪沟组和樱桃园组。 鞍山群含铁岩系以规模不等的残片零星分布在太古 代花岗岩体中,常呈陡倾角产出,约占鞍本地区太古 代地质体的30%。

弓长岭地区广泛分布有太古界鞍山群茨沟组变 质岩,沉积-变质型铁矿床即赋存于该组含铁岩系的 上、下含铁带中。

弓长岭铁矿带内构造发育,褶皱、断裂齐全,控制着矿床的形成与分布。该铁矿带整体为一NW走向的反S型褶皱,长约12km。由于受到寒岭断裂、

偏岭断裂等一系列近平行的 NE 向断裂的影响,该 铁矿带被错断成为断陷区和断隆区,前者因下降而 有利于含铁岩系的保存,后者则因上升遭受剥蚀强 烈而不利于含铁岩系的保存。据此,将该铁矿带划 分为一矿区、二矿区、三矿区、老岭-八盘岭矿区(包 括老弓长岭、独木、哑叭岭和八盘岭)。

二矿区内出露的地层属于鞍山群茨沟组,位于 寒岭断裂与老岭断裂之间,处于断陷区。该矿区内 的含铁岩系呈单层状残留体产于大片混合花岗岩 中 岩层走向 NW 20~60°,倾向 NE,倾角 60~85°。 该岩层的两端因受断裂影响而使产状有些变化,其 NW 端受寒岭断裂的影响,岩层走向变为 NW 80°, 倾向 SE,其 SE 端受老岭断裂的影响,产状变为 SN 走向,向 E 陡倾斜(图 1)。

含铁岩系自下而上可分为6层(图2)周世泰, 1994)。各层简述如下:①底部角闪岩(Hb);②下 部片岩(PSP);③下含铁带:包括第1层铁矿(Fe1) 中部片岩(SPS)和第2层铁矿(Fe2);④中部黑云母 变粒岩层(K):主要由黑云母变粒岩组成,夹有薄层 的磁铁石英岩层,即第3层铁矿(Fe3),表明其岩性 并非单一,在一些露头上可见明显的微层理、递变层 理、斜层理等现象,表明黑云母变粒岩的原岩是沉积 形成的,⑤上含铁带:包括第4层铁矿(Fe4)下斜长 角闪岩、第5层铁矿(Fe5)上斜长角闪岩和第6层 铁矿(Fe6),Fe6是该矿区最厚的一层铁矿,在矿区 的西北部和中部主要为磁铁石英岩,只在地表浅处 有极少量的假象赤铁石英岩,而在18勘探线以东地 段的地表及浅处则均为假象赤铁石英岩,最深已达 -500m标高,⑥硅质岩层。

# 2 采样及分析方法

### 2.1 采样

本次研究在弓长岭矿床二矿区进行了系统采 样 样品涵盖了下含铁带至上含铁带。采集铁矿石 样品 13 件,包括第1至第6层铁矿;斜长角闪岩样 品9件,包括了下、上斜长角闪岩;黑云母变粒岩样 品12件,全部采自K层;"蚀变岩"样品4件,采自第



图 1 弓长岭铁矿床二矿区地质简图(据周世泰,1994 略有修改)

Q—第四系; S—硅质粒岩; ΔM—斜长角闪岩、石英斜长角闪岩; K—黑云母变粒岩; SPS—绿泥角闪片岩; PSP—绿泥云母片岩; Hb—底部 角闪岩; H—绿泥石榴岩、绿泥片岩; γ1—花岗岩; π—长英质岩脉; Fe6—铁矿体及编号; MR—磁铁富矿; HR—赤铁富矿; HP—假象赤铁 石英岩; Qnn—南芬组泥灰岩、页岩; Qnd—钓鱼台组石英砂岩夹页岩; Zq—桥头组石英砂岩夹页岩; O1—下奥陶统灰岩; 1—实测及推测 断裂; 2—研究区

Fig. 1 Geological sketch map of No. 2 ore district in the Gongchangling iron deposit(modified after Zhou, 1994) Q—Quaternary: S—Siliceous rocks: AM—Plagioclase amphibolite, quartz plagioclase amphibolite; K—Biotite granulite; SPS—Chlorite-amphibole schist: PSP—Chlorit mica schist: Hb—Bottom amphibolite: H—Chlorite garnetite, chlorite schist;  $\gamma_1$ —Granite;  $\pi$ —Felsic dykes: Fe6—Iron ore body and its serial number: MR—High-grade magnetite; HR—High-grade hematite; HP—Martite quartzite: Qnn—Marl, shale of Nanfen Formation: Qnd—Quartz sandstone intercalated with shale of Diaoyutai Formation: Zq—Quartz sandstone intercalated with shale of Qiaotou Formation: O<sub>1</sub>—Lower Ordovician limestone; 1—Measured and inferred fault; 2—Study area

4和第6层富铁矿体近旁。

在显微镜下对这些样品进行了详细观察,对其 构造、结构、矿物组合关系描述如下:

磁铁石英岩 呈条带状构造(图 3A)。主要由磁 铁矿和石英组成(图 3B),次要矿物有铁闪石、阳起 石;碳酸盐矿物含量较少,仅在少量样品中见有呈脉 状或团块状的碳酸盐矿物;磷灰石含量较少,仅个别 样品中含量较高,甚至达到10%;部分样品含有脉状 斜长石,或者黄铁矿;个别样品含有呈定向排列的黑 云母,其节理内可见碳酸盐矿物(黑云母→绿泥石+ 石英+碳酸盐矿物),绿泥石垂直磁铁矿表面生长, 表明其为后期热液产物。

斜长角闪岩 一般呈绿色-暗绿色,微粒-细粒-粗粒变晶结构,以细粒为主,片状、条纹状、块状构造 (图 3C),有的具变余层理构造。矿物成分以普通角 闪石、斜长石为主,次为石英、黑云母、石榴子石,副 矿物有黄铁矿、电气石和锆石等(图 3D)。普通角闪 石的含量为 50%~60%,柱状晶体,自形-半自形,粒





Fig. 2 Geological section of No. 2 ore district in the Gongchangling iron deposi (after Zhou, 1994)
1—Migmatite; 2—Plagioclase amphibolite; 3—BIF; 4—High-grade iron body; 5—Schist of lower part (PSP); 6—Schist of middle part (SPS); 7—Biotite granulite (K); 8—Chlorite schist; 9—Siliceous

径一般为0.1~0.5 mm;斜长石一般为中长石或拉 长石,呈板状或柱状,半自形或他形 粒径一般为0.1 ~0.15 mm。在断裂带及矿体附近,因遭受热液交 代作用而发生蚀变,主要为绿泥石化、滑石化、蛇纹 石化、绿帘石化。

黑云母变粒岩 主要呈鳞片粒状变晶结构,片 麻状构造(图 3E、3F)。主要矿物为斜长石、石英、黑 云母。斜长石后期蚀变严重,出现绢云母化;黑云母 已部分或全部转化为绿泥石;有些样品含有碳酸盐。 副矿物有磷灰石、锆石、榍石、电气石,部分电气石沿 长英质脉分布。整体表明,该区的黑云母变粒岩于 形成后经历了强烈的热液蚀变。 "蚀变岩" 主要矿物为绿泥石、石榴子石;次要 矿物包括黑云母、磁铁矿物。在石榴绿泥片岩中可 见磁铁矿物包裹绿泥石,磁铁矿物边界不齐,其形成 似乎晚于绿泥石(图 3G和 3H)。

2.2 测试方法

本次研究样品的测试单位为澳实分析检测(广 州)有限公司。

对于全岩样品,采用 ME-XRF06 化验分析(偏 硼酸锂溶解,X射线荧光光谱分析,各氧化物的检测 范围为 0.01%~100%);对于稀土元素,采用 ME-MS81 化验分析(LiBO<sub>2</sub> 熔融,质谱仪定量分析);对 于微量元素,采用 ME-ICP61 化验分析(四酸溶解, 等离子体发射光谱分析)。

3 测试结果

3.1 常量元素

诸样品按其产出层位和岩石类别分为磁铁石英 岩、K 层黑云母变粒岩、斜长角闪岩以及"蚀变岩", 其常量元素测试结果见表 1。

磁铁石英岩主要由 SiO<sub>2</sub> 和铁的氧化物组成,两 者之和达 89%~98%,平均为 93.7%,两者呈明显 的负相关。其杂质包括 MgO、CaO 等,但含量较少。 该岩石相对于其他岩石而言,最为明显的是其 u(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)非常低,平均仅为 0.84%,且其烧失量 (LOI)较低,平均为-0.12%。其他氧化物的总量平 均为 3.63%,其中,u(Na<sub>2</sub>O)高于u(K<sub>2</sub>O)。

斜长角闪岩的 u(SiO<sub>2</sub>)为 36.33% ~47.73%, 平均为 44.98%; u(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)平均为 12.73%;铁氧化 物平均含量为 14.72%; u(CaO), u(Mg)相对高于 其他岩类,两者的平均含量之和达 17.8%, u(CaO) 平均为 8.71%, u(MgO)平均为 9.08%;其他氧化 物含量较低。

K 层黑云母变粒岩的 u(SiO<sub>2</sub>)最高,平均达 63.15%;u(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)次之,平均为 14.70%;铁氧化物 含量最低,平均仅为 6.3%;u(MgO)平均为 3.74%,明显高于u(CaO)(仅为 1.73%);u(Na<sub>2</sub>O) 平均为 3.48%;u(K<sub>2</sub>O)平均为 2.77%;其他氧化物 含量较低。

" 蚀变岩 "的 u( SiO<sub>2</sub> )平均为 29%; u( Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> )平 均为 14.82%; 铁氧化物平均含量为 39.93%; u( MgO )平均为 8.64%, 明显低于铁氧化物;其他氧 化物含量较低,其中, u( Na<sub>2</sub>O )高于 u( K<sub>2</sub>O )。



图 3 弓长岭铁矿床二矿区岩石特征

Λ. 磁铁石英岩; B. 磁铁石英岩(正交偏光); C. 斜长角闪岩; D. 斜长角闪岩(单偏光); E. 黑云母变粒岩; F. 黑云母变粒岩(单偏光);
 G. "蚀变岩"; H. "蚀变岩"(单偏光)

Ch-绿泥石; G-石榴子石; Mt-磁铁矿

Fig. 3 Feature of rocks from No. 2 ore district in the Gongchangling iron deposit

A. Magnetite-quartzite: B. Magnetite-quartzite (cross nicols): C. Plagioclase-amphibolite: D. Plagioclase-amphibolite (plainlight);

E. Biotite-leptynite; F. Biotite-leptynite (plainlight); G. "Altered rock"; H. "Altered rock" (plainlight)

Ch—Chloritr; G—Garnet; Mt—Magnetite

#### 表 1 弓长岭铁矿床二矿区磁铁石英岩、斜长角闪岩、黑云母变粒岩、" 蚀变岩 "常量元素测试结果

Table 1 Main element analyses of magnetite-quartzite , plagioclase amphibolite , biotite-leptynite and " altered rock "

from No. 2 ore district of the Gongchangling iron deposit

长口夕称								и <b>(</b> В <b>У</b> %	)						
作而有你	$\mathrm{SiO}_2$	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	$K_2O$	$\mathrm{Cr}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{TiO}_2$	MnO	$P_2O_5$	SrO	BaO	LOI	总和
磁铁石英岩1	64.73	0.35	27.56	1.34	5.51	0.11	0.04	< 0.01	< 0.01	0.26	0.008	0.01	< 0.01	-0.21	99.69
磁铁石英岩 2	42.43	0.07	48.47	0.97	8.05	0.11	0.03	< 0.01	< 0.01	0.14	0.05	0.01	< 0.01	-0.33	100.00
磁铁石英岩 3	52.1	1.44	40.51	1.28	1.86	0.13	0.06	< 0.01	< 0.01	0.07	0.096	0.01	< 0.01	1.26	98.81
磁铁石英岩 4	43.26	0.26	52.76	1.58	1.46	0.13	0.05	< 0.01	< 0.01	0.07	0.132	0.01	< 0.01	- 1	98.71
磁铁石英岩 5	14.06	0.57	74.73	3.93	0.79	0.14	0.03	0.02	0.06	0.17	2.508	0.01	< 0.01	1.41	98.43
磁铁石英岩6	30.74	0.49	55.86	6.04	0.66	0.12	0.02	< 0.01	< 0.01	0.13	4.201	0.01	< 0.01	0.8	99.07
磁铁石英岩 7	9.62	0.58	87.87	0.12	0.74	0.16	0.08	< 0.01	< 0.01	0.17	0.026	0.01	< 0.01	-0.64	98.74
磁铁石英岩 8	19.91	0.45	79.61	0.04	0.41	0.14	0.07	< 0.01	< 0.01	0.06	0.039	0.01	< 0.01	-2.01	98.73
磁铁石英岩 9	23.82	0.84	73.97	0.01	0.81	0.15	0.14	< 0.01	< 0.01	0.19	0.012	0.01	< 0.01	-1.14	98.81
磁铁石英岩 10	46.99	0.68	43.91	5.01	0.8	0.11	0.02	< 0.01	< 0.01	0.12	0.075	0.01	< 0.01	1.92	99.62
磁铁石英岩 11	44.55	3.41	45.06	0.99	4.75	0.17	0.15	< 0.01	0.04	0.15	0.121	0.01	< 0.01	0.53	99.92
磁铁石英岩 12	53.74	0.93	39.6	3.01	2.23	0.16	0.03	< 0.01	0.03	0.14	0.093	0.01	< 0.01	0.1	100.05
磁铁石英岩 13	5.18	1	93.42	0.07	1.14	0.17	0.04	< 0.01	< 0.01	0.08	0.014	0.01	< 0.01	-2.61	98.52
斜长角闪岩1	47.42	15.74	11.73	7.26	8.98	2.04	2.83	0.04	0.71	0.18	0.066	0.03	0.06	3.2	100.3
斜长角闪岩2	47.73	12.63	15.1	6.68	7.67	2.38	1.73	0.01	1.1	0.22	0.091	0.01	0.02	2.99	98.36
斜长角闪岩3	45.26	10.79	15.61	10.46	11.69	1.12	1.04	0.09	1.61	0.27	0.019	0.01	0.01	1.64	99.63
斜长角闪岩4	36.33	9.22	15.57	11.4	12.24	0.36	0.46	0.08	1.28	0.31	0.133	0.02	< 0.01	11	98.39
斜长角闪岩 5	47.31	13.55	14.42	8.58	8.29	1.73	1.75	0.01	1.03	0.33	0.082	0.02	0.04	2.38	99.52
斜长角闪岩6	43.05	13.32	13.7	8.34	8.57	1.8	1.65	0.02	0.94	0.29	0.08	0.02	0.01	6.86	98.66
斜长角闪岩 7	48.15	14.33	14.92	9.17	5.95	3.3	0.7	$^{0.01}$	1.4	0.3	0.104	0.02	< 0.01	0.73	99.08
斜长角闪岩 8	42.37	10.96	20.69	10	9.38	1.11	0.41	0.01	1.17	0.44	0.104	0.01	< 0.01	2.15	98.79
斜长角闪岩 9	47.15	13.93	10.73	6.48	8.97	1.86	1.64	≥ 0.01	0.55	0.21	0.044	0.02	0.01	6.62	98.23
黑云母变粒岩1	66.87	14.44	4.81	0.79	3.06	4.26	2.37	0.01	0.38	0.05	0.135	0.02	0.04	2.4	99.63
黑云母变粒岩 2	58.13	13.85	7.54	2.94	6.2	1.88	2.63	0.04	0.46	0.11	0.145	0.05	0.02	5.9	99.9
黑云母变粒岩 3	64.36	14.48	5.78	0.88	4.32	3.6	2.73	0.02	0.44	0.07	0.143	0.03	0.05	2.84	99.75
黑云母变粒岩 4	58.74	15	7.4	1.76	5.3	3.03	3.51	0.03	0.48	0.09	0.193	0.02	0.07	4.12	99.74
黑云母变粒岩 5	60.47	14.79	7.32	2.44	4.05	3.28	2.89	0.03	0.48	0.08	0.166	0.04	0.07	2.71	98.81
黑云母变粒岩 6	61.69	15.38	5.51	1.62	3.32	4.08	3.09	0.02	0.46	0.06	0.149	0.02	0.1	2.63	98.14
黑云母变粒岩 7	63.96	15.79	5.04	2.21	2.72	4.4	2.25	0.01	0.46	0.05	0.134	0.04	0.11	1.87	99.04
黑云母变粒岩 8	66.36	14.43	5.21	0.85	3.32	3.77	2.93	0.01	0.43	0.06	0.117	0.02	0.12	2.52	100.15
黑云母变粒岩 9	62.65	15.39	6.49	2.77	3.03	2.98	3.66	0.02	0.47	0.06	0.129	0.05	0.08	2.05	99.83
黑云母变粒岩 10	65.4	13.86	6.98	1.5	3.16	3.6	2.24	0.01	0.43	0.07	0.125	0.04	0.07	2.42	99.9
黑云母变粒岩 11	64.36	14.27	6.32	1.07	3.24	3.3	2.68	0.01	0.43	0.07	0.133	0.02	0.06	2.88	98.84
黑云母变粒岩 12	64.82	14.66	5.98	1.95	3.14	3.62	2.29	0.01	0.42	0.08	0.146	0.03	0.06	2.13	99.32
蚀变岩1	28.1	16.18	42.08	0.07	7.33	0.06	0.06	0.03	1.15	0.29	0.028	0.01	< 0.01	3.72	99.1
蚀变岩2	23.97	16.38	43.7	0.03	8.7	0.07	0.1	0.03	1.32	0.24	0.012	0.01	< 0.01	4.62	99.18
蚀变岩 3	20.39	14.7	46.48	0.05	9.04	0.08	0.07	0.01	2.75	0.11	0.009	0.01	< 0.01	5.53	99.22
蚀变岩 4	43.57	12.04	27.46	0.04	9.51	0.07	0.02	< 0.01	0.8	0.06	0.009	< 0.01	< 0.01	4.88	<u>98.4</u> 6

测试单位: 澳实分析检测集团-澳实矿物实验室(采用熔融法, 硼酸锂熔融, X射线荧光光谱定量分析, 其中, 铁以 Fe2O3 表示)。

从常量元素特征可见,该矿区的4个主要岩类, 其 Fe、Al、Ca、Mg、K、Na的含量明显不同,表明它们 的原岩来源不同。

### 3.2 稀土元素及微量元素

磁铁石英岩、斜长角闪岩、黑云母变粒岩及"蚀 变岩"的稀土元素、微量元素测试结果见表 2、3 和 4。 磁铁石英岩 该矿区磁铁石英岩的稀土元素总含量(La 到 Lu)低且变化范围较大(表 2),为(2.38~74.86)× 10<sup>-6</sup>,平均为 19.09×10<sup>-6</sup>;LREE 平均含量为 14.07×10<sup>-6</sup>,HREE 平均含量为 5.02×10<sup>-6</sup>, LREE/HREE 值为 1.2~4.73,平均为 3.23。(La/ Yb)<sub>N</sub> 值为 0.61~5.93,平均为 3.58,显示出轻稀土 元素较富集的稍右倾型特征(图 4A)。

$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	>	ses of n	nagnetit	e-quar	zite, p	lagiocla	se ampl	hibolite	, biotit	e-leptyr	nite and	alle	Lea roc	K Irom	No. 2 or	e district	of the G	ongchang	ling iro	i deposi	t,
B         Cd         Th         Wh         Lm         Y         NREE         LIMERE         NMEE         MARE         NMEE         MARE         NMARE         MARE         MARE								w(B)	0/10-6								LREE/	((1 a/ Ah).	NF11	SU.	$\Lambda/H_{ m O}$
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	k Pr Nd Sn	Nd Sn	Sn		Eu	Gd	Tb	Dy F	lo E	r Tho	t Yb	Lu	Υ	ZREI	E DUREE	<b><i><u>SHREE</u></i></b>	HREE	N/OT MATA	NTO	2	
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5 0.08 0.4 0.1	3 0.4 0.1	0.1		0.07	0.15 (	0.02 0	.17 0.	05 0.1	16 0.0	$2 0.1^{2}$	4 0.0	2 2	2.38	1.65	0.73	2.26	3.37	1.89	0.43	40.00
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	8 0.1 0.4 0.1	0.4  0.1	0.1		0.13	0.18 (	0.02 0	).2 0.	06 0.2	22 0.0	3 0.23	2 0.0	4 3.2	3.00	2.03	0.97	2.09	2.14	3.18	0.64	53.33
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5 0.76 3 0.64	3 0.64	0.64		0.27	0.71 (	).12 0	.79 0.	19 0.5	56 0.0	8 0.54	4 0.0	9 6.4	17.65	14.57	3.08	4.73	5.93	1.31	0.73	33.68
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	2 0.55 2.4 0.51	2.4 0.51	0.51		0.41	0,68 (	0 11.0	.81 0.	19 0.0	57 0.1	L 0.7	4 0.1	4 7.3	13.81	10.37	3.44	3.01	2.93	2.30	0.68	38.42
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.5 1.48 6.8 1.62	3 6.8 1.62	1.62		1.34	2.02 (	).33 2	.17 0.	48 1.4	48 0.2	2 1.2	7 0.2	16.9	36.35	28.24	8.15	3.47	4.08	2.44	0.75	35.21
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.9 1.59 6.8 1.47	0 6.8 1.47	1.47		1.37	1.85 (	).28 1	.94 0.	46 1.3	37 0.1	9 1.3	3 0.2	2 19.0	38.87	31.23	7.64	4.09	5.03	2.74	0.70	42.61
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	7  0.17  0.7  0.14	7 0.7 0.14	0.14		0.05	0.16 (	0.03 0	.19 0.	04 0.1	16 0.0	2 0.18	3 0.0	4 1.5	4.58	3.76	0.82	4.59	5.24	1.10	0.72	37.50
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.34 1.8 0.61	1 1.8 0.61	0.61		0.29	0.67 (	).14 1	.14 0.	31 1.	1 0.1	6 1.08	8 0.1	9 10.7	7 10.53	5.74	4.79	1.20	0.61	1.48	0.77	34.52
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.8 2.97 16.2 4.88	7 16.2 4.88	4.88		3.02	6.22 (	9 86.0	.61 1.	56 4.8	84 0.6	9 4.25	5 0.6	4 62.3	3 74.86	49.07	25.79	1.90	1.15	1.81	0.80	39.94
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1  0.64  2.6  0.53	1 2.6 0.53	0.53		0.27	0.6 (	0 60.0	. 66 0.	16 0.5	53 0.0	8 0.5	1 0.0	9 6.2	14.89	12.14	2.75	4.41	5.24	1.57	0.66	38.75
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	3  0.56  1.9  0.39	5 1.9 0.39	0.39		0.18	0.44 (	0.09	0.7 0.	17 0.5	55 0.0	8 0.59	) 0.1	5.6	13.95	11.23	2.72	4.13	4.63	1.42	0.74	32.94
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	8 0.34 1.5 0.36	1 1.5 0.36	0.36		0.21	0.52 (	0 60.0	.63 0.	16 0.5	53 0.0	8 0.52	2 0.0	9 6	9.43	6.81	2.62	2.60	2.90	1.60	0.68	37.50
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	7 0.32 1.3 0.2	1.3 0.2	0.2		0.11	0.28 (	0.05 0	.42 0	A 0.3	35 0.0	5 0.4	3 0.0	7 3.2	7.88	6.13	1.75	3.50	3.29	1.53	0.70	32.00
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	4 1.41 6.8 2.1	6.8 2.1	2.1	-	0.64	2.75 (	).44 2	.85 0.	64 1.	78 0.2	6 1.69	0.2	7 16.9	34.73	24.05	10.68	2.25	2.06	0.88	0.78	26.41
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.1 2.14 10.3 3.15	1 10.3 3.15	3.15		1	4.09 (	).67 4	.39 0.	96 2.7	ZI 0.4	1 2.5(	5 0.4	25	52.67	36.49	16.18	2.26	2.13	0.92	0.76	26.04
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.8 5.02 21.8 5.04 1	21.8 5.04 1	5.04 1		.68	4.8	.71	4 0.	74 1.9	96 0.2	8 1.98	3 0.3	3 17.9	0 101.9	4 87.14	14.80	5.89	8.00	1.10	0.75	24.19
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.4 4.08 18.1 4.29 1	3 18.1 4.29 1	4.29 1	Ţ	.56	4.13	0.6 3	.38 0.	63 1.5	52 0.1	9 1.1	3 0.1	6 15.2	2 83.47	71.73	11.74	6.11	11.09	1.20	0.77	24.13
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0 1.58 7.8 2.48 0	3 7.8 2.48 0	2.48 0	0	.82	3.06 (	).55 3	.77 0	.8 2.4	44 0.3	6 2.39	0.3	7 20.8	8 40.32	26.58	13.74	1.93	1.54	0.98	0.76	26.00
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.1 1.82 8.7 2.59 1	2.8.7 2.59 1	2.59 1	Ξ	.04	3.29 (	).61 4	.35 0.	96 2.8	39 0.4	2 2.92	2 0.4	6 24.9	9 47.05	31.15	15.90	1.96	1.58	1.17	0.77	25.94
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	6 2.52 12.3 3.65 1	12.3 3.65 1	3.65 1	-	.25	4.12 (	.74 4	.79 1.	02 2.	9 0.4	3 2.8	1.0.4	3 26.2	2. 59.26	42.02	17.24	2.44	2.11	1.06	0.76	25.69
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	.9 2.13 10.4 3.17 (	3 10.4 3.17 0	3.17 (	Q	.94	3.62 (	).66 4	.41 0.	93 2.8	82 0.3	9 2.6	7 0.4	1 24	51.95	36.04	15.91	2.27	1.94	0.91	0.77	25.81
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	2 0.82 4.2 1.41 (	2.4.2 1.41 (	1.41 (	9	).56	1.85 (	).36 2	.41 0.	51 1.4	47 0.2	2 1.5	1 0.2	3 13.2	22.75	14.19	8.56	1.66	1.25	1.14	0.77	25.88
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	4 4.84 17 3.06 (	1 17 3.06 (	3.06 (	-	).81	2.57 (	.34 2	.18 0.	46 1.2	23 0.1	8 1.2	0.2	12.4	102.2	4 93.81	8.43	11.13	17.88	0.92	0.73	26.96
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.7 5.95 21.2 3.83	21.2 3.83	3.83		0.91	2.89 (	).37 2	.14 0.	44 1.2	24 0.1	9 1.23	2 0.2	T P	8 120.9	7 112.09	8.70	12.88	21.24	0.86	0.75	26.82
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.3 4.89 17.1 2.99	17.1 2.99	2.99		0.76	2.35 (	).34 1	. 99 0.	44 1.2	21 0.2	2 1.3	5 0.2	2 11.7	77.66	91.64	8.10	11.31	15.77	0.91	0.74	26.59
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.3 6.15 22.5 4.03	5 22.5 4.03	4.03		0.99	3.01 (	.41 2	.38 0.	49 1.3	33 0.2	2 1.20	5 0.1	9 13.4	125.3	4 116.07	9.27	12.52	21.01	0.89	0.75	27.35
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.1 6.83 24.3 4.38	\$ 24.3 4.38	4.38		1.06	3.52 (	.49 2	.69 0.	58 1.5	53 0.2	3 1.49	9 0.2	4 15.0	5 138.0	4 127.27	10.77	11.82	19.98	0.86	0.73	26.90
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.7 6.67 23.6 4.34	7 23.6 4.34	4.34		1.05	3.33 (	).45 2	.62 0.	54 1.4	12 0.2	2 1.4	1 0.2	2 14.4	1 136.1	7 125.96	10.21	12.34	21.12	0.87	0.73	26.67
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.6 8.1 28.7 4.68	28.7 4.68	4.68		1.18	3.23 (	).48 2	.9 0.	58 1.6	53 0.2	4 1.6	4 0.2	6 15.6	5 160.4	2 149.46	10.96	13.64	21.37	0.94	0.73	26.90
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.8 3.7 13.5 2.38	13.5 2.38	2.38		0.62	1.78 (	).29 1	.91 0	.4 1.2	28 0.1	9 1.35	5 0.2	1 10.5	5 77.71	70.30	7.41	9.49	12.08	0.94	0.74	26.25
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.6 6.66 24.4 4.23	5 24.4 4.23	4.23		1.14	3.3	0.5 2	.88 0.	56 1.0	51 0.2	3 1.59	9 0.2	4 14.6	5 135.9	4 125.03	10.91	11.46	18.37	0.96	0.72	26.07
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.1 5.61 20.6 3.79	20.6 3.79	3.79		0.94	2.98 (	).44 2	.79 0.	55 1.5	56 0.2	2 1.50	5 0.2	5 14.1	113.1	9 102.84	10.35	9.94	14.98	0.88	0.73	25.64
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0 4.8 17.8 3.56	17.8 3.56	3.56		0.94	2.9 (	).44 2	. 88 0	.6 1.7	72 0.2	6 1.79	9 0.2	8 14.6	97.87	87.00	10.87	8.00	10.48	0.93	0.75	24.33
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	.5 3.34 12.8 2.70	1 12.8 2.70	2.7(	5	0.82	2.37 (	).39 2	.48 0.	52 1.5	51 0.2	3 1.5	7 0.2	4 13.2	2 69.83	60.52	9.31	6.50	7.98	1.03	0.76	25.38
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5 0.75 3.7 1.0	3.7 1.0	1.0	6	0.31	1.67 (	).32 2	.35 0.	58 1.8	87 0.2	8 1.9	7 0.3	2 15.4	1 22.41	13.05	9.36	1.39	1.05	0.76	0.73	26.55
0.38 1.77 0.26 1.6 0.34 0.97 0.14 0.89 0.14 9.4 26.68 20.57 6.11 3.37 3.07 0.66 0.75 27.65 0.74 1.87 0.32 2.17 0.46 1.48 0.22 1.65 0.26 10.5 39.63 31.20 8.43 3.70 3.37 1.24 0.76 22.83	3 1.19 5.8 1.6	5.8 1.6	1.6	8	0.42	1.97 (	).43 3	3.2 0.	73 2.2	25 0.3	3 2.3	4 0.3	9 18.2	2 32.05	20.39	11.64	1.75	1.33	0.76	0.76	24.93
0.74 1.87 0.32 2.17 0.46 1.48 0.22 1.65 0.26 10.5 39.63 31.20 8.43 3.70 3.37 1.24 0.76 22.83	5 1.24 6.6 1.9	6.6 1.9	1.9	5	0.38	1.77 (	).26 1	.6 0.	34 0.9	97 0.1	4 0.8	9 0.1	4 9.4	26.68	20.57	6.11	3.37	3.07	0.66	0.75	27.65
	.1 1.76 7.7 2	7.7 2	2	- 1	0.74	1.87 (	).32 2	.17 0.	46 1.4	48 0.2	2 1.6	5 0.2	6 10.5	39.65	31.20	8.43	3.70	3.37	1.24	0.76	22.83

2013 年

	Table 3	Trace	eleme	nt ana	lyses o	f magr	netite-q	luartzitu	e and p	lagioc	lase an	lodidqr	ite fro	m No.	2 ore	district	of the	Gonge	hanglir	ng iron	ı deposi	H	
长日分称										m	(B)/10	- 6										11/ 122	HV/25
件品名称	Sr	К	Rb	$\mathbf{Ba}$	τh	$T_{a}$	dΝ	Ce	Р	Zr	田	Sm	Υ	Yb	Sc	ïŻ	n	C	Λ	Cu	Zn	1h/U	4/Nb
磁铁石英岩1	S	300	6.5	3.6	0.15	0.1	0.2	0.5	10	9	0.2	0.1	7	0.14	$\leq 1$	$\leq$	10	0	33	$\sim$	16	2.50	
磁铁石英岩2	11	300	3.3	1.2	0.05	0.1	0.2	0.8	220	7	0.2	0.1	3.2	0.22	$^{<1}$	$\stackrel{<}{\sim}$	10	$\stackrel{\sim}{\sim}$	$\stackrel{\scriptstyle <}{\sim}$	$\stackrel{\scriptstyle \sim}{\sim}$	6	0.18	
磁铁石英岩3	7	600	8.4	10.4	1.28	0.2	1.1	6.5	440	13	0.3	0.64	6.4	0.54	1	10	10	13	5	14	9	2.21	
磁铁石英岩 4	16	400	9.4	26	0.12	90 1	0.3	4.2	620	6	0.2	0.51	7.3	0.74	$\stackrel{<}{\sim}1$	$\stackrel{<}{\sim}1$	20	$\sim 1$	1	ю	æ	0.24	
磁铁石英岩 5	51	300	3.7	4.4	0.22	0.1	0.6	11.5	20000	11	0.3	1.62	16.9	1.27	5	$\stackrel{\scriptstyle <}{\sim}$	20	$\stackrel{<}{\sim}$	35	3	64	0.24	
磁铁石英岩 6	67	200	2.7	4.3	0.13	0.1	0.5	12.9	40000	0	0.2	1.47	19.6	1.33	$\stackrel{<}{\sim}$	$\stackrel{\sim}{\sim}$	20	$\stackrel{\scriptstyle <}{\scriptstyle \sim}$	H	1	28	0.09	
磁铁石英岩7	22	700	18.4	7.9	0.19	1.8	0.0	1.7	100	5	0.2	0.14	1.5	0.18	$\stackrel{\scriptstyle \sim}{\scriptstyle \sim}$	$\stackrel{\scriptstyle \sim}{\sim}$	20	$\stackrel{\sim}{\sim}$	2	7	18	1.73	
磁铁石英岩 8	18	700	15.1	10.1	0.17	0.1	0.6	ы	170	3	0.2	0.61	10.7	1.08	$\stackrel{<}{\sim}$	$\stackrel{\scriptstyle \sim}{\scriptstyle \sim}$	20	5	Н	2	34	0.71	
磁铁石英岩 9	13	1200	36.8	13	0.24	С	0.7	16.8	20	1	0.2	4.88	62.3	4.25	$\stackrel{<}{\sim} 1$	$\leq 1$	20	Н	÷	24	25	0.25	
磁铁石英岩 10	22	200	1.6	2.3	0.15	1.5	0.6	5.1	330	m	0.2	0.53	6.2	0.54	÷	÷	10	3	13	174	10	1.67	
磁铁石英岩 11	12	1200	20.9	20.9	2.81	0.6	7	5.3	570	41	1.1	0.39	5.6	0.59	1	$\leq 1$	10	$\leq 1$	28	1	17	4.76	
磁铁石英岩 12	5	300	2.3	ю	0.37	0.2	0.8	2.8	400	8	0.2	0.36	9%	0.52	1	1	20	1	13	20	12	1.03	
磁铁石英岩 13	10	300	6.2	4.2	0.21	3.5	3.4	2.7	20	6	0.2	0.2	3.2	0.43	1	2	20	2	6	4	27	0.40	
斜长角闪岩1	244	24000	) 260	620	0.38	0.2	2.6	9.4	290	53	1.5	2.1	16.9	1.69	31	158	20	47	206	81	96	0.35	6.50
斜长角闪岩2	84	14500	95.3	351	0.63	0.3	4	14.1	420	76	2.1	3.15	25	2.56	40	56	20	42	309	177	115	1.85	6.25
斜长角闪岩3	65	10000	50.6	206	1.26	1.4	27.9	36.8	70	111	2.9	5.04	17.9	1.98	27	613	10	99	217	$\leq 1$	142	1.40	0.64
斜长角闪岩 4	167	4100	23.4	73.9	1.32	0.4	6.5	30.4	640	85	2.3	4.29	15.2	$1.13^{\circ}$	25	612	10	70	213	-	116	3.77	2.34
斜长角闪岩5	113	14900	155.5	\$ 409	0.51	0.5	3.8	10	380	62	1.7	2.48	20.8	2.39	1 <del>6</del>	Ŧ	10	49	313	95	116	3.40	5.47
斜长角闪岩6	214	14400	119	222	0.43	0.3	3	12.1	370	55	1.5	2.59	24.9	2.92	42	107	20	50	294	71	109	3.07	8.30
斜长角闪岩7	201	6000	45.2	98	0.62	0.4	5.1	16	480	84	2.2	3.65	26.2	2.81	41	72	20	49	342	155	132	3.88	5.14
斜长角闪岩8	73	3700	19	41.3	0.7	0.4	4.3	13.9	490	70	1.9	3.17	24	2.67	38	39	20	33	287 1	050	252	2.80	5.58
斜长角闪岩9	210	13900	) 265	200	0.24	0.2	1.4	5.2	190	31	0.9	1.41	13.2	1.51	39	82	20	41	226	302	83	3.00	9.43

第32卷 第2期

弓长岭铁矿床二矿区磁铁石英岩、斜长角闪岩微量元素测试结果

表 3

测试方法:四酸溶解,等离子体发射光谱分析;测试单位; 澳实分析检测集团澳实矿物实验室。

#### 表 4 弓长岭铁矿床二矿区黑云母变粒岩、" 蚀变岩 "微量元素测试结果

Table 4 Trace element analyses of biotite-leptynite and " altered rock " from No. 2 ore district

of the Gongchangling iron deposit

样中夕称							и <b>(</b> В	<b>У</b> 10 <sup>-6</sup>					
作于四个小	Sr	Κ	Rb	Ba	Th	Ta	Nb	Ce	Р	Zr H	lf Sm	Y	Yb
黑云母变粒岩1	177	18900	204	507	10.5	0.5	6.2	44	620	128 3.	6 3.06	12.4	1.27
黑云母变粒岩2	440	22600	198	338	8.46	0.4	5.8	52.7	690	130 3.	6 3.83	11.8	1.22
黑云母变粒岩 3	196	22300	168.5	642	8.68	0.4	5.4	43.3	680	138 3.	6 2.99	11.7	1.35
黑云母变粒岩4	139	29000	184.5	789	8.76	0.4	5.9	54.3	880	128 3.	4 4.03	13.4	1.26
黑云母变粒岩 5	368	23400	165	764	9.96	0.5	6.7	59.1	770	147 4	4.38	15.6	1.49
黑云母变粒岩6	222	26100	157.5	1120	9.98	0.5	6.1	58.7	730	158 4.	3 4.34	14.4	1.41
黑云母变粒岩 7	370	19300	107.5	1030	11.7	0.6	7.5	69.6	660	165 4.	2 4.68	15.6	1.64
黑云母变粒岩 8	142	23800	124	1070	10.45	0.6	6.2	32.8	540	136 3.	5 2.38	10.5	1.35
黑云母变粒岩 9	434	29600	151.5	748	10.2	0.5	6.5	57.6	630	124 3.	2 4.23	14.6	1.59
黑云母变粒岩 10	325	18600	132.5	698	9.79	0.6	6.5	47.1	600	117 3.	2 3.79	14.1	1.56
黑云母变粒岩 11	185	22600	192	735	10.15	0.6	6.6	40	630	136 3.	8 3.56	14.6	1.79
黑云母变粒岩 12	221	18600	141.5	651	9.21	0.6	6.2	27.5	670	132 3.	4 2.76	13.2	1.57
蚀变岩1	2	500	20.8	3.3	0.35	1.2	5.9	5	100	66 1.	9 1.09	15.4	1.97
蚀变岩 2	4	600	35.6	4.9	0.91	142.5	20.4	8	30	75 2.	1 1.68	18.2	2.34
蚀变岩 3	16	600	17.9	4.2	0.52	1.4	11.2	7.5	10	72 2	1.95	9.4	0.89
蚀变岩 4	2	300	6.2	1.5	0.71	0.3	2.4	13.1	20	42 1.	2 2	10.5	1.65
			re	<b>(</b> Β <b>)</b> /10 <sup>-</sup>	- 6			and the e	09	. /2			
件品名称 一	Sc	Ni	U	Со	V	Cu	Zn	Thru	$Zr T IO_2$	La/Sc	Th/Sc	Ti/Zr	La/Th
黑云母变粒岩1							0	2.97	336.48	3.01	1.31	16.41	2.30
黑云母变粒岩 2	14	93	10	22	109	5	<ul><li>192</li></ul>	3.33	282.61	1.96	0.60	20.77	3.25
黑云母变粒岩 3	11	58	20	15	86	4	56	4.43	313.64	2.05	0.79	18.12	2.60
黑云母变粒岩4	13	66	20	19	105	113	72	3.32	266.67	2.16	0.67	23.44	3.21
黑云母变粒岩 5	13	77	20	20	98	23	0 61	3.48	306.25	2.43	0.77	21.09	3.17
黑云母变粒岩6	12	54	20	18	90	46	50	3.70	343.48	2.63	0.83	18.99	3.17
黑云母变粒岩 7	11	40	20	14	78	106	51	3.77	358.70	3.38	1.06	18.79	3.18
黑云母变粒岩 8	10	42	20	11	74	5	59	3.45	316.28	1.73	1.05	19.12	1.66
黑云母变粒岩 9	12	55	20	9	95	2	35	3.29	263.83	2.58	0.85	25.81	3.04
黑云母变粒岩 10	12	62	20	94	84	16	55	3.95	272.09	2.07	0.82	24.79	2.53
黑云母变粒岩 11	11	65	20	17	84	21	71	4.06	316.28	1.81	0.92	20.59	1.96
黑云母变粒岩 12	10	49	20	16	78	67	49	2.82	314.29	1.33	0.92	20.45	1.44
蚀变岩1	31	109	10	34	282	33	68	0.95					
蚀变岩 2	12	73	10	28	362	31	86	3.37					
蚀变岩 3	13	134	10	45	803	20	77	1.16					
蚀变岩 4	33	63	<10	47	305	10	90	2.54					

测试方法:四酸溶解,等离子体发射光谱分析;测试单位:澳实分析检测集团澳实矿物实验室。

所有样品采用原始地幔标准化后都显示出Eu正 异常和 Ce 负异常, dEu 的范围为 1.10~3.18,平均 为 1.87, dCe 的范围为 0.43~0.80,平均为 0.69。

Y/Ho 值的范围为 32~53,平均为 38.18,Th/U 值的范围为 0.09~4.76,平均为 1.23。

斜长角闪岩

该矿区斜长角闪岩的稀土元素总含量(La到 Lu) 变化较大(表2),为(22.75~101.94)×10<sup>-6</sup>,平 均为54.90×10<sup>-6</sup>,LREE 平均含量为41.04× 10<sup>-6</sup>,HREE 平均含量为 13.86 × 10<sup>-6</sup>,LREE/ HREE 值为 1.66~6.11,平均为 2.97 (La/Yb)<sub>№</sub> 值 为 1.25~11.09,平均为 3.52,显示出轻稀土元素稍 为富集的稍右倾型特征 图 4C)<sub>8</sub>

所有样品采用原始地幔标准化后,  $\delta Eu$ 的范围为0.88~1.20,平均为1.04,  $\delta Ce$ 的范围为0.75~0.78,平均为0.76。

Y/Ho 值的范围为 24.13 ~ 26.41, 平均为 25.56 (Th/U 值的范围为 0.35~3.88, 平均为 2.61。



图 4 弓长岭铁矿床二矿区岩石稀土元素、微量元素配分模式(标准化数据据 Taylor et al., 1985; Wanke et al., 1984) A. 磁铁石英岩稀土元素原始地幔标准化配分模式; B. 磁铁石英岩微量元素原始地幔标准化蛛网图; C. 斜长角闪岩稀土元素原始地幔标 准化配分模式; D. 斜长角闪岩微量元素原始地幔标准化蛛网图; E. 黑云母变粒岩稀土元素原始地幔标准化配分模式; F. 黑云母变粒岩 微量元素原始地幔标准化蛛网图; G. " 蚀变岩 '稀土元素原始地幔标准化配分模式; H. " 蚀变岩 '微量元素原始地幔标准化蛛网图 Fig. 4 Primitive mantle-normalized REE and primitive mantle-normalized trace element patterns of rocks from No. 2 ore district in the Gongchangling iron deposit (standard data from Taylor et al., 1985; Wanke et al., 1984)

矿 床 地 质

A. Primitive mantle-normalized REE pattern of magnetite-quartzite ; B. Primitive mantle-normalized trace spidergran of magnetite-quartzite ; C. Primitive mantle-normalized REE pattern of plagioclase-amphibolite ; D. Primitive mantle-normalized trace spidergran of plagioclase-amphibolite ; E. Primitive mantle-normalized REE pattern of biotite-leptynite ; F. Primitive mantle-normalized trace spidergran of biotite-leptynite ; G. Primitive mantle-normalized trace spidergran of biotite-leptynite ; G. Primitive mantle-normalized REE pattern of ' altered rock '; H. Primitive mantle-normalized trace spidergran of ' altered rock ''

#### 黑云母变粒岩

该矿区黑云母变粒岩的稀土元素总含量(La 到 Lu ,表 2 )为 (77.71 ~ 160.42 )× 10<sup>-6</sup>,平均为 114.77×10<sup>-6</sup>,LREE 平均含量为 105.17×10<sup>-6</sup>, HREE 平均含量为 9.61×10<sup>-6</sup>,LREE/HREE 值为 6.5~13.64,平均为 10.92。(La/Yb)<sub>N</sub> 值为 7.98~ 21.37,平均为 16.86,显示出轻稀土元素强富集的右 倾型特征(图 4E)。

所有样品采用原始地幔标准化后, dEu 的范围为0.86~1.03, 平均为0.92, dCe 的范围为0.72~0.76, 平均为0.74。

Y/Ho 值的范围为 24.33 ~ 27.35,平均为 26.32 ,Th/U 值的范围为 2.82~4.43,平均为 3.55。

" 蚀变岩 "

该矿区" 蚀变岩 "的稀土元素总含量(La 到 Lu) 低 表 2),其变化范围为(22.41~39.63)×10<sup>-6</sup>,平 均为 30.19×10<sup>-6</sup>,LREE 平均含量为 21.30× 10<sup>-6</sup>,HREE 平均含量为 8.89×10<sup>-6</sup>,LREE/HREE 值为 1.39~3.70,平均为 2.55。(La/Yb),值为 1.05~3.37,平均为 2.21,显示出轻稀土元素稍为富 集的稍右倾型特征(图 4G)。

所有样品采用原始地幔标准化后,除个别样品 外 &Eu 的范围为 0.66~0.76,平均为 0.72, &Ce 的 范围为 0.73~0.76,平均为 0.75。

Y/Ho值的范围为 22.83~27.65(表 2),平均为 25.49 ;Th/U的范围为 0.95~3.37(表 4),平均为 2.00。

4 讨 论

#### 4.1 常量元素

由常量元素可见,弓长岭铁矿床二矿区的4个 主要岩类显示出其 Fe、Al、Ca、Mg、K、Na 的含量明 显不同,表明它们的原岩来源不同。

考虑到在变质过程中, $H_2O$ , $CO_2$ , $K_2O$ 和 $Na_2O$ 都属于活动组份,易发生变化,故采用A-C-FM图解 对黑云母变粒岩、斜长角闪岩和"蚀变岩"进行了原 岩恢复(图 5),其中: $\Sigma = Al_2O_3 + CaO + 2Fe_2O_3 +$   $M_{gO}$  ;A( 铝质系数 )=  $Al_2O_3/\Sigma \times 100$  ;C( 钙质系数 ) =  $CaO/\Sigma \times 100$  ;F( 铁质系数 )=  $2Fe_2O_3/\Sigma \times 100$  ; M( 镁质系数 )=  $M_{gO}/\Sigma \times 100$ ( 注:各氧化物均以 分子数进行计算 )。

研究结果表明:斜长角闪岩落入基性火山岩区 (Ⅲ) ) 黑云母变粒岩落入含黏土质的中性火山岩或 杂砂岩区(Ⅲ+Ⅲ);而"蚀变岩"则落入粉砂岩区 (Ⅴ) 靠近硅铁质沉积岩区(Ⅵ) 图 5 )。

4.2 稀土元素及微量元素

#### 磁铁石英岩

正的 Eu 异常作为海底热液活动的指示标志着 与现代"黑烟囱 /型热液表现一致。二矿区的磁铁石 英岩具有正的 Eu 异常 表明该区 BIF 的形成与海底 热液活动有关(图 4A),此结果与国外太古代 BIF 的 研究结果一致(Appel, 1983;Peter et al., 1983; Thomas et al., 1988;Louis et al., 1990;Danielson et al., 1992;Yasuhiro et al., 2006)。Eu 异常值和稀土 元素总含量变化范围较大,反映出海底热液与周围 海水的混合比例在不同时间存在着差异(Cornelis, 2005)。

二矿区的铁矿石具有明显的条带状,明条带以 石英为主,暗条带以磁铁矿物为主;Eu的分离需要 200℃以上的温度条件(Michael,1991);而且,该区 BIF中石英的含量与LREE/HREE具有一定的正相 关性(图6)。这些都表明该区BIF中的石英和铁矿 物不是从最初均一的铁氧化物和硅的混合沉积物中 分离出来而形成的,它们有着各自的形成机制。

该区铁矿石的"REE + Y"具有正的 Y 异常,以 及该区 BIF 的 Y/Ho 值为 32~53,远高于上地壳的 平均值(27),这些都支持该区的 BIF 是由海洋化学 沉积形成的(Michael et al., 1999)。

该区 BIF 的高场强元素 Zr ,Hf ,Ta ,Th 和 U 的 含量很低(表 3) 表明其在化学沉积过程中没有碎屑 物质加入 ,应来自海水 ;该区的 BIF 缺少铝硅酸盐。 这些都表明其形成于开放海洋环境。

该区的 BIF 具有 Th/U 值低的特点( 原始地幔 为 3.56 ,上地壳为 4.2 )。因为 Th-U 的分离涉及到 U<sup>4+</sup> 的氧化( U<sup>4+</sup>→U<sup>6+</sup> ),U<sup>6+</sup>比U<sup>4+</sup> 具有更高的活



图 5 弓长岭铁矿床二矿区斜长角闪岩、黑云母变粒岩和 蚀变岩 "原岩恢复图解 据王仁民等,1987) Fig. 5 Restoration of plagioclase amphibolite, biotite-leptynite and "altered rock" from No. 2 ore district in the Gongchangling iron deposit (after Wang et al., 1987)



### 图 6 弓长岭铁矿床二矿区磁铁石英岩的 LREE/HREE 值与 亚(SiO<sub>2</sub>)关系图



性,所以,低的 Th/U 值表示 BIF 形成于还原环境 (Michael et al., 2009)。

该区的 BIF 具有负的 Ce 值。因为 Ce 的分离涉 及 Ce<sup>3+</sup>与 Ce<sup>4+</sup>之间的转化, Ce<sup>3+</sup>比 Ce<sup>4+</sup> 具有较高 的活性(Suayip, 2010),所以,在还原环境下 Ce 表现 为负异常,也表明该区 BIF 的形成过程处于还原环 境。

对前寒武纪铁矿床分布规律的研究显示,铁矿 床的形成与地幔柱和铁镁质火山活动密切相关(Jan et al., 1976; Harold, 1983; Stein et al., 1988; David et al., 2004 (图 7)。二矿区铁矿床的形成时 间大致为 2.5~2.7 Ga( 宋彪等,1992)。

通过上述分析可知,二矿区内铁矿床的形成与 海底热液活动密切相关,在其形成过程中,很少或者 没有含铝碎屑物质的加入,是由海洋化学沉积形成 的,形成于还原环境。

### 斜长角闪岩

二矿区内斜长角闪岩的微量元素配分曲线属于 右倾型(图 4D)。其大离子亲石元素 Rb、Ba 明显富 集 相容元素(如 Ni ,Mg ,Co ,Sc ,Cu 等)含量较高;洋 壳富集元素(如 Ti ,Mg ,Co ,Ni ,V ,Cu ,Zn )含量高; La/Yb 值除个别样品外,为 1.32~2.26。这些都表 明二矿区的斜长角闪岩来源于洋壳。

该区斜长角闪岩的 Eu 无异常 表明其形成与海 底热液活动无关。其 Th/U 值为 0.35~3.88,平均 为 2.61(与原始地幔值的差值为 3.56-2.61=0.95),





个别样品的该值为 0.35。这表明该区的斜长角闪岩 形成于还原环境。同时,该斜长角闪岩的 Ce 表现为 负异常,也表明其形成于还原环境。

通过 A-C-FM 图解进行原岩恢复可知,二矿区 斜长角闪岩的原岩为基性火山岩(图 5)。通过 Zr-MgO 图解(图 8)可知,该斜长角闪岩为正斜长角闪 岩。除个别样品外,其 Y/Nb 值都大于 1,表明该斜 长角闪岩的原岩为拉斑玄武岩。Ti/100-Zr-Y \* 3 图 解(图 9)表明,该拉斑玄武岩为板块边缘拉斑玄武 岩。应用 Ti-Zr 图解可以区分岛弧熔岩和洋中脊(洋 底)玄武岩,前者为汇聚板块边缘型熔岩,后者为扩 散板块边缘型熔岩。由图 10 可知,二矿区的玄武岩 为洋中脊(洋底)玄武岩(杨学明等,2000),因此,该 矿区斜长角闪岩的原岩应为洋中脊(洋底)拉板玄武 岩。

#### 黑云母变粒岩

二矿区内黑云母变粒岩的微量元素配分曲线属 于右倾型(图 4F)。与该区的斜长角闪岩相比,相容 元素(如 Ni、Mg、Co、Sc、Cu 等)的含量都明显降低, 不相容元素(如 Rb、U、Th、Ba、K、Zr、Hf、Ta 等)的含量明显增高 羟稀土元素的含量增高 ,而重稀土元素的含量则变化不大。

该区黑云母变粒岩的 Eu 无异常,表明其形成与 热液活动无关。其 Ce 表现为负异常,说明其形成于 还原环境。其 Y/Ho 值接近上地壳平均值(27),Th/ U 值为 3.55,虽与原始地幔中的平均值一致,但考虑 到黑云母变粒岩的 Ce 为负异常,Th/U 原始比值应 大于 3.55(差值为 4.2 - 3.55 = 0.65),故推测该值 应与上地壳平均值一致。这些都表明该区黑云母变 粒岩的原岩来源于上地壳。

通过 A-C-FM 图解进行原岩恢复可知,黑云母 变粒岩的原岩为中性火山岩或杂砂岩(图5)。应用 Zr/TiO<sub>2</sub>-Ni 图解可知,该矿区黑云母变粒岩的原岩 为变质沉积岩而不是变质火山岩(图11),而且,陆壳 富集元素(如 REE、U、Th、Rb等)含量高。在黑云母 变粒岩中,可观察到部分石英和微斜长石颗粒具有 磨圆度(图12A、B和C),石英颗粒大小不一、接触不 规范(图12D);在一些露头上可见明显的微层理、递









变层理、斜层理等现象(周世泰,1994)。这表明该矿 区黑云变粒岩的原岩是由沉积形成的。据上所述, 该区黑云母变粒岩的原岩为杂砂岩。

Bhatia 等(1986)给出了不同构造位置的杂砂岩 的微量元素丰度和比值(图 13)(转引自赵振华, 1997)。由图 13 可见,从海洋岛弧→大陆岛弧→活 动大陆边缘→被动边缘,LREE(La、Ce、Nd)Hf含量 及Ba/Sr、Rb/Sr、La/Y和Ni/Co值增大,而铁镁质







图 11 弓长岭铁矿床二矿区黑云母变粒岩 Zr/TiO<sub>2</sub>-Ni 图解 Fig. 11 Zr/TiO<sub>2</sub>-Ni diagram of biotite leptynite from No. 2 ore district in the Gongchangling iron deposit

元素(如 Sc、V、Cu、Co、Zn )及 Ba/Rb、K/Th 和 K/U 值减小 这与源区的变化(从安山岩→英安岩→花岗 片麻岩→沉积岩)是同步的。

该区黑云母变粒岩中的 ω( Th )为( 8.46~11.7 ) × 10<sup>-6</sup>,平均为9.82×10<sup>-6</sup>;ω( La )为( 13.3~



图 12 弓长岭铁矿床二矿区黑云母变粒岩镜下结构

Fig. 12 Structure of biotite leptynite from No. 2 ore district in the Gongchangling iron deposit under microscope



图 13 黑云母变粒岩原岩位置分析图解(引自赵振华,1997) Fig. 13 Analytical diagram of biotite leptynite location (after Zhao, 1997)

37.2)×10<sup>-6</sup>,平均为 25.75×10<sup>-6</sup>; La/Sc 值平均为 2.26; Th/Sc 值平均为 0.88; Ti/Zr 值平均为 20.7;

La/Th 值平均为 2.62。这些值都等于或非常接近大陆岛弧杂砂岩的值。

由以上分析可知,该区黑云母变粒岩的原岩为 大陆岛弧的杂砂岩。

"蚀变岩"

通过 A-C-FM 图解进行原岩恢复可知,二矿区 内"蚀变岩"的投影点落于凝灰质粉砂岩与硅铁质沉 积岩之间(图 5)。

由微量元素测试结果(表 4)可知,该区"蚀变岩" 内各种微量元素的含量均很低,说明其化学成分比 较一致,具沉积成因的特征。

该区"蚀变岩"的 Ce 为负异常(图 4H),表明其 形成于还原环境;其 Th/U 值较小,也表明其形成于 还原环境。

该区"蚀变岩"的稀土元素除 Eu 外,其余元素的 趋势与磁铁石英岩一致(图 14),均表现为中稀土元 素亏损。其 Eu 为负异常,显示出在其形成过程中没 有热液的参与;其 Y/Ho 值(表 2)稍小于上地壳平均 值(27),表明其不是由海洋化学沉积形成的。

对该区"蚀变岩"的微量元素进行原始地幔标准 化后,发现富集Rb、Ta,而强亏损Sr,与磁铁石英岩





Taylor et al., 1985; Wanke et al., 1984)

Fig. 14 Primitive mantle-normalized REE patterns of magnetite-quartzite and "altered rock" from No. 2 ore district in the Gongchangling iron deposit (standard data from Taylor et al., 1985; Wanke et al., 1984)

一致。

弓长岭铁矿床中的"蚀变岩"与磁铁富矿体的空 间关系十分密切(见图 15),前者的发育程度通常与 后者的发育程度呈正相关(见图 2)。一般情况下, "蚀变岩"越是厚大的地方,富铁矿体的规模也越大, "蚀变岩"通常出现在富铁矿体的一侧,宽十几米至 几十米。该矿区的"蚀变岩"主要为绿泥片岩、石榴 绿泥片岩和绿泥石榴岩,测试结果表明,它们具有相 近的组成成分,主要差别在于 SiO<sub>2</sub> 和铁氧化物,这 种差别相同于磁铁石英岩与磁铁富矿体之间的差 别。"蚀变岩"的 CaO 含量远小于 6%(见表 1),表明 其原岩并不是斜长角闪岩。



图 15 弓长岭铁矿床二矿区磁铁富矿与"蚀变岩" Fig. 15 High- grade magnetite and "altered rock" from No. 2 ore district in the Gongchangling iron deposit

综上所述可知,该区"蚀变岩"的原岩是粉砂岩。 在区域变质过程中,粉砂岩与从磁铁石英岩中被热 液淋滤出来的 SiO<sub>2</sub> 和 FeO 发生反应而生成绿泥石, 如温度和压力近一步增强,那么,绿泥石可与 SiO<sub>2</sub> 进一步反应而生成石榴子石。

### 4.3 沉积环境

二价铁可以被搬运,因此,铁的沉积过程也就是 二价铁被氧化成三价铁的过程。目前,关于太古代 铁氧化的机制主要包括:① 由微生物光合作用所产 生的游离氧;② 直接由细菌引起的氧化;③ 太阳光 紫外线辐射。关于弓长岭矿床二矿区内铁的氧化机 制尚待继续研究,但无论何种铁氧化机制,都可以用 分层模式予以概括(图 16),水体的上层为氧化环境, 其下为还原环境。

据上述分析可知:弓长岭矿床二矿区内的铁矿





床主要与洋中脊(洋底)拉斑玄武岩互层产出,其间 夹有陆源的大陆岛弧杂砂岩,表明了适合于该地区 铁矿床沉积的古地理环境为洋壳边缘、大陆岛弧附 近,其形成环境应该相当于弧后盆地。

# 5 结 论

(1)弓长岭矿床二矿区内铁矿床的形成与海底 热液活动密切相关,在其形成过程中,很少或者没有 含铝碎屑物质的加入,是由海洋化学沉积形成的,形 成于还原环境。

(2)该矿区内,与铁矿床密切相关的斜长角闪 岩的原岩应为洋中脊(洋底)拉斑玄武岩,黑云母变 粒岩的原岩为大陆岛弧杂砂岩,"蚀变岩"的原岩是 粉砂岩。

(3)该区铁矿床的沉积环境为洋壳边缘、大陆 岛弧附近,其形成环境应该相当于弧后盆地。

#### 参考文献/References

- 宋 彪 赵敦敏,万渝生. 1992. 辽宁弓长岭含铁建造年代学研究[J]. 岩石矿物学杂志,11(4):317-323.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 郑松彦, 耿元生. 1987. 变质岩原岩图解判 别法 M]. 北京, 地质出版社.
- 杨学明 杨晓勇 陈双喜,译. Hugh R 著. 2000. 岩石地球化学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社.

赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京 科学出版社.

- 周世泰. 1994. 鞍山-本溪地区条带状铁矿地质 M] 北京:地质出版社.
- Andrey B , John F S , Noah P , Bryan K , Axel H , Kurt O K and Olivier J R. 2010. Iron formation : The sedimentary product of a complex interplay among mantle , tectonic , oceanic , and biospheric processes [ J ]. Econ. Geol. , 105 : 467-508.
- Appel P W U. 1983. Rare earth elements in the early Archean Isua iron-formation, West Greenland J ]. Precambrian Research, 20:243-258.
- Bhatia M and Crook A. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 92:181-193.
- Cornelis K. 2005. Some Precambrian banded iron formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin[J]. American Mineralogist, 90:1473-1499.
- Danielson A, Moller P and Dulski P. 1992. The europium anomalies in banded iron formations and the thermal history of the oceanic crust [J]. Chemical Geology, 97 (1-2):89-100.

- David L H and Graham A L. 2004. Barite , BIFs and bugs : Evidence for the evolution of the Earth 's early hydrosphere[ J ]. Earth and Planetary Science Letters , 220(1-2):41-55.
- Franco P. 2009. Hydrothermal processes and mineral systems M]. Australia : Springer Geological survey of western Australia. 843-857.
- Harold L J. 1983. Distribution of banded iron-formation in space and time J. Developments in Precambrian Geology , 6:471-490.
- Jan V and William C. 1976. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr in Precambrian carbonates as an index of crustal evolutior [J]. Geochim. Cosmochim. Acta , 40(8): 905-914.
- Louis A D and Stein B J. 1990. The chemical evolution of Precambrian seawater: Evidence from REEs in banded iron formations[ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta, 54(11):2965-2977.
- Michael B. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium J J. Chemical Geology , 93:219-230.
- Michael B and Peter D. 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge : Implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater J ]. Chemical Geology , 155(1-2):77-90.
- Michael B and Brian W A. 2009. Distribution of high field strength elements (Y, Zr, REE, Hf, Ta, Th, U) in adjacent magnetite and chert bands and in reference standards FeR-3 and FeR-4 from the Temagami iron-formation, Canada, and the Redox level of the Neoarchean ocear[J] Precambrian Research, 174:337-346.
- Peter W and Uitterdijk A. 1983. Rare earth elements in the early archaean Isua iron-formation, West Greenland J. Precambrian Research, 20(2-4):243-258.
- Stein B J and Mario R P. 1988. An isotopic study of the Hamersley and Michipicoten banded iron formations : The source of REE and Fe in Archean oceans J J. Earth and Planetary Science Letters , 87 1-2 ): 29-44.
- Suayip K. 2010. Trace and rare-earth element behaviors during alteration and mineralization in the Attepe iron deposits (Feke-Adana, southern Turkey J J]. Journal of Geochemical Exploration, 105:51-74.

Taylor S and McLennan S. 1985. The continental crust ; Its composition and evolution [M]. Oxford , United Kingdom : Blackwell Sci. Publ.

- Thomas S , Gerd M and Lester R M. 1988. Complex formation vs. disproportionation : Lanthanie chlorides ,  $MCl_2(M = Nd, Sm, Eu, Dy, Tm, Yb)$ , under the influence of alkali chlorides J ]. Journal of the Less Common Metals , 137(1-2):187-193.
- Wanke H , Dreibus G and Jagoutz E. 1984. Mantle chemistry and accretion history of the Earth M J. Berlin : Springer-Verlag.
- Yasuhiro K , Kosei E and Hiroshi O. 2006. Rare earth elements in Precambrian banded iron formation : Secular changes of Ce and Eu anomalies and evolution of atmospheric oxyger[ J ]. Memoir-Geological Society of America , 198 : 269-289.