

山东昌邑莲花山铁矿矿床地质与矿石稀土、微量元素特征

王金辉, 王巧云, 刘汉栋, 王立功

(山东省地质调查院, 山东 济南 250013)

摘要: 莲花山铁矿位于昌邑-安丘铁成矿带的中部, 铁矿体赋存于古元古代粉子山群小宋组中。本文通过矿石地球化学特征及其与矽卡岩矿物组合和赋矿围岩结构特征的对比研究, 证明了莲花山铁矿与条带状铁矿相似。莲花山铁矿矿石稀土元素含量较低, 经页岩标准化的稀土元素配分模式呈现轻稀土元素亏损、重稀土元素富集的特征, 具有明显的 Eu、Y、La 异常, 为无明显 Ce 异常, Y/Ho 比值反映了在其沉积时受到海水作用的影响, 表明莲花山铁矿的稀土元素来源于火山热液和海水的混合溶液。微量元素中 Ti、V、Co、Ni、Mn、Sr、Ba 等含量较低, 原始地幔标准化的微量元素配分曲线显示 U、La、Hf 呈正异常, Ba、Nb、Ta、Sr 呈负异常, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Ti/V、Ni/Co 和 Sr/Ba 的比值指示了莲花山铁矿成矿物质来源于火山物质的沉积。研究结果表明, 莲花山铁矿成矿作用源于火山热液与海水的混合, 成矿物质来自火山沉积物, 其地质与地球化学特征与五台山铁矿一致, 为火山沉积变质型铁矿床。

关键词: 莲花山铁矿, 条带状铁矿, 稀土元素, 微量元素, 沉积环境

中图分类号: P618.31; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)02-0355-10

Geology, ore REE and trace elements characteristics of the Lianhuashan iron ore deposit in Changyi County, Shandong Province

WANG Jin-hui, WANG Qiao-yun, LIU Han-dong and WANG Li-gong

(Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250013, China)

Abstract: Located in the middle part of the Changyi-Anqiu iron ore belt, the Lianhuashan iron ore deposit is considered to be a sedimentary metamorphic iron ore deposit occurring in the Xiaosong Formation of early Paleozoic Fenzishan Group. A comparative study of rock mineral composition, host rock and structure characteristics between this deposit and the skarn iron deposit shows that the Lianhuashan deposit is similar to the banded iron ore deposit. The REE values of the ore deposit are low. The shale-normalized REE patterns show relative depletion of LREE and enrichment of HREE, with obvious Eu, Y and La anomalies and no visible Ce anomaly. These characteristics indicate that REE of the Lianhuashan iron ore deposit originated from the mixture of volcanic hydrothermal and seawater. Y/Ho ratios show that the Lianhuashan iron ore deposit was metasomatised by seawater during its deposition. Trace elements, such as Ti, V, Co, Ni, Mn, Sr and Ba, are of low content. In the primary mantle-normalized trace element patterns, U, La and Hf have positive anomalies, Ba, Nb, Ta and Sr show negative anomalies, and ratios of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, Ni/Co, Sr/Ba and Ti/V indicate that the ore-forming materials were derived from the sedimentation of the volcanic matter. This study suggests that ferruginous material of Lianhuashan BIF was associated with volcanic hydrothermal solution and formed in a marine chemical sedimentary environment.

收稿日期: 2013-04-24; 修订日期: 2013-12-02

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查专项项目(1212011085308)

作者简介: 王金辉(1979-), 男, 汉族, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质矿产方面的研究, E-mail: wjhbabysd@163.com

Key words: Lianhuashan iron ore deposit; BIF; REE; trace element; sedimentary environment

昌邑-安丘铁成矿带为山东省重要的铁矿带,该矿带总体呈 NNE 向展布,自北而南分布着西铁埠、大幸台、大李家、洼子、大泥河、南任、毛家寨、郑家坡、莲花山、东辛庄、搭连营、常家屯、盘马埠、高戈庄等中小型铁矿床(图 1)。前人研究指出,该地区存在着 3 种不同类型的铁矿,即岩浆期后热液型,以莱州

西铁埠、大泥河和昌邑毛家寨矿床为代表;沉积变质型铁矿,以东辛庄、郑家坡、夹河套铁矿床为代表;岩浆熔离型铁矿,以高戈庄矿床为代表(曾广湘等, 1998; 孔庆友等, 2006; 倪振平等, 2010)。该成矿带总体具有共同发育多成因类型矿床的特点。

莲花山铁矿位于该成矿带中部(图 1),是近来发

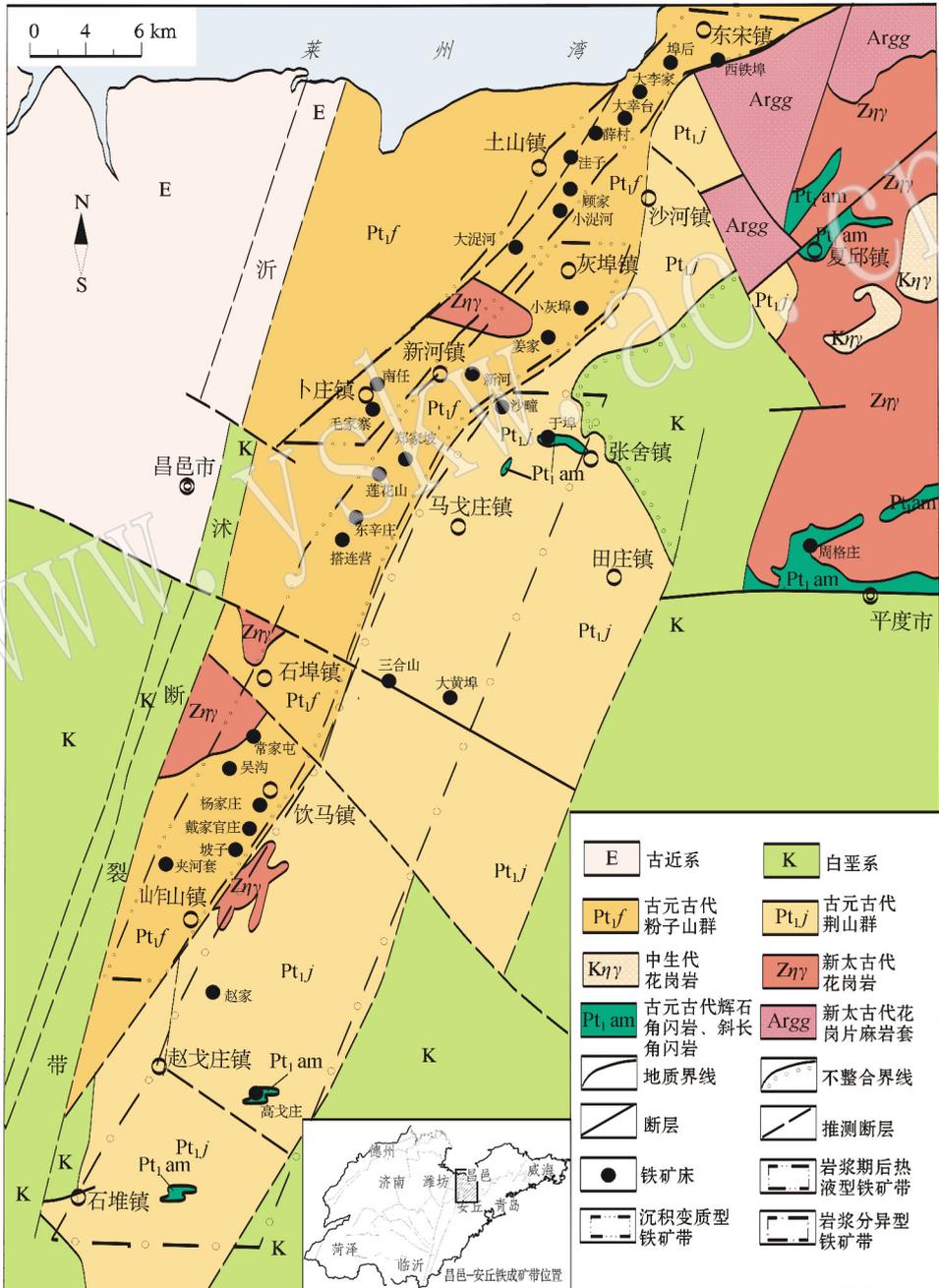


图 1 昌邑-安丘铁成矿带区域地质简图(据王松涛等, 2007)

Fig. 1 Simplified geological map of the Changyi-Anqiu iron ore belt (after Wang Songtao *et al.*, 2007)

现的具有中型规模的铁矿床,经济意义显著。2003年和2005年,山东省第四地质矿产勘查院分别进行了详查和勘探工作,累计探明铁矿石(332+333)1020.3万t。前人在铁矿床成因、矿床地质特征、矿石组构做了不少的研究工作,曾广湘等(1998)对该矿床进行了简单描述,对矿床成因进行了基本分析,认为该铁矿铁质组分与海底基性、中酸性火山喷溢活动关系密切,幔源物质中的铁质经火山喷溢形式带入水中,经分解形成硅胶体而沉积,再经以后的区域变质作用形成变质铁矿。倪振平等(2010)^①对莲花山铁矿的成因进行了详细研究,认为其为古元古代海底基性、超基性火山喷发形成硅铁沉积建造,后经区域变质作用角闪岩相的改造,在热力和定向压力下产生重结晶和片理化,生成磁铁矿、石英和角闪石等主要矿物,形成条带状含铁变质建造,最后对该类矿床的成矿要素进行了研究和总结,根据成矿要素建立了该矿床的成矿模式^②。然而目前对该矿床地质特征的精细研究和典型矿物的微量元素地球化学研究几乎没有,使得成矿作用和成矿物质来源缺乏有力的证据。因此,本文开展了矿床的地质特征研究,在此基础上选择矿石进行了微量和稀土元素分析。由于莲花山铁矿的特点与五台山地区条带状铁矿相似,后者在矿石的稀土和微量元素分析研究方面已经比较成熟,故将两者进行了地质和地球化学特征的对比,并与区域矿床进行对比,探讨了矿床的成因。

1 地质背景及矿床特征

1.1 地质背景

昌邑-安丘铁成矿带位于沂沭断裂带的东侧,胶北隆起的西南部(图1)。区内基底由古元古界荆山群和粉子山群组成,主体上,粉子山群分布于成矿带的西侧,荆山群分布于成矿带的东侧,二者通过灰埠-岵山断裂呈断层接触。已有研究表明,荆山群与粉子山群为同时异相的古元古代沉积变质岩组合(宋明春等,2003),前者岩性主要为变粒岩、大理岩、片麻岩、透辉岩、含石墨岩系等,后者岩性主要有石英岩、黑云变粒岩、黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、大理

岩等。区内盖层由中生界白垩系和新生界古近系、第四系构成。除第四系广布全区外,其余零星出露。受沂沭断裂带影响,区内构造复杂,断裂以北东-北北东向为主,北西向断裂切断北东-北北东向断裂。本区岩浆岩均为小岩体,零星分布,包括古元古代的辉石角闪岩、斜长角闪岩,新元古代的花岗岩,中生代燕山期的花岗岩和花岗闪长岩等。从区域赋矿岩性看,荆山群内赋存有岩浆期后热液型铁矿床和岩浆熔离型铁矿床,粉子山群内主要赋存沉积变质型铁矿床。

1.2 矿床地质

莲花山铁矿位于昌邑市东北约13 km,为一隐伏型铁矿(图2)。铁矿体赋存于古元古代粉子山群小宋组中,U-Pb同位素年龄为2429 Ma^③,其岩性为黑云变粒岩。其下部以石榴石英岩和云英片岩为主,含两个稳定的矿体(为主矿体);中部以石榴云母片岩和斜长角闪岩为主,夹3~5个不太稳定的铁矿体;上部以角闪片岩、斜长角闪岩为主。目前,莲花山铁矿床共圈定11个矿体,Ⅶ₁号为主矿体,占矿床资源量的36.30%,次为Ⅸ₁、Ⅷ、Ⅴ、Ⅵ号矿体,I、II、Ⅲ₁、Ⅲ₂、Ⅳ₁、Ⅳ₂号矿体规模较小。

如图3所示,矿体呈层状、似层状、透镜状,呈平行排列或斜列产出,产状与围岩一致。矿体一般与顶底板岩石界线分明,沿走向与倾向常见夹石且具分枝复合现象。矿化连续,一般走向延伸达数百米,沿倾向延深百余米到数百米,两端多具分枝变薄或呈尖灭趋势,品位也有所降低。

矿石呈黑色块状,石英与磁铁矿呈条带状特点,条带一般宽2~3 mm,黑白相间(图4a)。矿物以磁铁矿为主(图4b),少量赤铁矿、褐铁矿、黄铁矿、白铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿,其中磁铁矿一般含量20%~35%,个别可达60%。黄铁矿较为普遍,含量有时可达5%左右,硫化矿物交代磁铁矿,金属氧化物较少,有赤铁矿及褐铁矿。脉石矿物以石英为主,含量为24%~36%。其次为黑云母、角闪石,含量可达5%~20%,两者含量互为消长,有时含有较多的经区域变质阶段形成的石榴子石,形成石榴黑云变粒岩。其它脉石矿物还有少量斜长石、绿泥石、绿帘石、透闪石及方解石^④。

① 倪振平等. 2010. 山东省重要矿产资源潜力评价报告.

② 司乃欣等. 2006. 山东省昌邑市东辛庄—莲花山矿区莲花山铁矿资源储量报告.

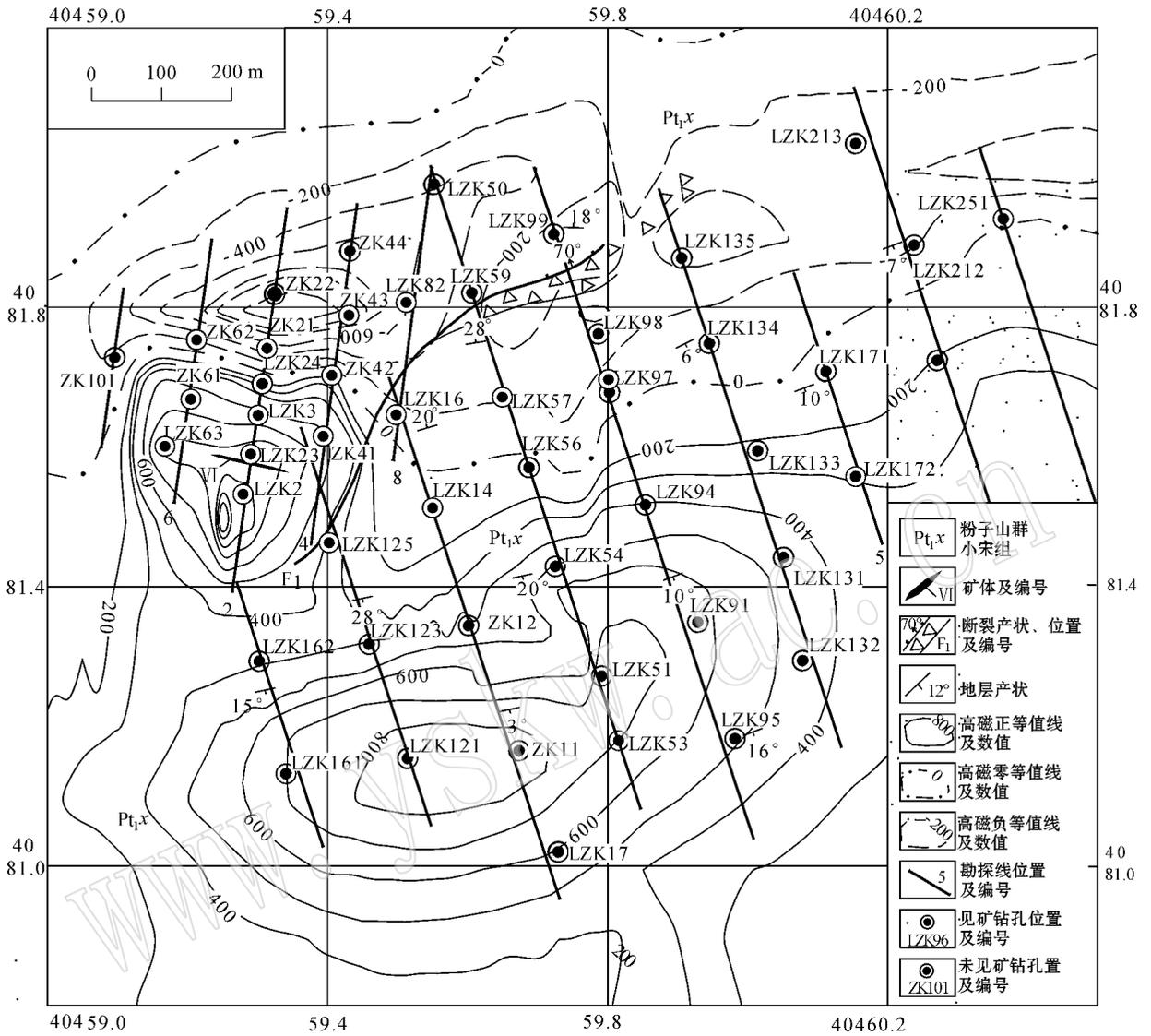


图 2 莲花山铁矿基岩地质图(附磁异常分布)

Fig. 2 Bedrock map of the Lianhuashan iron ore deposit (with high precision magnetic anomalies)

2 条带状铁矿石岩石化学特征

2.1 矿石镜下特征

显微镜下观察,条带状铁矿石定名为角闪磁铁矿石英岩,磁铁矿为粒状变晶, $d=0.1\sim 0.5\text{ mm}$,有的呈条带状分布。角闪石为粒状变晶, $d=0.2\sim 0.5\text{ mm}$,具绿色多色性, $N_g \wedge c=27^\circ$,是绿色普通闪石,大体平行与片麻理定向排列,有的呈条纹状分布,条纹平行片麻理,纹纹宽度为 1 mm 左右。石英为粒状变晶, $d=0.2\sim 0.4\text{ mm}$,有波状消光,均匀分布。斜长石为粒状变晶, $d=0.2\sim 0.3\text{ mm}$,与角闪石共

生。岩石中的角闪石与粒状矿物构成片麻状,深色矿物和浅色矿物形成深浅色条带状,条带宽在 $1\sim 3\text{ mm}$,条带平行片麻理分布(图 4b)。

2.2 矿石主量元素特征

在山东省第四地质矿产勘查院试验测试中心对采自 VII₁ 号矿体的条带状铁矿石进行了常量元素分析,采用方法: CO_2 非水滴定法, S 碘量滴定法, H_2O^+ 重量法, FeO 重铬酸钾容量法,其它元素为 X 射线荧光光谱法。分析结果见表 1。

分析结果表明,莲花山铁矿石中 TFe 的含量变化范围 $30.58\%\sim 40.07\%$,平均值为 37.39% ,比五台山铁矿中的含量略高。mFe 含量变化范围为 $28.48\%\sim$

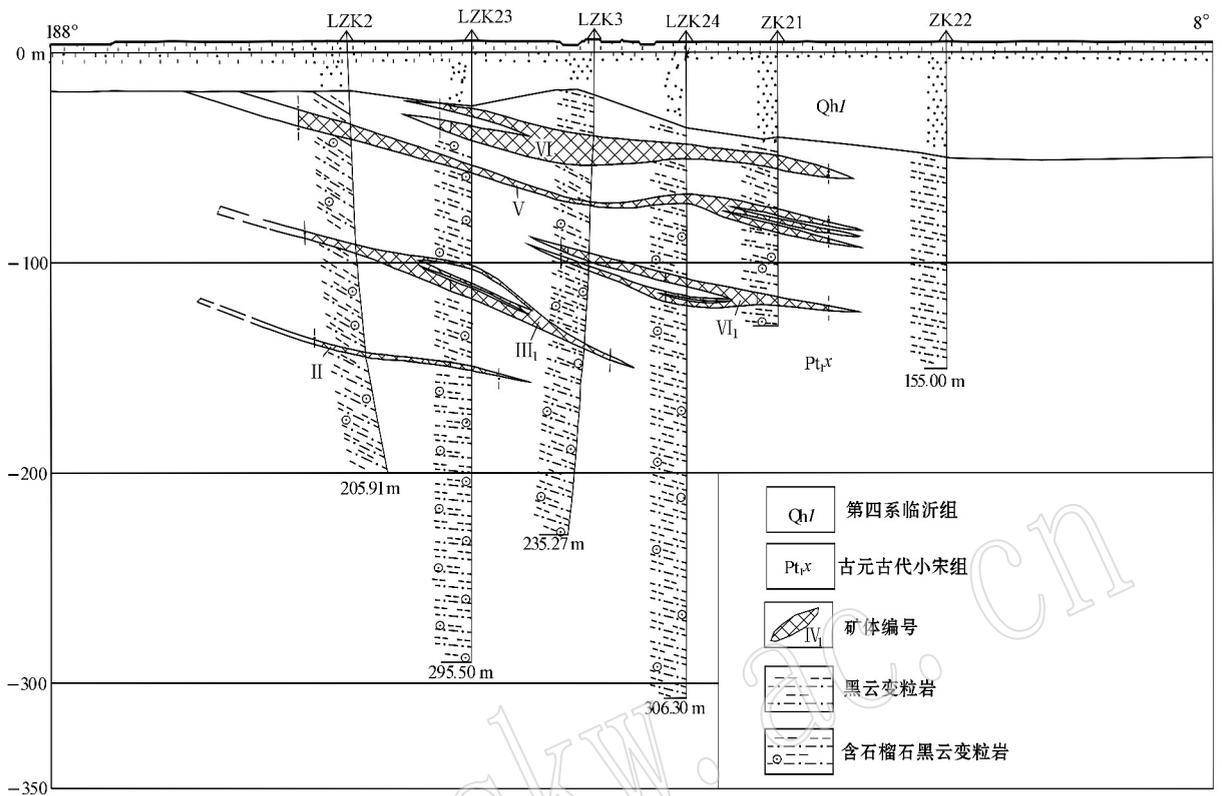


图3 莲花山铁矿矿区2号勘探线剖面图

Fig. 3 Geological section along No. 2 exploration line of the Lianhuashan iron ore deposit

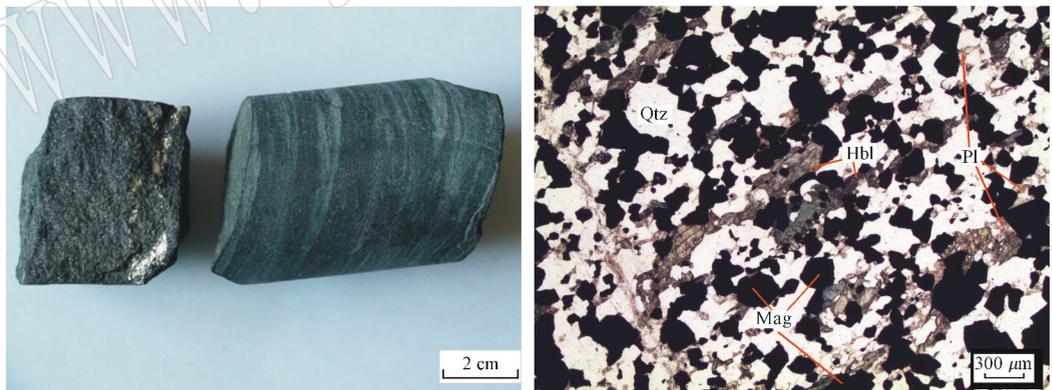


图4 莲花山铁矿条带状矿石(a)和细粒状变晶结构的角闪磁铁矿石英岩(b,单偏光)照片

Fig. 4 Photos of banded iron ore (a) and fine-grained granoblastic texture of amphibole magnetite (b, plain light) in the Lianhuashan BIF quartzite deposit

Qtz—石英; Mag—磁铁矿; Hbl—角闪石; Pl—斜长石

Qtz—quartz; Mag—magnetite; Hb—hornblende; Pl—plagioclase

35.74%，平均 35.14%。SiO₂ 含量变化范围为 39.78%~48.14%，平均 42.15%，比五台山铁矿中的含量略低。TiO₂ 含量的变化范围为 0.05%~0.17%，平均 0.11%，比五台山铁矿的略高。Al₂O₃ 含量变化范围为 1.10%~4.47%，平均 2.06%，比

五台山铁矿的高。MnO 含量变化范围为 0.02%~0.07%，平均 0.04%，比五台山铁矿略低。CaO 含量变化范围为 0.68%~1.47%，平均 1.09%，比五台山铁矿低。Na₂O 含量变化范围为 0.14%~0.16%，平均 0.15%。比五台山铁矿高。K₂O 含量变化范围

表 1 莲花山条带状铁矿石的主量元素含量

$\omega_B/\%$

Table 1 Content of major elements in the Lianhuashan iron ore deposit

产地	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	S	CO ₂	TFe	mFe
莲花山	LHS1	48.14	0.17	4.47	27.21	14.86	0.07	1.68	1.25	0.16	0.89	0.05	0.68	0.04	0.32	30.58	28.48
	LHS2	39.78	0.16	1.55	37.93	17.42	0.04	1.02	0.68	0.15	0.39	0.03	0.61	0.03	0.21	40.07	38.11
	LHS3	39.82	0.13	2.41	36.33	17.24	0.05	1.35	1.26	0.15	0.27	0.03	0.56	0.03	0.37	38.81	36.44
	LHS4	43.50	0.08	1.41	35.93	16.17	0.02	0.93	0.77	0.14	0.13	0.03	0.55	0.12	0.21	37.70	36.02
	LHS5	40.15	0.07	1.42	35.77	17.06	0.05	1.09	1.47	0.15	0.14	0.03	1.18	0.16	1.26	38.28	36.06
	LHS6	41.52	0.05	1.10	34.67	18.82	0.03	1.70	1.10	0.15	0.11	0.01	0.44	0.03	0.26	38.88	35.74
	平均	42.15	0.11	2.06	34.64	16.93	0.04	1.30	1.09	0.15	0.32	0.03	0.67	0.07	0.44	37.39	35.14
五台山 9 样平均	47.41	0.04	0.80	20.22	21.60	0.14	2.26	2.14	0.06	0.12	0.26					30.94	

五台山样品数据引自沈保丰等(1994)。

为 0.11%~0.89% ,平均 0.32% ,比五台山铁矿高。

由表 1 可知,莲花山铁矿床中含量最高的化学成分为 SiO₂、Fe₂O₃ 和 FeO,三者之和 90.21%~95.6% ,其他组分(TiO₂、Al₂O₃、MnO、CaO、Na₂O、K₂O、P₂O₅、S)的含量都很低,这些特征与五台山条带状铁矿一致,是由极少碎屑物加入的化学沉积物。

图 5 为条带状铁矿 TFe-(CaO+MgO)-SiO₂ 图解,从图中可以看出,莲花山铁矿与鞍山五台山铁矿的分布范围一致,均位于世界条带状铁矿分布范围。另外,从岩石化学成分看,6 件样品平均值 K₂O>Na₂O,表明岩石的原岩为性质有异的碎屑沉积岩。在判断原岩种类的 Log(Na₂O/K₂O)-Log(SiO₂/Al₂O₃) 图解上(图 6)6 件样品有 5 件投在次岩屑砂岩区,1 件投在次长石砂岩区,表明了其原岩类型的单一性。

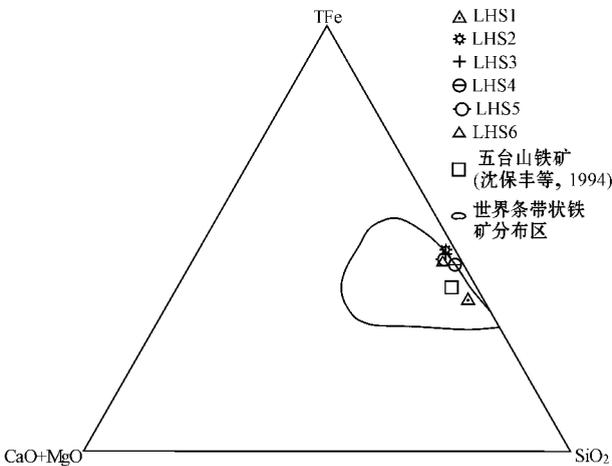


图 5 TFe-(CaO+MgO)-SiO₂ 图解 (引自沈其韩等,2009)

Fig. 5 TFe-(CaO+MgO)-SiO₂ diagram (after Shen Qihan et al., 2009)

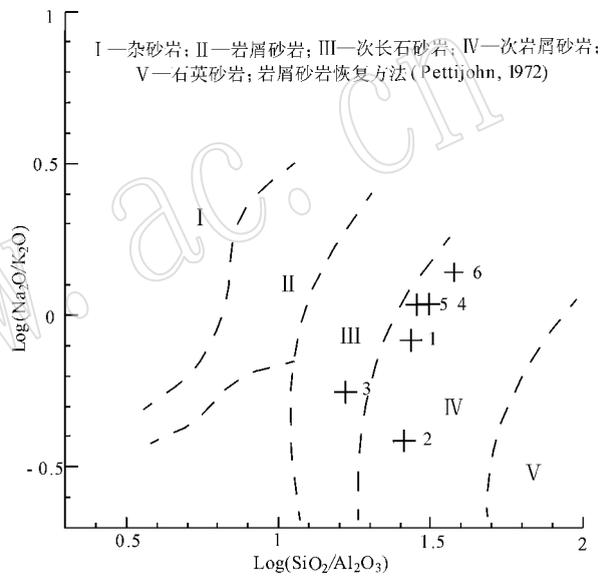


图 6 莲花山铁矿 Log(Na₂O/K₂O)-Log(SiO₂/Al₂O₃) 投影图(转引自毛光周等,2011)

Fig. 6 Log(Na₂O/K₂O)-Log(SiO₂/Al₂O₃) diagram in the Lianhuashan BIF deposit (after Mao Guangzhou et al., 2011)

2.3 矿石稀土元素和微量元素特征

莲花山铁矿 6 个样品的稀土元素含量由山东省第四地质矿产勘查院实验测试中心采用电感耦合等离子体质谱法完成,分析结果见表 2。表中同时列出了五台山铁矿样品的分析结果加以对比。表 2 中 La 异常用 $La/La^* = La_{PAAS} / (3 Pr_{PAAS} - 2 Nd_{PAAS})$ 来计算,Ce 异常用 $Ce/Ce^* = Ce_{PAAS} / (2 Pr_{PAAS} - Nd_{PAAS})$ 来计算,Y 异常用 $Y/Y^* = 2 Y_{PAAS} / (Dy_{PAAS} + Ho_{PAAS})$ 来计算,Eu 异常用 $Eu/Eu^* = 2 Eu_{PAAS} / (Sm_{PAAS} + Gd_{PAAS})$ 来计算(Robert et al., 2004)。PAAS 是太古宙后平均澳大利亚沉积岩。经 PAAS 标准化后的 REE 配分曲线如图 7 所示。

表 2 山东莲花山及五台山条带状铁矿中稀土元素含量

$\omega_B/10^{-6}$

Table 2 REE content of BIF in the Lianhuashan ore deposit and Wutaishan BIF ore deposit

样品号	LHS1	LHS2	LHS3	LHS4	LHS5	LHS6	平均	五台山铁矿
La	6.07	4.43	5.59	3.47	3.05	2.58	4.20	6.48
Ce	10.27	6.92	8.85	5.16	4.57	3.81	6.60	14.00
Pr	1.41	0.95	1.15	0.70	0.62	0.50	0.89	1.33
Nd	5.26	3.61	4.06	2.54	2.33	1.89	3.28	5.28
Sm	1.10	0.79	0.80	0.50	0.49	0.39	0.68	1.12
Eu	0.35	0.29	0.27	0.17	0.19	0.16	0.24	0.60
Gd	1.02	0.77	0.82	0.52	0.51	0.42	0.68	1.20
Tb	0.19	0.14	0.15	0.09	0.09	0.08	0.12	0.25
Dy	1.13	0.87	0.91	0.61	0.54	0.47	0.76	.98
Ho	0.23	0.18	0.21	0.12	0.12	0.10	0.16	0.22
Er	0.62	0.49	0.61	0.38	0.34	0.31	0.46	0.69
Tm	0.12	0.09	0.13	0.07	0.07	0.06	0.09	0.12
Yb	0.62	0.47	0.60	0.42	0.37	0.32	0.47	0.72
Lu	0.08	0.06	0.08	0.06	0.05	0.04	0.06	0.13
Y	6.94	6.34	7.21	5.31	5.26	5.03	6.02	6.74
ΣREE	35.41	26.40	31.44	20.12	18.60	16.16	24.69	39.86
LREE/HREE	2.23	1.81	1.93	1.65	1.53	1.37	1.75	1.37
La/Yb	9.79	9.43	9.32	8.26	8.24	8.06	8.85	9.00
Y/Ho	30.17	35.22	34.33	44.25	43.83	50.30	39.69	30.64
Sm/Nd	0.21	0.22	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21
Pr/Yb	2.27	2.02	1.92	1.67	1.68	1.56	1.85	1.85
Eu/Sm	0.32	0.37	0.34	0.34	0.39	0.41	0.36	0.54
Y/Y*	1.03	1.22	1.25	1.49	1.57	1.76	1.39	1.16
La/La*	1.09	1.23	1.10	1.18	1.27	1.35	1.20	1.21
Ce/Ce*	0.84	0.86	0.84	0.83	0.86	0.89	0.85	1.21
Eu/Eu*	1.76	2.08	1.82	1.83	2.15	2.26	1.98	2.42

五台山铁矿数据为骆辉等(2002) 4个样品(97404B、97404C、96W41和98-3)数据的平均值。

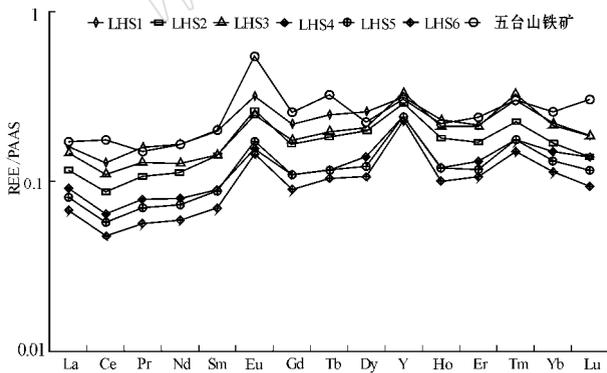


图 7 莲花山铁矿与五台山铁矿稀土分配曲线 (PAAS 标准化数据据 McLennan, 1989)

Fig. 7 PAAS-normalized REE patterns of the Lianhuashan and Wutaishan BIF ore deposit(standard data after McLennan, 1989)

由表 2 和图 7 可见,莲花山铁矿稀土元素总量较低,范围为(16.16~35.41)×10⁻⁶,平均为 24.69×10⁻⁶,低于五台山地区铁矿,这是太古宙海洋沉积物的一个特征(沈其韩等,2009)。从图 3 上看,莲花

山条带状铁矿样品经 PAAS 标准化后呈现非常一致的分配曲线,其特征是 LREE 相对亏损,HREE 相对富集,无明显的 Ce* 异常,Ce/Ce*=(0.84~0.89)×10⁻⁶,具强烈的 Eu 异常,Eu/Eu*=(1.76~2.26)×10⁻⁶。Eu 异常的大小可以代表混合溶液中高温热液的相对贡献量,也就是说,释放到海水中的高温热液越多,Eu 的正异常越明显(Danielson *et al.*, 1992)。有较明显的 La 异常,La/La*=(1.09~1.35)×10⁻⁶,Y 显示明显的正异常,Y/Y*=(1.03~1.76)×10⁻⁶,这与五台山铁矿和世界条带状铁矿的 REY 分配曲线特征一致,表明它们都属于早前寒武纪海洋化学沉积的产物。

莲花山铁矿 6 个样品的微量元素含量由山东省第四地质矿产勘查院实验测试中心测试,其中 Ga、Rb、P、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Sr、Zr、Nb、Ba、Pb、Th 为 X 射线荧光光谱法分析,Ge、As 为原子荧光光谱法分析,Hf、Ta、Sc、V 为电感耦合等离子体质谱法分析。分析结果见表 3,经原始地幔标准化后的

微量元素配分曲线图见图 8。从表 3 和图 8 中可以看出,有 1 个样品配分曲线与其余存在差异,可能样品分析存在着问题,去掉该样品可以明显看出样品具有 U、La、Hf 正异常, Ba、Nb、Ta、Sr 呈负异常,其它元素含量都比较低。

3 矿床成因探讨

莲花山铁矿床矿体呈层状、似层状、透镜状,呈平行排列或斜列产出,矿石为黑色块状,石英与磁铁矿呈条带状,黑白相间,矿床中含量最高的化学成分

为 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 FeO 。与矽卡岩铁矿床相比,虽然金属矿物都以磁铁矿为主,少量赤铁矿、黄铁矿、白铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿,但两者有以下两点不同: ① 矽卡岩矿物组合及结构上存在差别。莲花山铁蚀变矿物主要为绿帘石化、蛇纹石化、硅化、绿泥石化等,结构以粒状变晶结构为主,鳞片状变晶结构次之,而典型矽卡岩矿床出现石榴子石、透辉石、阳起石等矽卡岩矿物,为它形-半自型晶粒状结构、交待残余结构; ② 赋矿围岩存在着一定差别。莲花山铁矿赋存于小宋组,为发育在陆源浅滩-浅海环境的沉积建造,现为变质岩,而典型矽卡岩型矿床围岩往

表 3 山东莲花山条带状铁矿及五台山铁矿中微量元素含量

$\omega_B/10^{-6}$

Table 3 Trace elements of BIF in the Lianhuashan iron ore deposit and the Wutaishan iron ore deposit

样品号	LHS1	LHS2	LHS3	LHS4	LHS5	LHS6	平均	五台山铁矿
Rb	32.00	12.80	8.80	7.10	7.30	7.10	12.52	1.91
Sr	169.90	28.90	45.00	51.10	43.30	9.50	57.95	34.35
Ba	167.40	71.30	39.60	25.70	112.20	15.10	71.88	14.30
Ga	10.70	9.60	11.40	6.80	9.10	6.70	9.05	3.57
Nb	1.90	1.50	0.70	1.30	1.80	0.80	1.33	0.40
Ta	0.11	0.05	0.06	0.03	0.04	0.03	0.05	0.06
Zr	24.30	18.10	17.80	15.10	13.50	12.70	16.92	9.28
Hf	0.73	0.52	0.65	0.43	0.49	0.42	0.54	0.26
Th	1.79	1.03	2.24	0.93	0.75	0.79	1.26	0.56
V	37.60	42.00	54.90	13.20	8.70	11.30	27.95	
Cr	25.10	16.10	16.00	11.80	11.50	7.40	14.65	8.00
Co	9.10	5.70	1.00	6.90	5.70	1.00	4.90	4.99
Ni	23.50	15.40	22.30	14.50	13.00	7.80	16.08	5.07
Sc	13.50	6.10	7.70	1.00	1.00	1.00	5.05	0.82
U	0.51	0.28	0.65	0.29	0.18	0.30	0.37	0.14
Ti	885.00	881.00	701.00	335.00	348.00	268.00	569.67	479.48
Cu	56.6	12.1	10.1	14.6	28.0	3.5	20.82	24.70
Zn	96.9	41.5	72.7	33.3	107.6	54.2	67.70	49.90
Pb	26.5	4.3	6.7	8.4	10.8	8.4	10.85	2.29
Ge	3.58	2.82	2.92	2.70	4.26	0.52	2.80	5.62
K	7400	3200	2200	1100	1100	900	2700	
P	443	322	354	360	266	145	314.98	
Sr/Ba	1.01	0.41	1.14	1.99	0.39	0.63	0.93	2.40
Sr/Rb	5.31	2.26	5.11	7.20	5.93	1.34	4.52	17.98
Ba/Rb	5.23	5.57	4.50	3.62	15.37	2.13	6.07	7.49
Co/Zn	0.09	0.14	0.01	0.21	0.05	0.02	0.09	0.10
Ni/Zn	0.24	0.37	0.31	0.44	0.12	0.14	0.27	0.10
Ti/V	23.54	20.98	12.77	25.38	40.00	23.72	24.40	
Ni/Co	2.58	2.70	22.30	2.10	2.28	7.80	6.63	1.02
Cr/Ni	1.07	1.05	0.72	0.81	0.88	0.95	0.91	1.58
Ga/Ge	2.99	3.40	3.90	2.52	2.14	12.88	4.64	0.64
Nb/Ta	17.27	30.00	11.67	43.33	45.00	26.67	28.99	6.67
Th/U	3.51	3.68	3.45	3.21	4.17	2.63	3.44	4.00

五台山铁矿数据为沈其韩等(2009) 2 个样品的平均值。

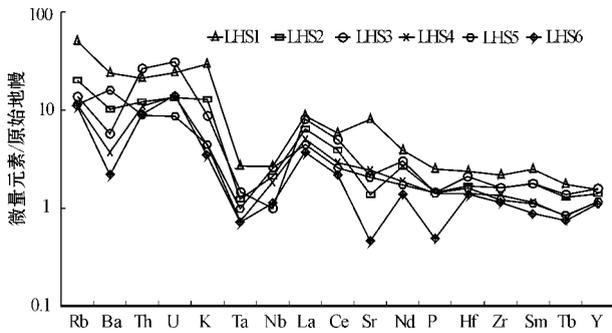


图8 莲花山铁矿微量元素配分曲线

(原始地幔数据据 McDonough 和 Sun, 1989)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace elements patterns of the Lianhuashan BIF deposit (primitive mantle data after McDonough and Sun, 1989)

往为碳酸盐岩。另外,在莲花山矿区,未发现岩浆侵入体,而矽卡岩矿床形成则和岩浆侵入体密切相关。因此莲花山铁矿床不是矽卡岩型铁矿,从赋矿围岩、矿物组合及结构特征看,与带状铁矿相似。

矿床的地球化学特征提供了进一步的佐证和限制。稀土元素中 Y^{3+} 和 Ho^{3+} 因具有相近的离子半径而被认为具有相近的地球化学行为,但由于表层络合能力的不同,使得 Ho 从海水中沉淀的速率比 Y 约高 2 倍, Y/Ho 的比值成为区别海相和非海相沉积环境的有用指标 (Nozaki *et al.*, 1997)。研究表明,球粒陨石的 Y/Ho 比值为 26~28, 上地壳岩石和陆源沉积物的 Y/Ho 比值与球粒陨石相似, 现代海水的 Y/Ho 比值为 44~74 (Bau and Dulski, 1996)。莲花山地区的 Y/Ho 变化范围为 30.13~50.30, 平均值为 37.63, 五台山铁矿比值 30.64, 均接近于海水的 Y/Ho 比值, 因此, 莲花山铁矿是在特殊背景条件下和火山作用下的海水化学沉积, 成矿物质来源于火山热液和海水的混合溶液。一般认为火山岩和海相沉积物的 Sr/Ba 比值大于 1, 陆源沉积岩的 Sr/Ba 比值小于 1 (沈其韩等, 2009), 莲花山条带状铁矿去掉样品 LHS5, Sr/Ba 比值范围为 0.41~1.99, 平均值 1.04, 五台山铁矿的 Sr/Ba 值均大于 1, 与火山岩和海相沉积物的比值一致。一般认为沉积变质铁矿的 SiO_2/Al_2O_3 的比值应小于 10, 火山沉积变质铁矿的 SiO_2/Al_2O_3 应大于 10 (沈其韩等, 2009)。从表 1 中可看出, 莲花山铁矿的 SiO_2/Al_2O_3 比值变化范围 10.77~37.75, 平均值为 20.46, 五台山铁矿的 SiO_2/Al_2O_3 为 59.26, 它们比值虽有差异, 但均大于 10, 指示了莲花山铁矿与火山沉积作用有关, 与该铁

矿的宏观建造特征一致。Ti/V 比值常用来区分成矿物质来源和条带状铁矿的成因类型, Plaksanko 等认为, 在铁质页岩中, Ti、V 的含量的平均比值变化于 1.33~10.9 之间, 在火山建造中则为 13~85 (转引自沈其韩等, 2009)。莲花山铁矿的 Ti/V 比值为 12.77~40.00, 平均值为 24.40, 为火山建造。火山沉积铁矿中 Cr、Ni、Co 的含量一般高于陆源碎屑, 而对 Ni/Co 比值, 火山沉积的铁矿的该值一般为 $n \times 10^{-6} \sim n \times 10^{-5}$, 五台山铁矿为 1.02×10^{-6} , 比陆源沉积岩的 $n \times 10^{-5}$ 低 1 个数量级, 故莲花山铁矿更接近于火山沉积岩的范围。以上特征总体反映出莲花山铁矿为海底环境下形成的火山沉积变质型铁矿床。从 Ce/Ce^* 比值看, 莲花山铁矿 Ce/Ce^* 比值为 0.85, 表明莲花山成矿时的环境为氧化环境。

另外 BIF 沉积年龄不同, Eu 正异常的大小不同, 例如, 中太古代 Eu/Eu^* 平均值为 3.65 ($n=4$), 新太古代 Eu/Eu^* 平均值为 2.84 ($n=8$), 古元古代 Eu/Eu^* 平均值为 2.01 ($n=10$)。这些数据表明, 从中太古代—新太古代到古元古代, BIF 钕正异常逐渐减小 (李志红等, 2010)。莲花山铁矿的 Eu/Eu^* 平均值为 1.98, 小于五台山地区铁矿的 2.42, 证明了莲花山铁矿形成晚于五台山地区铁矿。 Eu/Eu^* 比值的减小, 可能反映了随着 BIF 沉积年龄的减小, 高温热液流体对于海洋的贡献相对减少 (Frei *et al.*, 2008)。

4 结论

(1) 山东昌邑莲花山铁矿为该地区一典型的沉积变质型铁矿, 矿体赋存于古元古代粉子山群小宋组含铁岩系中, 赋矿层位具有专属性。

(2) 与矽卡岩型铁矿存在着较大的区别, 赋存于古元古代粉子山群小宋组, 从 TFe-(CaO+MgO)- SiO_2 图解上看出, 莲花山铁矿位于世界条带状铁矿分布范围内, 通过岩屑砂岩恢复, 认为其源岩为单一的次岩屑砂岩, 经低角闪岩相变质作用, 部分磁铁矿进行重结晶, 部分细粒保存了化学沉积的特征。

(3) 莲花山铁矿稀土元素总量较低, 表明其为太古宙海洋沉积。稀土配分模式呈现轻稀土元素亏损、重稀土元素富集, 并且具有 La、Eu、Y 正异常, 无明显 Ce 异常, 说明矿石的稀土元素来源于火山热液和海水的混合溶液。 Y/Ho 的比值变化范围为 30.13~50.30, 平均值为 37.63, 接近于海水的 Y/Ho

H_o 比值表明莲花山矿石在其形成时受到海水作用的影响。微量元素中 Sr/Ba 比值范围为 0.41 ~ 1.99, 平均值 1.04, 表明莲花山铁矿为火山岩和海相沉积物。

(4) 莲花山铁矿 SiO_2/Al_2O_3 的比值变化范围 10.77~37.75, 平均值为 20.46, 大于 10, Ti/V 比值为 12.77~40.00, 平均值为 24.40, 均指示了莲花山铁矿与火山沉积作用有关, 与该铁矿为火山建造的宏观建造特征一致。 Ni/Co 比值证明了莲花山铁矿接近于火山沉积岩的范围。

References

- Bau M and Dulski P. 1996. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman Iron Formation, Transvaal Supergroup, South Africa [J]. *Precambrian Res.*, 79 : 37 ~ 55.
- Danielson A, Moller P, Dulki P, *et al.* 1992. The europium anomalies in banded iron formations and thermal history of the oceanic crust [J]. *Chemical Geology*, 97 : 89 ~ 100.
- Frei D, Dohl P S, Dake E F, *et al.* 2008. Trace element and isotopic characterization of Neoproterozoic iron formation in the Black hills (South Dakota, USA): Assessment of chemical change during 2.9~1.9 Ga deposition bracketing the 2.4~2.2 Ga first rise of atmospheric oxygen [J]. *Precambrian Research*, 162 : 441 ~ 474.
- Kong Qingyou, Zhang Tianzhen, Yu Xuefeng, *et al.* 2006. Deposits in Shandong Province [M]. Jinan : Shandong Science and Technology Press (in Chinese with English abstract).
- Li Zhihong, Zhu Xiangkun and Tang Suohan. 2010. Characteristics of rare earth elements and geological significations of BIFs from Jidong, Wutai and Lüliang area [J]. *Geoscience*, 24(5) : 840 ~ 846 (in Chinese with English abstract).
- Luo Hui, Chen Zhihong and Shen Baofeng. 2002. Ore-bearing geology and Metallogenic Prognosis of BIF, Utaishan Area [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Mao Guangzhou and Liu Chiyang. 2011. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(4) : 337 ~ 347 (in Chinese with English abstract).
- McDonough W F & Sun S S. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : implications for mantle composition and processes [J]. *Magmatism in the Ocean Basins*, 42 : 317 ~ 319.
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks : influence of provenance and sedimentary processes [A]. Lipin B R and McKay G A. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements* [C]. *Reviews in Mineralogy*, 21 : 169 ~ 200.
- Nozaki Y, Zhang J and Amakawa H. 1997. The fractionation between Y and Ho in the marine environment [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148 : 329 ~ 340.
- Robert B, Balz S K, Stephen M, *et al.* 2004. Characterisation of early Archaean chemical sediments by trace element signatures [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 222 : 43 ~ 46.
- Shen Baofeng, Luo Hui, Li Shuangbao, *et al.* 1994. *Geology and Metallization of Archean Greenstone Belts in North China Platform* [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Shen Qihan, Song Huixia and Zhao Ziran. 2009. Characteristics of rare earth elements and trace elements in Hanwang Neo-Archaean banded iron formations, Shandong Province [J]. *Acta Geosciences Sinica*, 30(6) : 693 ~ 699 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Wang Peicheng, Hu Shuting, *et al.* 2003. *Regional Geology of Shandong Province* [M]. Jinan : Shandong Map Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Wang Songtao, Gao Meixia, Wan Zhongjie, *et al.* 2007. Geological characteristics of Neoproterozoic metamorphic sedimentary iron deposit in east part of Changyi area in Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 23(1) : 45 ~ 48 (in Chinese).
- Zeng Guangxiang, Lü Shu, Xu Jinfang, *et al.* 1998. *Shandong Iron Deposit* [M]. Jinan : Shandong Science and Technology Press (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 孔庆友, 张天祯, 于学峰, 等. 2006. 山东铁矿 [M]. 济南 : 山东科学技术出版社.
- 李志红, 朱祥坤, 唐索寒, 等. 2010. 冀东、五台和吕梁地区条带状铁矿的稀土元素特征及其地质意义 [J]. *现代地质*, 24(5) : 840 ~ 846.
- 骆辉, 陈志宏, 沈保丰. 2002. 五台山地区条带状铁建造含矿地质及成矿预测 [M]. 北京 : 地质出版社.
- 毛光涛, 刘池洋. 2011. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用 [J]. *地球科学与环境学报*, 33(4) : 337 ~ 347.
- 沈保丰, 骆辉, 李双保, 等. 1994. 华北陆台太古宙绿岩带地质及成矿 [M]. 北京 : 地质出版社.
- 沈其韩, 宋会侠, 赵子然. 2009. 山东韩旺新太古代条带状铁矿的稀土和微量元素特征 [J]. *地球学报*, 30(6) : 693 ~ 699.
- 宋明春, 王沛成, 胡树庭, 等. 2003. 山东省区域地质 [M]. 济南 : 山东省地图出版社.
- 王松涛, 高美霞, 万中杰, 等. 2007. 山东昌邑东部地区元古代变质沉积型铁矿地质特征 [J]. *山东国土资源*, 23(1) : 45 ~ 48.
- 曾广湘, 吕叔, 徐金芳, 等. 1998. 山东铁矿地质 [M]. 济南 : 山东科学技术出版社.