

辽冀地区条带状铁建造地球化学特征： II. 稀土元素特征*

姚通^{1,2} 李厚民^{2**} 杨秀清^{2,3} 李立兴² 陈靖² 张进友⁴ 刘明军⁵

YAO Tong^{1,2}, LI HouMin^{2**}, YANG XiuQing^{2,3}, LI LiXing², CHEN Jing², ZHANG JinYou⁴ and LIU MingJun⁵

1. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

2. 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

3. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871

4. 河北省地质矿产勘查开发局第五地质大队,唐山 063004

5. 辽宁省冶金地质勘查局地质勘查研究院,鞍山 114002

1. Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. MLR Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

4. The 5th Geological Team of Hebei Geology and Mining Bureau, Tangshan 063004, China

5. Institute of Geological Exploration, Liaoning Bureau of Metallurgic Geological Exploration, Anshan 114002, China

2013-10-12 收稿, 2014-01-22 改回.

Yao T, Li HM, Yang XQ, Li LX, Chen J, Zhang JY and Liu MJ. 2014. Geochemical characteristics of Banded Iron Formations in Liaoning-eastern Hebei area: II. Characteristics of rare earth elements. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5):1239-1252

Abstract The Early Precambrian Banded Iron Formations (BIFs) are the most important iron ore resources type in China, and account for approximately 64% of the total identified resources. In China, BIFs are mainly distributed in greenstone belts of the North China Craton, such as Anshan-Benxi (in Liaoning Province), Jidong (in Hebei Province)-Miyun (in Beijing), Wutai (in Shanxi Province), Wuyang (in Henan Province), Huoqiu (in Anhui Province), and Luxi (in Shandong Province). Liaoning-eastern Hebei area (including Anshan-Benxi area and eastern Hebei area) is the study area, which accounts for more than 34% of overall iron ore reserves in China. Anshan-Benxi area includes Anshan, Benxi, and Liaoyang and so on, which is composed of the supracrustal rock (about 30%) and granitic rock (about 70%). Archean Anshan Group is the major ore stratum, iron ore mainly occurs in the Middle and Upper Anshan Group. The rocks have undergone greenschist to amphibolite facies metamorphism. Eastern Hebei area includes Zunhua, Qianxi, Kuancheng, Qinglong, Qianan and so on, which is composed of the crystalline basement and sedimentary cover. Iron ore mainly hosted in the Qianxi Group, Zunhua Group, Luanxian Group and Zhuzhangzi Group. The rock have been strongly migmatized, and metamorphosed to the greenschist to granulite facies. Based on field geological and microscopic studies, we found that there are many differences exist on the ore type, degree of metamorphism, ore formation, and mineral combination between the Anshan-Benxi and the eastern Hebei area. In this study, we mainly report rare earth elements of 200 samples of iron ore from 28 iron deposits in Liaoning-eastern Hebei area. The results show that: (1) All samples show very similar characteristics of total contents of REE and Y; the total contents of REE are very low, but Y/Ho ratios are high. After normalized by Post Archean Australian Shale (PAAS), REE and Y patterns display depletion of light REE relative to heavy REE. Most samples have positive La anomalies, distinct positive anomalies of Eu and Y. All of them suggest that the iron ores may be derived from submarine high temperature hydrothermal fluids and

* 本文受国家“973”项目(2012CB416801)、国土资源部公益性行业科研专项经费项目(200911007-15、201111002)和地质矿产调查评价项目(1212011120988)联合资助。

第一作者简介: 姚通,男,1990年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: yaotong2013@126.com

** 通讯作者: 李厚民,男,1962年生,博士,研究员,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: lihoumin2002@163.com

sea water in the studied area. Compared to the eastern Hebei area, the Anshan-Benxi area shows more hydrothermal contribution; (2) Although the Ce/Ce^{*} ratios were 0.77 ~ 1.09, the lack of true negative Ce anomalies in all samples indicates that BIFs were formed in an anoxic ocean; (3) The contents of REE, Eu anomalies, Y anomalies and Y/Ho ratios vary in a large range, which may be associated with the inputting of detrital material during the BIFs formation. The degree of positive anomalies of Eu and Y from samples in the eastern Hebei area are less than that in the Anshan-Benxi area, and Y/Ho ratios are closer to chondrite meteorites (26 ~ 28), which also indicating more detrital material joining.

Key words BIFs; Rare earth elements; Anshan-Benxi area; Eastern Hebei area; North China Craton

摘要 辽冀地区(鞍山-本溪地区和冀东地区)位于华北克拉通北东部,是我国早前寒武纪条带状铁建造(BIFs)最重要的分布区,主要为新太古代 Algoma 型。本文系统对比了辽冀地区 28 个铁矿床 200 件铁矿石样品的稀土元素特征。结果表明:(1)所有样品的稀土元素特征比较相似:稀土元素总量较低,Y/Ho 比值较高;经太古宙后平均澳大利亚页岩(PAAS)标准化后呈现重稀土相对富集、轻稀土相对亏损的配分模式,La 异常不明显,强烈的 Eu 正异常和明显的 Y 正异常,暗示研究区铁矿石成矿物质主要来源于海底高温热液和海水的混合溶液;与冀东地区 BIFs 相比,鞍本地区 Eu 异常更为明显,说明鞍本地区 BIFs 显示更多的热液特征;(2)铁矿石的 Ce/Ce^{*} 变化范围为 0.77 ~ 1.09,缺乏明显的 Ce 负异常,说明其沉积于还原的海水环境;(3)辽冀地区 BIFs 的稀土元素总量、Eu 异常、Y 异常和 Y/Ho 比值变化范围均比较大,可能与 BIFs 沉积过程中碎屑物质的加入有关;与鞍本地区相比,冀东地区 BIFs 的 Eu 正异常、Y 正异常程度均小于鞍本地区,热液和海水特征均不明显,Y/Ho 比值更接近球粒陨石(26 ~ 28),可能暗示冀东地区有更多的碎屑物质的加入。

关键词 条带状铁建造;稀土元素;鞍山-本溪地区;冀东地区;华北克拉通

中图分类号 P595; P618.31

稀土元素化学性质非常稳定,一般认为其含量不受成岩作用的影响,因此可代表源区的稀土元素特征。三价铁氧化物和氢氧化物在沉积过程中分馏较小,能够保留沉积时海水的稀土元素特征,是示踪 BIFs 起源和沉积过程最常用的地球化学工具之一(Bau and Dulski, 1996; Frei *et al.*, 2008)。前人对辽冀地区(辽宁鞍山-本溪和冀东地区)BIFs 稀土元素已有初步研究,结果显示轻稀土亏损,重稀土富集,具有明显的 Eu 异常等特征,暗示 BIFs 的成矿物质来源于海水与热液的混合溶液,且形成于缺氧的海水环境(翟明国等, 1989;李志红等, 2008, 2010; 丁文君等, 2009; Zhang *et al.*, 2011; 沈其韩等, 2011; 李文君等, 2012; 杨秀清等, 2012)。但是通过野外地质考察和室内镜下观察,笔者发现鞍本和冀东地区的不同矿区在赋矿地层、变质程度、矿石类型和矿物组合等方面存在差异。因此,本文对鞍本地区 13 个铁矿区(西鞍山、东鞍山、齐大山、王家堡子、胡家庙子、关门山、眼前山、大孤山、南芬、北台、歪头山、偏岭和小岭子)和冀东地区 15 个铁矿区(棒磨山、神龙峡、水厂、信益、杏山、马兰庄、磨盘山、司家营、石人沟、王寺峪、程家沟、浇花峪、连帽峪、柞栏杖子和豆子沟)约 200 件铁矿石样品的稀土元素特征进行了研究,为探讨研究区铁矿石的物质来源和形成环境提供更多信息。相应的地质特征和主量元素特征在“辽冀地区条带状铁建造地球化学特征: I. 主量元素特征”一文中介绍(杨秀清等, 2014),为避免重复,本文省略地质特征的介绍。

1 样品选择与分析测试

用于本次稀土元素分析的样品与主量元素分析配套,采自鞍本和冀东地区铁矿采场,样品新鲜。其中,鞍本地区 13

个铁矿区铁矿石样品主要为磁铁(赤铁)石英岩、角闪磁铁石英岩、黑云磁铁石英岩、绿泥磁铁石英岩,共计 78 件(表 1);冀东地区 15 个铁矿区铁矿石样品主要为磁铁(赤铁)石英岩、角闪磁铁石英岩、辉石磁铁石英岩、黑云磁铁石英岩,共计 122 件(表 1)(参见杨秀清等, 2014 中的图 1、图 2、图 3)。

稀土元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室的 VG-AXIOM 型 MC-ICP-MS [分辨率 400 ~ 10000RP(10% 谷),灵敏度 R = 400ln1000Mcps × 10⁻⁶,检出限 Be < 1 × 10⁻¹², Mn < 0.5 × 10⁻¹², Fe < 1 × 10⁻¹², 同位素比:精密密度、准确度 0.002%] 上完成。精确称量全岩样品粉末 25mg,加入 1.5mL HNO₃ 和 1.5mL HF 后在 80℃ 下蒸发 24h。蒸干后加入 1.5mL HNO₃、1.5mL HF 和 0.5mL HClO₄ 在高压罐内加温到 180℃,溶解 48h。最后,样品用 1% 的 HNO₃ 稀释到 50mL。使用 GSR21、JG21A 和 JB23 标样,每分析 10 个样品测量一次标样和一个重复样。200 件矿石样品稀土元素测试结果见表 1。鉴于 Y 的离子半径与重稀土元素接近,化学性质相似,且在自然界密切共生的特点,将 Y 元素也作为重稀土元素置于 Dy 和 Ho 之间。稀土元素的含量采用 PAAS (Post Archean Average Shale) (McLennan, 1989) 进行标准化,各个矿区铁矿石标准化的稀土元素配分曲线如图 1 所示。

2 稀土元素特征

2.1 鞍本地区稀土元素特征

鞍本地区所有样品的稀土元素含量均很低(变化范围为 0.95 × 10⁻⁶ ~ 156.4 × 10⁻⁶, 平均 15.06 × 10⁻⁶; 平均含量最低的为南芬矿区,最高的为王家堡子矿区),明显低于澳大利亚沉积岩的平均稀土总量 184.8 × 10⁻⁶ (McLennan, 1989),

表 1 辽冀地区样品稀土元素($\times 10^{-6}$)测试结果Table 1 Rare earth elements analyses ($\times 10^{-6}$) of samples from Liaoning-eastern Hebei area

样品号	产地	矿石类型	鞍本地区														
			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
X11-11	西鞍山	赤铁矿石英岩	0.53	1.29	0.18	0.83	0.25	0.12	0.27	0.05	0.29	2.66	0.07	0.21	0.04	0.27	0.05
X11-12	西鞍山	赤铁矿石英岩	3.10	6.13	0.60	2.07	0.59	0.20	0.50	0.08	0.47	3.72	0.11	0.31	0.05	0.37	0.06
X11-19	西鞍山	赤铁矿石英岩	2.42	5.03	0.65	2.49	0.72	0.45	0.71	0.12	0.65	5.32	0.13	0.33	0.04	0.26	0.04
XAS-4	西鞍山	赤铁矿石英岩	0.97	2.30	0.33	1.47	0.41	0.16	0.40	0.06	0.34	1.89	0.07	0.20	0.03	0.22	0.04
XAS-3	西鞍山	赤铁矿石英岩	9.51	19.99	3.01	13.17	3.30	0.97	2.72	0.36	1.80	9.95	0.36	0.89	0.13	0.84	0.12
X11-7	西鞍山	磁铁矿石英岩	3.83	6.33	0.75	2.91	0.65	0.22	0.52	0.07	0.42	3.65	0.08	0.24	0.04	0.30	0.05
XAS-6	西鞍山	磁铁矿石英岩	8.10	15.35	1.84	6.51	1.31	0.30	0.91	0.11	0.52	2.87	0.10	0.25	0.04	0.28	0.05
XAS-2	西鞍山	磁铁矿石英岩	0.26	0.58	0.08	0.32	0.10	0.04	0.08	0.01	0.09	0.74	0.02	0.05	0.01	0.07	0.01
X11-13	西鞍山	磁铁矿石英岩	1.24	2.50	0.34	1.52	0.42	0.17	0.38	0.05	0.27	2.01	0.06	0.14	0.02	0.14	0.02
X11-14	西鞍山	磁铁矿石英岩	2.52	5.19	0.59	2.58	0.81	0.25	0.94	0.16	0.90	6.98	0.19	0.50	0.08	0.50	0.08
X11-15	西鞍山	磁铁矿石英岩	1.34	2.67	0.30	1.08	0.29	0.21	0.31	0.05	0.34	3.08	0.08	0.24	0.04	0.28	0.05
X11-18	西鞍山	磁铁矿石英岩	0.85	1.63	0.21	0.83	0.21	0.08	0.18	0.02	0.16	1.67	0.04	0.11	0.02	0.13	0.02
X11-9	西鞍山	磁铁矿石英岩	1.72	3.10	0.35	1.35	0.32	0.10	0.22	0.03	0.15	1.54	0.03	0.09	0.01	0.10	0.02
DAS-4	东鞍山	绿泥磁铁矿石英岩	1.10	2.25	0.29	1.17	0.33	0.10	0.33	0.05	0.30	1.81	0.06	0.18	0.03	0.23	0.04
DAS-3	东鞍山	磁铁矿石英岩	1.71	3.58	0.50	2.23	0.63	0.19	0.64	0.10	0.59	3.69	0.12	0.31	0.05	0.29	0.04
QDS-11	齐大山	磁铁矿石英岩	0.70	1.64	0.26	1.22	0.40	0.29	0.60	0.11	0.79	8.04	0.19	0.57	0.09	0.55	0.08
QDS-2	齐大山	磁铁矿石英岩	2.01	3.46	0.40	1.67	0.48	0.17	0.50	0.08	0.54	5.37	0.13	0.42	0.07	0.44	0.07
W11-3	王家堡子	赤铁矿石英岩	0.73	1.23	0.16	0.62	0.19	0.14	0.23	0.04	0.30	2.23	0.07	0.20	0.03	0.20	0.03
WJPZ-3	王家堡子	磁铁矿石英岩	8.59	16.63	2.11	8.06	1.79	0.51	1.60	0.23	1.19	5.46	0.24	0.63	0.09	0.63	0.09
J11-10	王家堡子	磁铁矿石英岩	37.24	61.11	8.09	31.02	5.96	3.11	4.67	0.52	2.29	10.14	0.40	0.92	0.12	0.85	0.12
W11-2	王家堡子	磁铁矿石英岩	1.78	3.66	0.46	1.97	0.53	0.27	0.55	0.09	0.49	2.56	0.10	0.29	0.04	0.31	0.05
W11-20	王家堡子	磁铁矿石英岩	2.79	5.17	0.57	1.95	0.54	0.16	0.37	0.05	0.30	1.16	0.06	0.15	0.03	0.19	0.03
W11-9	王家堡子	磁铁矿石英岩	13.38	25.36	3.53	15.83	4.00	1.59	3.00	0.44	1.89	7.58	0.30	0.65	0.08	0.48	0.06
WJPZ-1	王家堡子	磁铁矿石英岩	1.08	2.22	0.23	0.91	0.26	0.11	0.30	0.05	0.28	1.30	0.06	0.16	0.02	0.16	0.02
WJPZ-5	王家堡子	磁铁矿石英岩	1.20	1.95	0.21	0.80	0.19	0.08	0.15	0.02	0.12	1.05	0.03	0.07	0.01	0.10	0.02
H11-10	胡家庙子	绿泥磁铁矿石英岩	3.96	8.77	1.15	5.15	1.57	0.48	1.51	0.28	1.70	7.44	0.34	0.97	0.15	1.02	0.15
H11-9	胡家庙子	磁铁矿石英岩	2.37	5.15	0.62	2.62	0.76	0.33	0.62	0.10	0.59	3.76	0.13	0.36	0.06	0.37	0.06
HJMZ-4	胡家庙子	磁铁矿石英岩	0.71	1.28	0.15	0.60	0.17	0.15	0.18	0.03	0.18	1.69	0.04	0.12	0.02	0.15	0.03
HJMZ-7	胡家庙子	磁铁矿石英岩	1.71	3.33	0.48	2.35	0.80	0.57	1.07	0.20	1.48	17.64	0.41	1.32	0.21	1.46	0.22
H11-5	胡家庙子	磁铁矿石英岩	5.66	10.65	1.39	5.36	1.41	0.54	1.27	0.20	1.10	8.10	0.20	0.55	0.08	0.50	0.08
HJMZ-3	胡家庙子	角闪磁铁矿石英岩	0.77	1.39	0.17	0.73	0.20	0.17	0.21	0.03	0.23	2.41	0.06	0.16	0.03	0.18	0.03
GMS-8	关门山	赤铁矿石英岩	0.66	1.18	0.14	0.65	0.21	0.11	0.26	0.05	0.31	3.47	0.07	0.22	0.03	0.23	0.03
GMS-26	关门山	赤铁矿石英岩	2.17	3.69	0.43	1.87	0.56	0.20	0.52	0.08	0.51	5.37	0.11	0.33	0.05	0.32	0.05
GMS-7	关门山	赤铁矿石英岩	1.19	2.31	0.25	1.10	0.37	0.21	0.67	0.15	1.21	14.63	0.31	0.96	0.14	0.91	0.14
GMS-14	关门山	磁铁矿石英岩	1.18	2.46	0.29	1.06	0.29	0.12	0.30	0.05	0.28	2.54	0.06	0.19	0.04	0.27	0.04

续表 1

Continued Table 1

样品号	产地	矿石类型	鞍山地区														Lu	
			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb		
GMS-24	关门山	磁铁矿石英岩	0.26	0.54	0.07	0.26	0.07	0.03	0.06	0.01	0.05	0.49	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00
GMS-5	关门山	磁铁矿石英岩	1.19	2.44	0.30	1.14	0.32	0.10	0.31	0.05	0.28	2.39	0.06	0.18	0.03	0.20	0.03	0.03
GMS-17	关门山	磁铁矿石英岩	0.54	1.02	0.13	0.52	0.13	0.09	0.16	0.03	0.17	1.80	0.04	0.12	0.02	0.19	0.03	0.03
YQS-34	眼前山	赤铁矿石英岩	1.40	2.55	0.30	1.22	0.31	0.17	0.36	0.06	0.41	4.05	0.10	0.33	0.06	0.39	0.07	0.07
YQS-17	眼前山	磁铁矿石英岩	1.46	3.20	0.42	1.89	0.58	0.20	0.55	0.09	0.53	3.22	0.11	0.32	0.06	0.41	0.08	0.08
YQS-12	眼前山	磁铁矿石英岩	2.77	3.37	0.34	1.36	0.35	0.18	0.39	0.07	0.43	5.50	0.12	0.36	0.07	0.50	0.07	0.07
YQS-33	眼前山	磁铁矿石英岩	4.50	7.04	0.77	3.08	0.79	0.39	0.89	0.14	0.89	7.14	0.21	0.61	0.09	0.65	0.11	0.11
YQS-35	眼前山	磁铁矿石英岩	2.28	4.20	0.41	1.45	0.41	0.12	0.31	0.05	0.29	2.54	0.06	0.17	0.03	0.17	0.03	0.03
YQS-1	眼前山	磁铁矿石英岩	0.15	0.32	0.03	0.12	0.03	0.02	0.04	0.01	0.04	0.71	0.01	0.04	0.01	0.11	0.03	0.03
YQS-11	眼前山	磁铁矿石英岩	1.37	2.39	0.28	1.19	0.33	0.20	0.39	0.06	0.45	5.48	0.11	0.37	0.06	0.42	0.07	0.07
YQS-3	眼前山	磁铁矿石英岩	0.24	0.50	0.05	0.17	0.04	0.02	0.04	0.01	0.05	0.80	0.01	0.04	0.01	0.05	0.01	0.01
DGS-20	大孤山	磁铁矿石英岩	0.57	0.79	0.09	0.34	0.09	0.03	0.09	0.02	0.11	1.39	0.03	0.11	0.02	0.21	0.04	0.04
DGS-6	大孤山	磁铁矿石英岩	8.00	14.12	1.39	4.62	0.95	0.26	0.79	0.12	0.64	5.77	0.15	0.44	0.07	0.48	0.08	0.08
DGS-25	大孤山	磁铁矿石英岩	0.91	1.14	0.11	0.41	0.09	0.03	0.07	0.01	0.07	0.88	0.02	0.06	0.01	0.11	0.03	0.03
DGS-12	大孤山	磁铁矿石英岩	1.98	3.43	0.44	1.75	0.47	0.26	0.57	0.10	0.70	6.46	0.17	0.52	0.09	0.65	0.10	0.10
DGS-22	大孤山	黑云磁铁矿石英岩	0.36	0.65	0.07	0.29	0.08	0.06	0.09	0.01	0.10	1.80	0.03	0.09	0.01	0.11	0.02	0.02
DGS-11	大孤山	黑云磁铁矿石英岩	1.74	2.92	0.34	1.33	0.38	0.23	0.42	0.07	0.49	5.54	0.13	0.40	0.06	0.42	0.07	0.07
DGS-4	大孤山	黑云磁铁矿石英岩	13.69	25.76	2.73	9.41	1.91	0.37	1.66	0.27	1.55	10.81	0.34	1.02	0.19	1.45	0.19	0.19
DGS-31	大孤山	角闪磁铁矿石英岩	2.11	3.78	0.40	1.53	0.43	0.16	0.43	0.07	0.42	4.24	0.09	0.28	0.04	0.31	0.05	0.05
BT-5	北台	磁铁矿石英岩	1.67	3.09	0.37	1.73	0.55	0.39	0.65	0.11	0.75	6.19	0.18	0.57	0.09	0.62	0.11	0.11
BT-1	北台	角闪磁铁矿石英岩	1.55	2.88	0.37	1.67	0.53	0.29	0.62	0.11	0.69	6.30	0.16	0.45	0.07	0.48	0.08	0.08
NF-3	南芬	磁铁矿石英岩	0.45	1.05	0.16	0.75	0.24	0.14	0.30	0.06	0.40	3.58	0.10	0.32	0.05	0.36	0.06	0.06
NF-2	南芬	磁铁矿石英岩	1.42	2.75	0.33	1.39	0.40	0.39	0.47	0.08	0.55	4.95	0.13	0.41	0.08	0.57	0.10	0.10
NF-12	南芬	磁铁矿石英岩	1.19	1.83	0.21	0.85	0.20	0.14	0.21	0.04	0.24	2.37	0.06	0.20	0.03	0.24	0.04	0.04
NF-1	南芬	磁铁矿石英岩	0.17	0.59	0.11	0.73	0.27	0.32	0.40	0.09	0.58	4.19	0.14	0.43	0.08	0.53	0.09	0.09
NF-8	南芬	角闪磁铁矿石英岩	0.26	0.57	0.07	0.29	0.09	0.11	0.10	0.02	0.17	1.49	0.04	0.14	0.03	0.22	0.04	0.04
NF-10	南芬	角闪磁铁矿石英岩	1.60	3.16	0.39	1.68	0.45	0.51	0.58	0.09	0.61	5.57	0.15	0.44	0.07	0.47	0.07	0.07
WTS-7	歪头山	角闪磁铁矿石英岩	9.04	16.51	1.99	8.21	1.72	0.76	1.53	0.24	1.59	12.10	0.41	1.30	0.22	1.65	0.27	0.27
WTS-1	歪头山	角闪磁铁矿石英岩	3.94	5.83	0.58	2.11	0.55	0.48	0.59	0.09	0.54	5.97	0.13	0.38	0.06	0.35	0.06	0.06
WTS-2	歪头山	角闪磁铁矿石英岩	0.86	1.84	0.27	1.17	0.34	0.26	0.39	0.07	0.52	3.88	0.12	0.40	0.07	0.48	0.08	0.08
WTS-11	歪头山	角闪磁铁矿石英岩	2.89	8.76	1.21	4.93	1.08	0.86	1.22	0.20	1.32	9.94	0.29	1.00	0.18	1.29	0.21	0.21
WTS-15	歪头山	角闪磁铁矿石英岩	1.56	3.04	0.36	1.34	0.37	0.30	0.37	0.06	0.38	3.11	0.09	0.29	0.05	0.34	0.05	0.05
WTS-16	歪头山	角闪磁铁矿石英岩	3.12	5.97	0.73	2.87	0.63	0.66	0.68	0.10	0.66	5.03	0.15	0.52	0.08	0.53	0.09	0.09

续表 1

Continued Table 1

冀东地区																	
样品号	产地	矿石类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
WTS-17	歪头山	角闪磁铁矿石英岩	6.06	11.26	1.38	5.71	1.48	1.38	1.75	0.28	1.88	15.12	0.44	1.35	0.22	1.36	0.21
PL-2	偏岭	角闪磁铁矿石英岩	3.41	5.88	0.60	2.17	0.39	0.06	0.35	0.05	0.28	2.26	0.06	0.19	0.04	0.26	0.05
PL-5	偏岭	角闪磁铁矿石英岩	0.88	1.51	0.16	0.71	0.17	0.12	0.18	0.03	0.19	1.87	0.05	0.16	0.03	0.23	0.05
PL-3	偏岭	角闪磁铁矿石英岩	0.87	1.74	0.19	0.77	0.19	0.03	0.19	0.03	0.22	1.85	0.06	0.17	0.03	0.21	0.05
PL-6	偏岭	角闪磁铁矿石英岩	1.34	2.07	0.26	0.98	0.26	0.08	0.21	0.03	0.21	1.67	0.05	0.16	0.03	0.27	0.07
PL-8	偏岭	角闪磁铁矿石英岩	1.90	3.32	0.37	1.44	0.39	0.12	0.35	0.05	0.33	2.99	0.07	0.24	0.04	0.38	0.08
LL-3	小岭子	磁铁矿石英岩	1.17	2.65	0.30	1.11	0.30	0.07	0.26	0.03	0.19	1.68	0.04	0.12	0.02	0.12	0.02
LL-5	小岭子	磁铁矿石英岩	1.68	3.28	0.37	1.34	0.34	0.06	0.34	0.05	0.35	3.00	0.08	0.27	0.05	0.40	0.07
LL-2	小岭子	磁铁矿石英岩	5.37	11.55	1.37	5.81	1.65	0.31	1.60	0.23	1.42	12.26	0.33	0.95	0.13	0.89	0.14
LL-18	小岭子	黑云磁铁矿石英岩	1.65	2.65	0.32	1.34	0.32	0.17	0.35	0.06	0.41	3.92	0.10	0.33	0.06	0.50	0.09

冀东地区

冀东地区																	
样品号	产地	矿石类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
BMS-6	棒磨山	角闪磁铁矿石英岩	1.30	2.42	0.32	1.31	0.36	0.10	0.34	0.05	0.34	3.32	0.08	0.27	0.05	0.44	0.09
BMS-21	棒磨山	角闪磁铁矿石英岩	2.10	4.15	0.46	1.75	0.40	0.06	0.42	0.06	0.44	4.49	0.11	0.36	0.07	0.51	0.10
BMS-3	棒磨山	磁铁矿石英岩	17.01	35.53	3.68	11.71	1.97	0.18	1.50	0.17	0.79	4.06	0.16	0.42	0.07	0.47	0.08
BMS-2	棒磨山	辉石磁铁矿石英岩	1.80	3.03	0.36	1.56	0.40	0.20	0.44	0.07	0.50	5.03	0.13	0.41	0.07	0.47	0.09
BMS-7	棒磨山	辉石磁铁矿石英岩	1.59	3.16	0.38	1.49	0.39	0.17	0.43	0.07	0.49	5.92	0.12	0.41	0.07	0.56	0.11
BMS-19	棒磨山	角闪磁铁矿石英岩	1.03	1.58	0.16	0.65	0.16	0.05	0.15	0.02	0.17	2.70	0.05	0.17	0.03	0.24	0.05
CJG-2	程家沟	磁铁矿石英岩	5.25	11.71	1.48	5.95	1.48	0.48	1.26	0.18	1.09	7.23	0.25	0.72	0.11	0.71	0.11
CJG-1	程家沟	磁铁矿石英岩	7.64	15.62	1.93	7.32	1.94	0.83	1.67	0.24	1.45	7.76	0.30	0.90	0.14	0.95	0.15
CJG-15	程家沟	磁铁矿石英岩	11.67	23.60	2.70	9.18	1.91	0.96	1.86	0.26	1.48	8.59	0.33	0.98	0.15	1.06	0.16
CJG-6	程家沟	磁铁矿石英岩	3.67	8.27	1.03	3.92	0.93	0.45	1.08	0.17	1.03	7.72	0.24	0.72	0.10	0.64	0.10
CJG-22	程家沟	辉石磁铁矿石英岩	12.90	32.83	4.40	18.02	4.49	1.29	3.23	0.45	2.37	13.97	0.50	1.36	0.20	1.26	0.19
CJG-3	程家沟	辉石磁铁矿石英岩	6.23	12.14	1.49	5.50	1.24	0.91	1.39	0.22	1.33	9.56	0.30	0.90	0.14	0.89	0.14
DZG-10	豆子沟	磁铁矿石英岩	10.57	22.74	2.81	10.56	2.44	1.04	2.05	0.30	1.78	10.98	0.39	1.10	0.17	1.18	0.19
DZG-29	豆子沟	磁铁矿石英岩	18.41	34.36	3.77	13.33	2.93	1.36	2.62	0.39	2.26	13.66	0.49	1.37	0.20	1.48	0.22
DZG-35	豆子沟	磁铁矿石英岩	12.84	26.89	2.98	11.51	2.49	1.13	2.32	0.33	1.97	10.83	0.42	1.28	0.21	1.39	0.21
DZG-12	豆子沟	磁铁矿石英岩	16.87	36.64	4.41	16.83	4.43	2.83	4.14	0.69	4.25	26.11	0.96	2.77	0.40	3.00	0.43
DZG-17	豆子沟	磁铁矿石英岩	8.65	18.38	2.22	8.00	1.89	0.50	1.52	0.22	1.22	7.53	0.26	0.74	0.12	0.76	0.12
DZG-36	豆子沟	磁铁矿石英岩	5.84	12.70	1.56	5.92	1.45	0.54	1.18	0.18	1.08	7.15	0.24	0.71	0.10	0.76	0.12
DZG-2	豆子沟	磁铁矿石英岩	6.29	12.14	1.42	5.29	1.25	0.71	1.16	0.19	1.23	8.57	0.29	0.89	0.13	0.97	0.15
JHY-16	浇花峪	磁铁矿石英岩	13.50	34.05	4.46	17.27	4.01	0.75	3.04	0.43	2.30	11.34	0.45	1.17	0.16	1.15	0.17
JHY-10	浇花峪	磁铁矿石英岩	17.45	45.65	6.68	28.66	6.89	1.33	4.85	0.71	3.79	20.13	0.78	2.16	0.34	2.64	0.42
JHY-11	浇花峪	磁铁矿石英岩	5.23	12.02	1.53	5.97	1.55	0.74	1.37	0.23	1.44	8.61	0.32	0.94	0.14	0.99	0.15

续表 1

Continued Table 1

样品号	产地	矿石类型	冀东地区														
			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
JHY-15	浇花峪	磁铁矿石英岩	4.58	9.61	1.18	4.65	1.14	0.49	1.09	0.18	1.10	7.26	0.26	0.78	0.12	0.90	0.14
JHY-4	浇花峪	角闪磁铁矿石英岩	9.41	22.89	2.89	11.47	3.01	0.82	2.42	0.36	2.05	12.16	0.43	1.06	0.15	0.93	0.14
LMY-23	连帽峪	磁铁矿石英岩	8.08	16.88	1.94	6.88	1.57	0.79	1.63	0.25	1.43	9.77	0.30	0.79	0.12	0.68	0.10
LMY-9	连帽峪	磁铁矿石英岩	3.90	8.68	1.04	3.96	0.97	0.53	1.04	0.15	0.91	6.41	0.20	0.56	0.08	0.51	0.06
LMY-20	连帽峪	磁铁矿石英岩	12.29	27.46	3.26	12.01	2.55	0.66	2.12	0.28	1.51	9.74	0.31	0.79	0.11	0.75	0.12
LMY-15	连帽峪	磁铁矿石英岩	6.82	15.57	1.93	7.53	1.67	0.88	1.62	0.24	1.34	8.84	0.29	0.76	0.11	0.74	0.11
LMY-17	连帽峪	磁铁矿石英岩	11.92	26.66	3.32	13.11	2.88	1.26	2.62	0.36	1.90	12.06	0.40	1.00	0.15	0.96	0.15
LMY-6	连帽峪	磁铁矿石英岩	6.98	17.33	2.12	8.01	2.02	0.63	1.78	0.25	1.41	8.76	0.30	0.77	0.11	0.67	0.09
LMY-11	连帽峪	黑云磁铁矿石英岩	6.10	13.34	1.57	5.85	1.45	0.82	1.56	0.23	1.39	8.96	0.30	0.78	0.11	0.73	0.09
LMY-8	连帽峪	辉石磁铁矿石英岩	10.13	20.57	2.44	9.18	2.19	1.16	2.18	0.34	2.04	13.05	0.46	1.37	0.20	1.26	0.19
LMY-7	连帽峪	角闪磁铁矿石英岩	10.78	24.23	2.90	10.68	2.83	1.36	2.69	0.40	2.32	14.50	0.51	1.48	0.20	1.26	0.18
LMY-24	连帽峪	角闪磁铁矿石英岩	10.44	25.29	3.25	12.84	2.84	0.84	2.65	0.38	2.13	13.20	0.45	1.11	0.16	0.98	0.13
LMY-16	连帽峪	角闪磁铁矿石英岩	14.09	36.46	4.92	20.41	5.31	0.74	4.81	0.66	3.41	19.79	0.65	1.46	0.20	1.04	0.15
LMY-13	连帽峪	角闪磁铁矿石英岩	6.88	14.28	1.66	6.15	1.28	0.36	1.06	0.14	0.75	4.43	0.15	0.36	0.05	0.32	0.04
MLZ-18	马兰庄	磁铁矿石英岩	0.45	0.79	0.09	0.34	0.08	0.06	0.07	0.01	0.10	0.90	0.03	0.09	0.02	0.09	0.01
MLZ-10	马兰庄	磁铁矿石英岩	1.59	2.48	0.27	1.05	0.28	0.14	0.28	0.05	0.35	3.67	0.09	0.30	0.05	0.27	0.03
MLZ-17	马兰庄	磁铁矿石英岩	3.57	6.74	0.78	2.77	0.66	0.27	0.60	0.10	0.61	4.24	0.13	0.38	0.05	0.35	0.05
MLZ-2	马兰庄	磁铁矿石英岩	19.47	53.34	7.66	29.99	7.83	0.79	5.68	0.89	4.62	24.25	0.92	2.38	0.32	2.09	0.30
MLZ-6	马兰庄	磁铁矿石英岩	0.98	1.76	0.19	0.75	0.19	0.11	0.21	0.04	0.27	2.87	0.07	0.23	0.04	0.22	0.03
MLZ-26	马兰庄	磁铁矿石英岩	4.08	7.43	0.89	3.43	0.81	0.29	0.81	0.15	0.96	6.57	0.23	0.68	0.10	0.74	0.10
MLZ-4	马兰庄	辉石磁铁矿石英岩	1.95	2.94	0.33	1.20	0.28	0.18	0.33	0.06	0.43	5.09	0.11	0.36	0.05	0.33	0.04
MLZ-11	马兰庄	辉石磁铁矿石英岩	4.91	9.63	1.17	4.45	1.04	0.52	0.97	0.16	0.99	7.24	0.22	0.66	0.09	0.63	0.09
MLZ-22	马兰庄	辉石磁铁矿石英岩	1.45	2.58	0.26	0.95	0.22	0.15	0.22	0.04	0.24	2.19	0.06	0.18	0.03	0.14	0.01
MLZ-7	马兰庄	辉石磁铁矿石英岩	6.70	11.62	1.36	4.95	1.17	0.49	1.20	0.22	1.51	11.85	0.38	1.20	0.18	1.26	0.18
MPS-3	磨盘山	角闪磁铁矿石英岩	4.77	10.40	1.29	5.69	1.63	0.15	1.26	0.17	1.08	5.71	0.22	0.65	0.10	0.82	0.15
MPS-16	磨盘山	角闪磁铁矿石英岩	1.09	2.44	0.36	1.58	0.44	0.13	0.50	0.09	0.62	5.05	0.15	0.47	0.08	0.58	0.10
MPS-14	磨盘山	磁铁矿石英岩	1.37	2.64	0.35	1.43	0.36	0.07	0.28	0.05	0.30	2.64	0.07	0.26	0.05	0.45	0.10
MPS-10	磨盘山	磁铁矿石英岩	4.63	10.31	1.35	5.99	1.71	0.41	1.73	0.31	2.01	13.01	0.45	1.31	0.21	1.48	0.23
MPS-4	磨盘山	磁铁矿石英岩	3.99	6.57	0.70	2.86	0.67	0.22	0.58	0.09	0.60	6.09	0.15	0.49	0.08	0.62	0.13
MPS-1	磨盘山	黑云磁铁矿石英岩	3.33	7.97	1.02	4.48	1.17	0.24	1.05	0.16	1.00	5.72	0.21	0.62	0.09	0.76	0.13
MPS-8	磨盘山	辉石磁铁矿石英岩	4.29	7.90	0.89	3.33	0.78	0.31	0.72	0.12	0.75	4.90	0.17	0.52	0.09	0.69	0.12
MPS-6	磨盘山	辉石磁铁矿石英岩	4.29	9.42	1.19	4.62	1.13	0.34	0.96	0.15	0.89	5.72	0.19	0.55	0.08	0.56	0.10
MPS-20	磨盘山	辉石磁铁矿石英岩	1.27	2.31	0.29	1.13	0.31	0.12	0.34	0.05	0.36	3.49	0.09	0.28	0.05	0.37	0.07
MPS-13	磨盘山	辉石磁铁矿石英岩	0.67	1.29	0.16	0.67	0.17	0.04	0.16	0.03	0.20	1.57	0.05	0.18	0.04	0.33	0.08

续表 1

Continued Table 1

冀东地区																	
样品号	产地	矿石类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
SLX-33	神龙峡	角闪磁铁矿石英岩	48.26	132.81	20.19	77.82	21.24	1.29	27.23	5.05	28.06	147.75	5.89	15.71	2.11	12.72	1.77
SLX-13	神龙峡	角闪磁铁矿石英岩	2.32	4.00	0.48	2.06	0.55	0.09	0.63	0.12	0.85	8.45	0.22	0.69	0.11	0.74	0.12
SLX-19	神龙峡	角闪磁铁矿石英岩	9.63	13.95	1.42	4.84	0.98	0.34	0.85	0.14	0.83	7.39	0.20	0.62	0.10	0.69	0.11
SLX-41	神龙峡	角闪磁铁矿石英岩	0.94	2.04	0.26	1.11	0.29	0.11	0.31	0.06	0.41	4.52	0.11	0.33	0.05	0.37	0.05
SLX-18	神龙峡	角闪磁铁矿石英岩	1.31	2.19	0.26	1.08	0.27	0.13	0.29	0.05	0.35	3.82	0.09	0.29	0.05	0.31	0.04
SLX-14	神龙峡	磁铁矿石英岩	2.13	3.45	0.39	1.56	0.36	0.14	0.38	0.07	0.49	5.19	0.13	0.41	0.07	0.46	0.07
SLX-27	神龙峡	磁铁矿石英岩	2.30	4.33	0.47	1.66	0.42	0.12	0.41	0.08	0.50	4.41	0.12	0.39	0.06	0.39	0.05
SLX-20	神龙峡	磁铁矿石英岩	5.20	8.10	0.90	3.30	0.83	0.25	0.72	0.13	0.81	6.64	0.19	0.55	0.08	0.56	0.08
SLX-40	神龙峡	磁铁矿石英岩	1.41	2.32	0.25	1.00	0.24	0.16	0.27	0.05	0.37	3.82	0.10	0.30	0.05	0.38	0.06
SLX-35	神龙峡	辉石磁铁矿石英岩	1.07	1.72	0.19	0.72	0.18	0.09	0.19	0.03	0.25	2.61	0.06	0.19	0.03	0.20	0.03
SLX-3	神龙峡	辉石磁铁矿石英岩	0.95	1.65	0.19	0.75	0.19	0.10	0.22	0.04	0.29	3.23	0.07	0.22	0.04	0.26	0.04
SLX-24	神龙峡	角闪磁铁矿石英岩	13.16	24.85	2.81	9.48	2.32	0.30	1.98	0.35	2.11	11.79	0.44	1.21	0.17	1.13	0.16
SLX-15	神龙峡	角闪磁铁矿石英岩	13.57	24.71	2.70	9.10	2.22	0.86	1.82	0.32	1.91	13.12	0.41	1.16	0.17	1.10	0.16
SLX-7	神龙峡	角闪磁铁矿石英岩	1.83	3.18	0.38	1.59	0.42	0.12	0.44	0.08	0.56	5.32	0.14	0.44	0.07	0.48	0.08
SLX-5	神龙峡	角闪磁铁矿石英岩	1.35	2.65	0.31	1.25	0.34	0.15	0.38	0.07	0.50	5.77	0.13	0.44	0.07	0.49	0.08
SRG-9	石人沟	角闪磁铁矿石英岩	4.22	8.73	1.08	4.33	1.09	0.55	0.99	0.15	0.98	5.83	0.21	0.62	0.11	0.69	0.12
SRG-31	石人沟	磁铁矿石英岩	7.49	14.78	1.75	6.49	1.53	0.77	1.37	0.21	1.30	8.18	0.29	0.87	0.15	0.96	0.16
SRG-6	石人沟	磁铁矿石英岩	14.23	31.34	4.12	16.07	3.70	1.16	2.88	0.41	2.33	13.94	0.50	1.42	0.22	1.57	0.24
SRG-8	石人沟	磁铁矿石英岩	7.16	14.19	1.72	6.54	1.47	0.75	1.32	0.20	1.19	7.59	0.27	0.80	0.14	0.92	0.16
SRG-15	石人沟	角闪磁铁矿石英岩	11.00	22.47	2.86	11.01	2.64	1.12	2.27	0.35	2.04	11.32	0.45	1.29	0.21	1.49	0.24
SRG-7	石人沟	角闪磁铁矿石英岩	11.30	16.79	1.89	6.56	1.27	0.66	1.18	0.17	1.01	6.25	0.23	0.66	0.10	0.73	0.13
SC-17	水厂	磁铁矿石英岩	3.00	4.68	0.51	1.64	0.42	0.15	0.48	0.08	0.51	6.05	0.13	0.38	0.05	0.27	0.04
SC-1	水厂	磁铁矿石英岩	2.33	4.36	0.52	1.96	0.48	0.42	0.46	0.08	0.52	3.82	0.12	0.36	0.06	0.36	0.05
SC-18	水厂	磁铁矿石英岩	3.83	7.28	0.93	3.87	0.96	0.37	1.06	0.17	1.11	8.58	0.27	0.79	0.13	0.88	0.15
SC-8	水厂	磁铁矿石英岩	5.46	8.96	0.99	3.46	0.76	0.20	0.71	0.11	0.68	5.79	0.16	0.51	0.08	0.65	0.11
SC-16	水厂	磁铁矿石英岩	1.64	2.86	0.32	1.11	0.24	0.13	0.28	0.05	0.30	2.53	0.07	0.18	0.02	0.11	0.01
SC-7	水厂	磁铁矿石英岩	4.75	10.21	1.32	5.21	1.21	0.27	1.27	0.20	1.18	8.48	0.25	0.67	0.09	0.52	0.07
SC-20	水厂	磁铁矿石英岩	12.76	22.91	3.12	11.05	2.27	0.33	1.48	0.21	1.10	4.31	0.20	0.54	0.09	0.60	0.10
SC-15	水厂	磁铁矿石英岩	1.72	2.98	0.31	1.08	0.26	0.18	0.33	0.06	0.44	5.67	0.09	0.26	0.04	0.23	0.03
SC-21	水厂	磁铁矿石英岩	5.35	8.73	1.00	3.31	0.79	0.19	0.88	0.14	0.89	8.35	0.21	0.61	0.08	0.46	0.07
SY-26	司家营	角闪磁铁矿石英岩	2.15	3.93	0.46	1.91	0.50	0.19	0.54	0.10	0.60	4.67	0.14	0.41	0.07	0.46	0.09
SY-27	司家营	角闪磁铁矿石英岩	3.33	6.50	0.77	3.35	0.90	0.31	0.98	0.17	1.02	7.34	0.23	0.66	0.11	0.72	0.12
SY-39	司家营	角闪磁铁矿石英岩	1.77	3.23	0.37	1.47	0.36	0.18	0.38	0.06	0.41	3.69	0.10	0.32	0.06	0.48	0.08
SY-42	司家营	角闪磁铁矿石英岩	3.73	6.71	0.71	2.63	0.55	0.21	0.50	0.07	0.47	3.98	0.11	0.34	0.07	0.47	0.08

续表 1

Continued Table 1

样品号	产地	矿石类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
SY-44	司家营	角闪磁铁石英岩	5.09	9.90	1.11	4.60	1.06	0.33	1.11	0.18	1.08	7.82	0.24	0.72	0.12	0.82	0.13
SY-32	司家营	赤铁石英岩	104.55	170.72	16.43	55.94	9.78	1.63	7.30	0.67	1.81	5.93	0.22	0.41	0.06	0.34	0.07
SY-31	司家营	赤铁石英岩	17.35	25.41	2.31	8.23	1.48	0.35	1.46	0.21	1.18	9.53	0.26	0.70	0.10	0.62	0.10
SY-46	司家营	赤铁石英岩	2.42	4.44	0.48	1.96	0.49	0.16	0.53	0.09	0.53	3.59	0.11	0.33	0.05	0.39	0.08
SY-23	司家营	磁铁石英岩	8.94	15.77	1.69	6.48	1.49	0.42	1.36	0.21	1.11	7.61	0.24	0.69	0.12	0.75	0.12
SY-24	司家营	磁铁石英岩	2.59	5.05	0.56	2.19	0.55	0.19	0.59	0.10	0.62	4.68	0.14	0.43	0.07	0.48	0.09
SY-22	司家营	磁铁石英岩	7.36	14.18	1.61	6.64	1.47	0.36	1.36	0.23	1.34	7.89	0.29	0.84	0.15	0.99	0.15
SY-19	司家营	磁铁石英岩	8.19	15.53	1.73	6.83	1.55	0.49	1.61	0.27	1.61	13.24	0.37	1.12	0.19	1.22	0.18
SY-20	司家营	磁铁石英岩	6.57	12.33	1.37	5.32	1.13	0.30	0.99	0.15	0.86	6.12	0.20	0.60	0.10	0.72	0.12
SY-3	司家营	磁铁石英岩	5.37	9.55	1.06	4.19	0.86	0.24	0.83	0.12	0.68	4.99	0.15	0.42	0.07	0.49	0.08
SY-30	司家营	磁铁石英岩	3.77	6.93	0.74	2.86	0.63	0.17	0.54	0.07	0.38	2.84	0.08	0.24	0.04	0.27	0.06
SY-7	司家营	磁铁石英岩	6.05	12.49	1.38	5.36	1.27	0.33	1.19	0.20	1.20	8.26	0.26	0.79	0.13	0.90	0.13
SY-37	司家营	磁铁石英岩	3.77	7.94	0.90	3.57	0.93	0.32	0.90	0.14	0.80	5.49	0.17	0.50	0.08	0.55	0.10
SY-38	司家营	黑云磁铁石英岩	13.75	21.46	2.29	8.90	2.20	0.50	2.14	0.29	1.32	7.98	0.24	0.60	0.09	0.53	0.09
SY-14	司家营	角闪磁铁石英岩	5.14	9.17	1.01	4.08	0.90	0.26	0.94	0.15	0.90	7.35	0.20	0.62	0.11	0.68	0.11
WSY-20	王寺峪	磁铁石英岩	9.24	19.38	2.26	8.33	1.87	0.59	1.54	0.22	1.22	7.15	0.25	0.69	0.11	0.66	0.11
WSY-6	王寺峪	磁铁石英岩	7.41	16.20	1.99	7.90	2.01	0.94	1.81	0.29	1.78	10.68	0.40	1.17	0.19	1.28	0.20
WSY-8	王寺峪	磁铁石英岩	8.72	16.71	1.95	7.37	1.73	1.06	1.50	0.24	1.45	8.37	0.33	0.92	0.16	1.13	0.18
WSY-11	王寺峪	磁铁石英岩	6.52	13.81	1.70	6.64	1.63	1.04	1.45	0.23	1.40	8.49	0.32	0.93	0.16	1.03	0.17
WSY-5	王寺峪	辉石磁铁石英岩	5.42	12.13	1.51	5.91	1.52	0.67	1.41	0.23	1.37	8.77	0.31	0.92	0.15	1.02	0.17
WSY-4	王寺峪	角闪磁铁石英岩	6.23	13.30	1.54	5.98	1.43	0.78	1.35	0.21	1.27	8.15	0.28	0.73	0.11	0.65	0.09
XY-7	信益	角闪磁铁石英岩	0.65	0.90	0.10	0.36	0.09	0.04	0.10	0.02	0.13	1.74	0.04	0.12	0.02	0.15	0.03
XY-6	信益	角闪磁铁石英岩	1.12	2.02	0.25	0.91	0.24	0.06	0.27	0.05	0.33	3.60	0.08	0.26	0.04	0.30	0.05
XY-11	信益	磁铁石英岩	7.71	16.05	1.83	6.70	1.78	0.36	1.77	0.27	1.58	11.39	0.36	1.06	0.17	1.15	0.19
XY-10	信益	磁铁石英岩	3.29	6.41	0.74	2.58	0.64	0.12	0.62	0.09	0.51	3.79	0.12	0.35	0.06	0.37	0.06
XY-1	信益	磁铁石英岩	11.97	22.24	2.54	9.82	2.26	0.56	2.03	0.23	1.12	6.26	0.23	0.61	0.10	0.65	0.11
XY-5	信益	磁铁石英岩	3.14	5.02	0.57	2.33	0.57	0.17	0.56	0.08	0.47	3.99	0.11	0.32	0.05	0.36	0.06
XY-8	信益	角闪磁铁石英岩	14.78	32.98	3.87	16.66	4.83	1.23	5.42	0.91	5.40	33.51	1.16	3.29	0.55	3.67	0.59
XS-11	香山	角闪磁铁石英岩	1.08	1.91	0.18	0.68	0.18	0.17	0.21	0.04	0.26	2.78	0.07	0.21	0.03	0.20	0.03
XS-4	香山	角闪磁铁石英岩	39.35	75.99	8.21	27.53	4.96	0.92	3.56	0.48	2.24	11.95	0.43	1.26	0.22	1.69	0.23
ZL22-2	柞栏杖子	磁铁石英岩	3.33	6.88	0.79	2.97	0.74	0.25	0.70	0.12	0.68	4.71	0.15	0.44	0.07	0.40	0.06
ZL22-3	柞栏杖子	磁铁石英岩	4.10	8.10	0.90	3.02	0.79	0.56	0.97	0.17	1.00	8.02	0.22	0.61	0.08	0.44	0.06

注: 稀土元素总量不包含 Y, $La/La^* = La_{PAAS}/(3Pr_{PAAS} + 2Nd_{PAAS})$, $Eu/Eu^* = 2Eu_{PAAS}/(Sm_{PAAS} + Gd_{PAAS})$, $Ce/Ce^* = 2Ce_{PAAS}/(La_{PAAS} + Pr_{PAAS})$, $Y/Y^* = 2Y_{PAAS}/(Dy_{PAAS} + Ho_{PAAS})$, $Pr/Pr^* = 2Pr_{PAAS}/(Ce_{PAAS} + Nd_{PAAS})$, $(La/Yb)_{PAAS} = La_{PAAS}/Yb_{PAAS}$

冀东地区

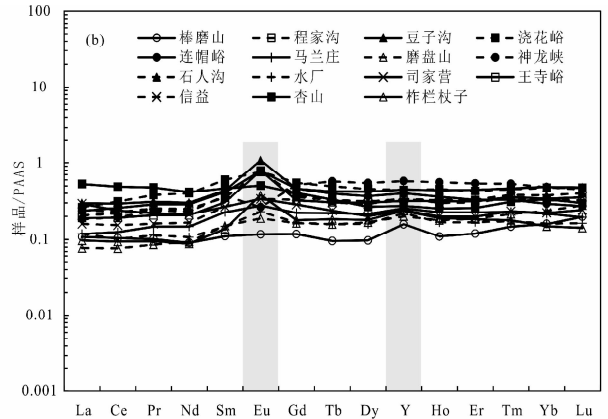
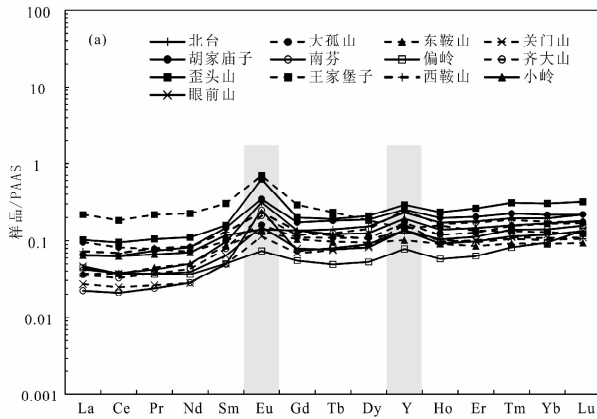


图1 辽冀地区铁矿石(矿区平均值)PAAS 标准化配分图

(a)-鞍本地区;(b)-冀东地区

Fig.1 PAAS normalized REE patterns of the iron ore (ore district average value) from Liaoning-eastern Hebei area

(a)-Anshan-Benxi area; (b)-eastern Hebei area

呈现出与陆源碎屑沉积岩类明显不同的特点。不同矿区铁矿石样品经太古宙后平均澳大利亚沉积岩 (PAAS, McLennan, 1989) 标准化后基本呈现一致的稀土元素配分曲线(图 1a): 轻稀土相对亏损, 重稀土相对富集, $(La/Yb)_{PAAS}$ 比值为 0.02 ~ 3.24, 平均为 0.51; 大部分样品可见 La 正异常, $La/La^* = 0.63 \sim 2.12$, 平均为 1.21 (其中 NF-1 的 La 异常为 -0.86, 不带入计算; 平均含量最低的为西鞍山矿区, 最高的为北台矿区); 绝大部分样品都有强烈的 Eu 正异常, $Eu/Eu^* = 0.73 \sim 5.14$, 平均为 2.32 (平均含量最低的为小岭子矿区, 最高的为南芬矿区); 大部分样品可见明显的 Y 正异常, $Y/Y^* = 0.71 \sim 3.21$, 平均为 1.47 (平均含量最低的为王家堡子矿区, 最高的为眼前山矿区), Y/Ho 比值为 20.47 ~ 82.85, 平均为 38.40 (平均含量最低的为王家堡子矿区, 最高的为眼前山矿区); Ce 异常变化范围为 0.77 ~ 1.09, 平均为 0.92 (平均含量最低的为齐大山矿区, 最高的为小岭子矿区)。

2.2 冀东地区稀土元素特征

冀东地区大部分样品的稀土元素含量也比较低 ($2.22 \times 10^{-6} \sim 400.2 \times 10^{-6}$, 平均为 39.67×10^{-6}); 平均含量最低的为磨盘山矿区, 最高的为杏山矿区), 低于澳大利亚沉积岩的平均稀土总量 184.8×10^{-6} (McLennan, 1989)。不同矿区铁矿石样品经太古界后平均澳大利亚沉积岩 (PAAS, McLennan, 1989) 标准化后基本呈现一致的稀土元素配分曲线(图 1b): 轻稀土相对亏损, 重稀土相对富集的配分模式, $(La/Yb)_{PAAS}$ 比值为 0.14 ~ 22.39, 平均为 0.80 (轻重稀土分馏程度低于鞍本地区); 大部分样品 La 正异常不明显, $La/La^* = 0.56 \sim 1.53$, 平均为 1.05 (平均含量最低的为浇花峪矿区, 最高的为司家营矿区); 大部分样品有较强烈的 Eu 正异常, $Eu/Eu^* = 0.25 \sim 4.22$, 平均为 1.81 (平均含量最低的为信益矿区, 最高的为杏山矿区); 较明显的 Y 正异常, Y/Y^*

$= 0.72 \sim 2.36$, 平均为 1.26 (平均含量最低的为浇花峪矿区, 最高的为棒磨山矿区), Y/Ho 比值为 21.58 ~ 61.63, 平均为 33.14 (平均含量最低的为浇花峪矿区, 最高的为棒磨山矿区); Ce 异常的变化范围为 0.81 ~ 1.04, 平均为 0.94 (平均含量最低的水厂矿区, 最高的为连冒峪矿区)。

3 讨论

3.1 成矿物质来源

BIFs 中 Fe 和 Si 的物质来源主要有两种观点: 一种观点认为来源于大气氧浓度非常低的陆源物质的风化作用(上部来源) (James, 1954; Cloud, 1973, 1983; Drever, 1974); 另一种观点认为与火山关系密切的 BIFs 物质直接来源于海底火山物质(下部来源) (周世泰, 1987; Zhang *et al.*, 2014)。近年来, 随着 BIFs 中稀土元素的大量研究, 根据显示出轻稀土亏损, 重稀土富集, 具有明显的 Eu 异常等特征, 一些学者认为成矿物质来自海底热液 (Holland, 1973; Rao and Naqvi, 1995; Klein, 2005; 李志红等, 2008, 2010)。辽冀地区 BIFs 具有非常相似的稀土元素配分模式: 稀土元素经太古界 PAAS 标准化后呈现轻稀土相对亏损, 重稀土相对富集的配分模式(鞍本地区 $(La/Yb)_{PAAS}$ 平均为 0.52; 冀东地区 $(La/Yb)_{PAAS}$ 平均为 0.80), 无明显 Ce 负异常, 较明显的 La、Eu、Y 正异常(图 1), 与国内外许多地区的 BIFs 特征比较相似(李文达, 1987; Bolhar *et al.*, 2004; Spier *et al.*, 2007; 李志红等, 2008, 2010; 沈其韩等, 2011; 杨秀清等, 2012), 表明他们都属于早前寒武纪海洋化学沉积物。

Eu 正异常是海底热液的特征 (Danielson *et al.*, 1992), 辽冀地区 BIFs 都具有强烈的 Eu 正异常(鞍本地区平均 2.32, 冀东地区平均为 1.81), 这暗示辽冀地区 BIFs 成矿物质来源于海底热液。Huston and Logan (2004) 研究发现不同类型 BIFs 中的 Eu 异常程度不同: 与火山活动关系密切的

Algoma 型铁矿的 $\text{Eu}/\text{Eu}^* > 1.8$, 而与火山活动关系不密切的 Superior 型铁矿的 $\text{Eu}/\text{Eu}^* < 1.8$ 。辽冀地区 BIFs 的 Eu/Eu^* 均大于 1.8, 与该区为 Algoma 型铁矿认识一致 (李志红等, 2008, 2010; 杨秀清等, 2012), 暗示其形成于海底火山环境, 是在特殊的地质背景条件下和火山作用下形成的海水化学沉积岩。

辽冀地区大部分样品也表现出明显的海水特征: 如 La 和 Y 正异常, 较高的 Y/Ho 比值, 重稀土富集 (图 1) (Elderfield *et al.*, 1988; Sholkovitz *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 1994; Nozaki *et al.*, 1997)。 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, 因此 Y/Ho 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)。现代海水的 Y/Ho 比值为 44 ~ 74; 球粒陨石的 Y/Ho 比值为 26 ~ 28, 上地壳岩石和碎屑沉积物的 Y/Ho 比值与球粒陨石相似 (Bau and Dulski, 1996)。鞍本和冀东地区样品 Y/Ho 比值平均为 38.40 (变化范围为 20.47 ~ 82.85) 和 33.14 (变化范围为 21.58 ~ 61.63), 高于球粒陨石, 接近海水的 Y/Ho 值, 这也暗示研究区 BIFs 继承了海水特征。

辽冀地区 BIFs 稀土元素特征表明其同国内外其他 BIFs 一样, 成矿物质都来源于海底热液和海水 (Frei and Polat, 2007; 李志红等, 2008, 2010; 丁文君等, 2009; 沈其韩等, 2009; Zhang *et al.*, 2011; 李文君等, 2012; 杨秀清等, 2012)。研究表明热液流体的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{PAAS}} > 1$, 而海水和热液混合则会导致 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{PAAS}} < 1$ (Sugitani, 1992)。鞍本和冀东地区 BIFs 的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{PAAS}}$ 平均为 0.52 (变化范围为 0.09 ~ 3.24) 和 0.80 (变化范围为 0.14 ~ 22.39), 也显示海水与热液混合的特征。在现代海水与高温热液混合模式的 Sm/Yb-Eu/Sm 图中 (图 2), 辽冀地区 BIFs 和 Isua 地区 BIFs 相似, 大部分落于 0.1% 热液流体之内。图中有些样品偏离了混合线, 可能是由于当时形成时热液和海水的比率不一致或受后期热液改造造成的。其他学者 (蒋少涌等, 1992; 万德芳和蒋少涌, 2002; 李志红等, 2008; 李延河等, 2012) 通过对辽冀地区 BIFs 硅、氧、硫和铁同位素的研究也认为辽冀地区前寒武纪 BIFs 是地球早期海底火山热液喷气作用形成的, 成矿物质来源于与海底火山活动有关的海底高温热液与海水的混合溶液。

前文研究表明辽冀地区 BIFs 成矿物质来源于海底热液和海水, 但是不同地区 BIFs 中 Eu 异常存在差异性。Bau (1993)、Bau and Dulski (1996) 认为 Eu 异常程度暗示了高温热液流体和低温热液流体的波动; Ruhlin and Owen (1986)、Olivarez *et al.* (1991) 进一步研究表明 Eu 异常程度的不同是由于热液与周围海水不同比率混合引起的, 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 (Danielson *et al.*, 1992; 李志红等, 2010), 即释放到海水中的高温热液越多, Eu 的正异常越明显。鞍本地区 Eu 异常平均为 2.32, 明

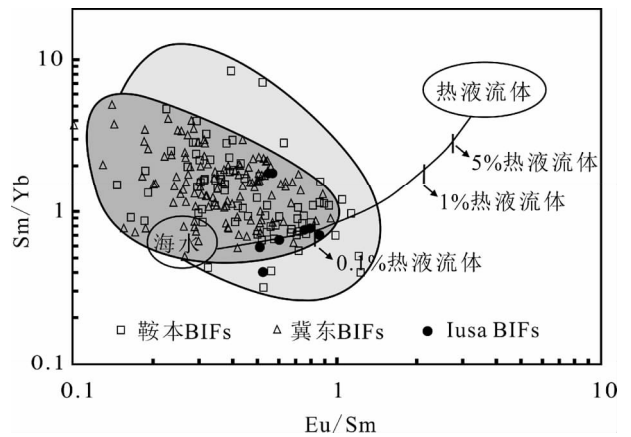


图 2 海水与热液 Sm/Yb-Eu/Sm 混合比例模式图 (底图据 Alexander *et al.*, 2008; Mloszewska *et al.*, 2012)

Isua BIFs 数据引自 Bolhar *et al.*, 2004; 高温热液流体数据 ($> 350^\circ\text{C}$) 引自 Bau and Dulski, 1999; 太平洋海水数据引自 Alibo and Nozaki, 1999; 阴影部分为鞍本和冀东地区样品落点范围

Fig. 2 Conservative, two-component mixing model of Sm/Yb vs. Eu/Sm ratios (base map after Alexander *et al.*, 2008; Mloszewska *et al.*, 2012)

Isua BIFs after Bolhar *et al.*, 2004; high-temperature ($> 350^\circ\text{C}$) hydrothermal fluids after Bau and Dulski, 1999; Pacific seawater after Alibo and Nozaki, 1999; Shadows on the scope of samples placement

显高于冀东地区 (Eu/Eu^* 平均为 1.81), 说明鞍本地区显示了更多的热液贡献; 在 Sm/Yb-Eu/Sm 图解中 (图 2) 可以看到与冀东地区相比, 鞍本地区有更多的数据落于 1% 流体之内, 这也说明了鞍本地区 BIFs 中热液流体所占比率较大。鞍本地区各变质地层中铁矿床稀土元素变化不大 (图 3a), 但在冀东地区从朱杖子岩群、遵化岩群、滦县岩群到迁西岩群 Eu 正异常逐渐降低 (图 3b), 表明 BIFs 中高温热液的贡献逐渐减少, 同时 La 异常、Y 异常和 Y/Ho 比值逐渐增高 (图 3b), 而 La 正异常、Y 正异常和比较高的 Y/Ho 比值是海水的特征, 说明从朱杖子岩群、遵化岩群、滦县岩群到迁西岩群, 海水特征增强, 即海水对稀土的贡献逐渐增强。

3.2 氧化还原环境

在氧化的海水中, Ce^{3+} 被氧化成 Ce^{4+} , 大大降低了 Ce 的溶解度, 而被 Mn-Fe 的氢氧化物、粘土颗粒等吸附而发生沉淀, 造成海水中 Ce 的亏损 (Byrne and Sholkovitz, 1996)。因此, 可以根据 Ce 异常来判别古海洋的氧化还原状态, 即在氧化的海水中, 经页岩标准化后的海水具有强烈的 Ce 负异常, 而在低氧或缺氧的海水中则缺乏明显的 Ce 负异常。由于 Ce 异常因 La 丰度的不规则变化会变得复杂化, Bau and Dulski (1996) 提出使用 $\text{Ce}/\text{Ce}^* - \text{Pr}/\text{Pr}^*$ 图解来判断真正的 Ce 异常。在该判别图解中 (图 4), 绝大多数样品落在 La 正异常区域和无异常区域, 只有少数样品投在 Ce 负异常区域, 与新太古代其他地区的 BIFs 具有类似特征, 暗示研究区形成于

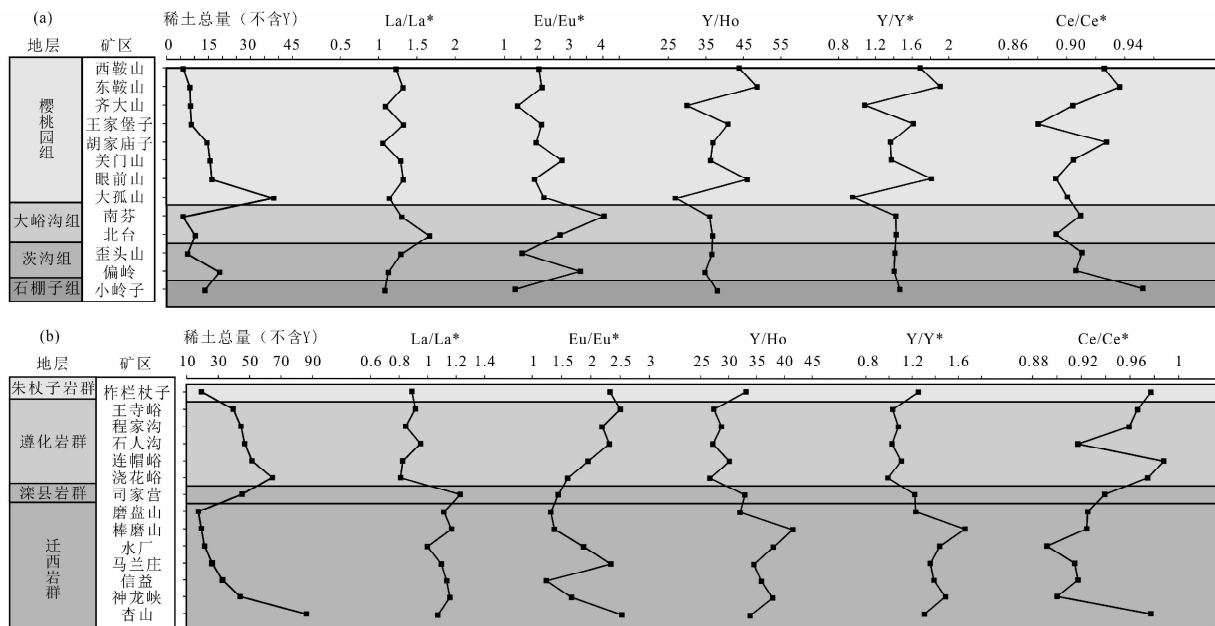


图3 辽冀地区各岩群铁矿床稀土元素(矿区平均值)变化图解

(a)-鞍本地区;(b)-冀东地区

Fig. 3 Diagrams showing variations of rare earth elements of iron deposit (ore district average value) in each terrain from Liaoning-eastern Hebei area

(a)-Anshan-Benxi area; (b)-eastern Hebei area

较还原环境,这与早前寒武纪属于缺氧环境的认识基本一致(Bekker *et al.*, 2010; Planavsky *et al.*, 2010; 赵振华, 2010)。鞍本地区一些样品落在了左下角,即 La 和 Ce 正异常区域,说明海水特征比较强(Bau and Dulski, 1996),且海水是还原的。在图 3 中可以看出,辽冀地区无明显 Ce 负异常,但在鞍本地区(图 3a),从樱桃园组、大峪沟组、茨沟组到石棚子组 Ce 负异常呈减小趋势,冀东地区(图 3b)从朱杖子岩群、遵化岩群、滦县岩群到迁西岩群 Ce 负异常呈增大趋势。Drever(1974)认为 BIFs 形成于氧气含量比现在低,而二氧化碳比现在高的大气环境;李志红等(2008)根据鞍本地区 BIFs 中缺乏 Ce 负异常,富集重 Fe 同位素,推测当时海水中只有少部分铁发生了氧化和沉淀,并未发生完全氧化沉淀,说明氧化剂的含量是有限的,进而认为当时铁矿沉淀的环境为低氧或缺氧环境;李延河等(2010)对华北地台前寒武纪 BIFs 硫同位素的研究认为 BIFs 的广泛分布和硫同位素的非质量分馏普遍存在,表明当时大气氧水平很低,可能不足现在氧水平的 1‰。

3.3 碎屑物质对 BIFs 的影响

辽冀地区 BIFs 中 Al_2O_3 和 TiO_2 含量均很低(鞍本地区 Al_2O_3 平均含量为 0.65%, TiO_2 平均含量为 0.02%,冀东地区 Al_2O_3 平均含量为 1.65%, TiO_2 平均含量为 0.11%),但大部分矿区 Al_2O_3 和 TiO_2 相关性很明显(杨秀清等,2014)。Al 和 Ti 在热液交代、成岩作用和风化作用中非常稳定(Kranidiotis

and MacLean, 1987),因此,辽冀地区 Al_2O_3 和 TiO_2 的相关性暗示该区 BIFs 在形成过程中有碎屑物质的加入(Ewers and Morris, 1981; Dymek and Klein, 1988; Manikyamba *et al.*, 1993)。并且,BIFs 在原始沉积时化学组分很容易受碎屑物质的加入而有所改变(Arora *et al.*, 1995),如在鞍本和冀东地区 BIFs 中 Eu 异常、Y 异常和 Y/Ho 比值变化范围很大(鞍本地区 $Eu/Eu^* = 0.73 \sim 5.14$, $Y/Y^* = 0.71 \sim 3.21$, Y/Ho 比值为 20.47 ~ 82.85;冀东地区 $Eu/Eu^* = 0.25 \sim 4.22$, $Y/Y^* = 0.72 \sim 2.36$, Y/Ho 比值为 21.58 ~ 61.63),稀土元素总量变化范围也较大。在图 5 中我们可以看到,冀东地区 BIFs 的 ΣREE 含量明显高于鞍本地区,较高的稀土元素可能是由于 BIFs 化学沉积过程中碎屑物质的加入造成的(Alibert and McCulloch, 1993; Arora *et al.*, 1995)。同时冀东地区 Eu 正异常、Y 正异常程度均小于鞍本地区,他们分别是海水和热液的特征,说明冀东地区 BIFs 热液特征和海水特征都没有鞍本地区明显,这可能也是由于冀东地区 BIFs 有更多的碎屑加入,而碎屑物质稀土元素含量和 Eu 异常、Y 异常明显不同于海底热液和海水,使 BIFs 化学沉积特征不明显。冀东地区 Y/Ho 比值明显低于鞍本地区(冀东地区平均为 33.14;鞍本地区平均为 38.40),且 Y/Ho 比值更接近球粒陨石(Y/Ho 比值为 26 ~ 28),这可能也暗示冀东 BIFs 中显示了更多的碎屑物质特征,且在冀东地区形成了大量绿泥磁铁矿石岩、角闪磁铁矿石岩和辉石磁铁矿石岩等。

前人研究认为辽冀地区 BIFs 主要形成于火山-沉积岩系(沈其韩,1998;沈其韩等,2011),形成时陆源碎屑沉积和火

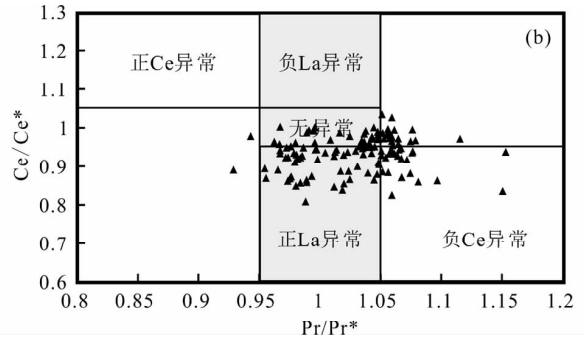
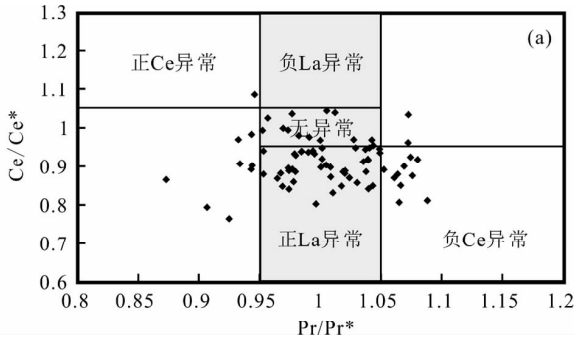


图4 Ce异常判别图解(底图据 Bau and Dulski, 1996)

(a)-鞍山地区;(b)-冀东地区

Fig.4 Ce/Ce* -Pr/Pr* discrimination diagram for Ce anomaly from Liaoning-eastern Hebei area (base map after Bau and Dulski, 1996)

(a)-Anshan-Benxi area; (b)-eastern Hebei area

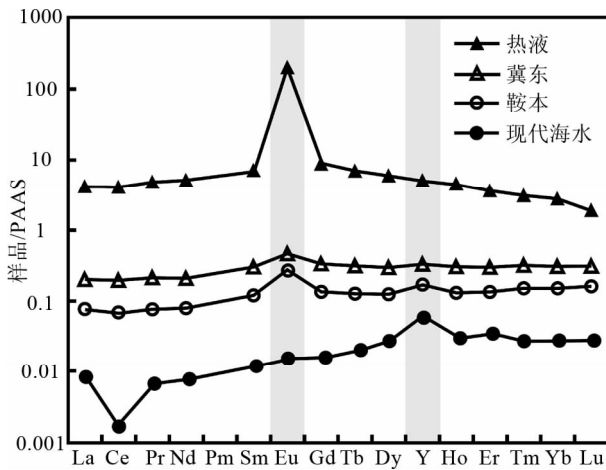


图5 辽冀地区铁矿石 PAAS 标准化稀土元素配分曲线 (海水和高温热液引自 Robert and Ali, 2007)

Fig.5 PAAS-normalized REE of iron ore from Liaoning-eastern Hebei area (seawater and high-temperature hydrothermal after Robert and Ali, 2007)

山作用比较明显,这些碎屑物质可能随着硅质和铁质的化学沉积过程一同形成于 BIFs 中。杨秀清等(2014)通过对辽冀地区主量元素的研究也有相同的认识,冀东地区除 $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^T$ 外,其他氧化物含量均高于鞍山地区,显示更多碎屑物质的加入。前人对国内外其他地区 BIFs 的研究也认为 BIFs 形成过程中有碎屑物质的加入 (Roy and Venkatesh, 2009; 沈其韩等, 2011; 蓝廷广等, 2012)。本文通过对鞍山和冀东地区不同矿区铁矿石样品的稀土元素的研究,其结果也显示该区 BIFs 在形成过程中有碎屑物质的加入,与前人研究结果相符合。

4 结论

辽冀地区 BIFs 经太古界 PAAS 标准化后呈现轻稀土相

对亏损、重稀土相对富集的配分模式,具 Eu、Y、La 的正异常 (La 异常不明显),表明研究区 BIFs 的成矿物质来源于海底热液和海水的混合溶液,且鞍山地区有更多的热液贡献;而在冀东地区,从迁西岩群、滦县岩群、遵化岩群到朱杖子岩群 Eu 正异常逐渐升高,同时 La 异常、Y 异常和 Y/Ho 逐渐降低,可能暗示从迁西岩群、滦县岩群、遵化岩群到朱杖子岩群,海水特征减弱,热液贡献逐渐增多;Ce/Ce* 值变化范围为 0.77 ~ 1.09,缺乏明显的 Ce 负异常,暗示 BIFs 形成于还原海水环境;辽冀地区 BIFs 的稀土元素总量、Eu 异常、Y 异常和 Y/Ho 比值变化范围比较大,可能与沉积过程碎屑物质的加入有关,且与鞍山地区相比,冀东地区的 Eu 正异常、Y 正异常程度均小于鞍山地区, Y/Ho 比值更接近球粒陨石 (Y/Ho 比值为 26 ~ 28),暗示有更多的碎屑物质的加入。

致谢 野外工作得到了辽宁省冶金地质质监局、河北省地质矿产局第二地质大队和河北联合大学等相关人员的帮助和支持;数据测试得到了北京大学黄宝玲老师的帮助和指导;审稿专家对本文提出了许多宝贵意见;在此一并表示衷心感谢!

References

- Alexander BW, Bau M, Andersson P and Dulski P. 2008. Continently-derived solutes in shallow Archean seawater: Rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9Ga Pongola Supergroup, South Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (2): 378 - 394
- Alibert C and McCulloch MT. 1993. Rare earth element and neodymium isotopic compositions of the banded iron-formations and associated shales from Hamersley, Western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(1): 187 - 204
- Alibo DS and Nozaki Y. 1999. Rare earth elements in seawater: Particle association, shale-normalization, and Ce oxidation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3): 363 - 372
- Arora M, Govil PK, Charan SN, Uday RB, Manikyamba C, Chatterjee AK and Naqvi SM. 1995. Geochemistry and origin of Archean

- banded iron-formation from the Bababudan schist belt, India. *Economic Geology*, 90(7): 2040–2057
- Bau M. 1993. Effects of syn- and post-depositional processes on the rare earth element distribution in Precambrian iron-formations. *European Journal of Mineralogy*, 5(2): 257–267
- Bau M and Dulski P. 1996. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 79(1): 37–55
- Bau M and Dulski P. 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. *Chemical Geology*, 155(1–2): 77–90
- Bekker A, Slack JF, Planavsky A, Krapež B, Hofmann A, Konhauser KO and Rouxel OJ. 2010. Iron Formation; The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology*, 105(3): 467–508
- Bolhar R, Kamber BS, Moorbath S, Fedo CM and Whitehouse MJ. 2004. Characterisation of Early Archaean chemical sediments by trace element signatures. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(1): 43–60
- Byrne RH and Sholkovitz ER. 1996. Marine chemistry and geochemistry of the lanthanides. *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, 23: 497–593
- Cloud P. 1973. Paleooecological significance of the banded iron-formation. *Economic Geology*, 68(7): 1135–1143
- Cloud P. 1983. Banded iron-formation: A Gradualist's dilemma. *Developments in Precambrian Geology*, 6: 401–416
- Danielson A, Möller P and Dulski P. 1992. The europium anomalies in banded iron formations and the thermal history of the oceanic crust. *Chemical Geology*, 97(1): 89–100
- Ding WJ, Chen ZL, Chen BL, Dong FX and Cui LL. 2009. Geochemical characters of band iron formations from Xingshan iron deposit in Qianan area, Hebei Province; Implication for their origin. *Journal of Geomechanics*, 15(4): 363–373 (in Chinese with English abstract)
- Drever JI. 1974. Geochemical model for the origin of Precambrian banded iron formations. *Geological Society of America Bulletin*, 85(7): 1099–1106
- Dymek RF and Klein C. 1988. Chemistry, petrology and origin of banded iron-formation lithologies from the 3800Ma Isuasupracrustal belt, West Greenland. *Precambrian Research*, 39(4): 247–302
- Elderfield H, Whitfield M, Burton JD, Bacon MP and Liss PS. 1988. The oceanic chemistry of the rare-earth elements and discussion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 325(1583): 105–126
- Ewers WE and Morris RC. 1981. Studies of the Dales Gorge member of the Brockman iron formation, Western Australia. *Economic Geology*, 76(7): 1929–1953
- Frei R and Polat A. 2007. Source heterogeneity for the major components of ~3.7Ga Banded Iron Formations (Isua Greenstone Belt, Western Greenland): Tracing the nature of interacting water masses in BIF formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 253(1): 266–281
- Frei R, Dahl PS, Duke EF, Frei KM, Hansen TR, Frandsson MM and Jensen LA. 2008. Trace element and isotopic characterization of Neoproterozoic and Paleoproterozoic iron formations in the Black Hills (South Dakota, USA): Assessment of chemical change during 2.9–1.9Ga deposition bracketing the 2.4–2.2Ga first rise of atmospheric oxygen. *Precambrian Research*, 162(3): 441–474
- Holland HD. 1973. The oceans: A possible source of iron in iron-formations. *Economic Geology*, 68(7): 1169–1172
- Huston DL and Logan GA. 2004. Barite, BIFs and bugs: Evidence for the evolution of the Earth's early hydrosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1): 41–55
- James HL. 1954. Sedimentary facies of iron-formation. *Economic Geology*, 49(3): 235–293
- Jiang SY, Ding DP, Wan DF and Li YH. 1992. Characteristics of silicon isotope composition of Archean Banded Iron Formation (BIF) from Gongchangling in Liaoning Province. *Science in China (Series D)*, 22(6): 626–631 (in Chinese)
- Klein C. 2005. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origins. *American Mineralogist*, 90(10): 1473–1499
- Kranidiotis P and MacLean WH. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, 82(7): 1898–1911
- Lan TG, Fan HR, Yan KF, Zheng XL and Zhang HD. 2012. Geological and geochemical characteristics of Paleoproterozoic Changyi banded iron formation deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3595–3611 (in Chinese with English abstract)
- Li WD. 1987. The Application of Rare Earth Elements in the Study of ore Deposits. Beijing: Geological Publishing House, 1–202 (in Chinese)
- Li WJ, Jin XD, Cui ML and Wang CL. 2012. Characteristic of rare earth elements, trace elements and geological significations of BIF from Sijiyang in eastern Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3570–3678 (in Chinese with English abstract)
- Li YH, Hon KJ, Wan DF, Zhang ZJ and Yue GL. 2010. Formation mechanism of Precambrian Banded Iron Formation and atmosphere and ocean during early stage of the Earth. *Acta Petrologica Sinica*, 84(9): 1359–1373 (in Chinese with English abstract)
- Li YH, Hon KJ, Wan DF and Zhang ZJ. 2012. A compare geochemistry study for Algoma- and Superior-type banded iron formations. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3513–3519 (in Chinese with English abstract)
- Li ZH, Zhu XK and Tang SH. 2008. Characters of Fe isotopes and rare earth elements of banded iron formations from Anshan-Benxi area: Implications for Fe source. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(4): 285–290 (in Chinese with English abstract)
- Li ZH, Zhu XK, Tang SH, Li J and Liu H. 2010. Characteristics of rare earth elements and geological significations of BIFs from Jidong, Wutai and Lüliang area. *Geoscience*, 24(5): 840–846 (in Chinese with English abstract)
- Manikyamba C, Balaran V and Naqvi SM. 1993. Geochemical signatures of polygenetic origin of a banded iron formation (BIF) of the Archaean Sandur greenstone belt (schist belt) Karnataka nucleus, India. *Precambrian Research*, 61(1): 137–164
- McLennan SM. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21(1): 169–200
- Mloszewska AM, Pecoits E, Cates NL, Mojzsis SJ, O'Neil J, Robbins LJ and Konhauser KO. 2012. The composition of Earth's oldest iron formations: The Nuvvuagittuq Supracrustal Belt (Québec, Canada). *Earth and Planetary Science Letters*, 317: 331–342
- Nozaki Y, Zhang J and Amakawa H. 1997. The fractionation between Y and Ho in the marine environment. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1): 329–340
- Olivarez AM, Owen RM and Rea DK. 1991. Geochemistry of eolian dust in Pacific pelagic sediments; Implications for paleoclimatic interpretations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(8): 2147–2158
- Planavsky N, Bekker A, Rouxel OJ, Kamber B, Hofmann A, Knudsen A and Lyons TW. 2010. Rare earth element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic Fe formations revisited: New perspectives on the significance and mechanisms of deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(22): 6387–6405
- Rao TG and Naqvi SM. 1995. Geochemistry, depositional environment and tectonic setting of the BIF's of the Late Archaean Chitradurga Schist Belt, India. *Chemical Geology*, 121(1): 217–243
- Robert F and Ali P. 2007. Source heterogeneity for the major components of 3.7Ga Banded Iron Formations (Isua Greenstone Belt, Western Greenland): Tracing the nature of interacting water masses in BIF formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 253(1): 266–281
- Roy S and Venkatesh AS. 2009. Banded iron formation to blue dust: Mineralogical and geochemical constraints from the Precambrian

- Jilling-Langalata deposits, Eastern Indian Craton. *Applied Earth Science*, 118(3-4): 178-188
- Ruhlin DE and Owen RM. 1986. The rare earth element geochemistry of hydrothermal sediments from the East Pacific Rise; Examination of a seawater scavenging mechanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(3): 393-400
- Shen QH. 1998. Geological characteristics and forming environment of Early Precambrian Banded Iron Formation in North China Platform. In: Cheng YQ (ed.). *Research Contributions of Early Precambrian Geology of North China Platform*. Beijing: Geological Publishing House, 1-30 (in Chinese)
- Shen QH, Song HX and Zhao ZR. 2009. Characteristics of rare earth elements and trace elements in Hanwang Neo-Archaean banded iron formations, Shandong Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 693-699 (in Chinese with English abstract)
- Shen QH, Song HX, Yang CH and Wan YS. 2011. Petrochemical characteristics and geological significations of banded iron formations in the Wutai Mountain of Shanxi and Qianan of eastern Hebei. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(2): 161-171 (in Chinese with English abstract)
- Sholkovitz ER, Landing WM and Lewis BL. 1994. Ocean particle chemistry: The fractionation of rare earth elements between suspended particles and seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(6): 1567-1579
- Spier CA, de Oliveira SMB, Sial AN and Rios FJ. 2007. Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 152(3): 170-206
- Sugitani K. 1992. Geochemical characteristics of Archean cherts and other sedimentary rocks in the Pilbara Block, Western Australia: Evidence for Archean seawater enriched in hydrothermally-derived iron and silica. *Precambrian Research*, 57(1): 21-47
- Wan DF and Jiang SY. 2002. Silicon isotope compositions of Precambrian banded iron ore deposits and its geological significance. *Mineral Deposits*, 21 (Suppl. 1): 346-348 (in Chinese with English abstract)
- Yang XQ, Li HM, Li LX, Liu MJ and Bai Y. 2012. Characteristics of rare earth elements and the geological significations of magnetite from Gongchangling iron deposit in Liaoning Province. *Rock and Mineral Analysis*, 31(6): 1058-1066 (in Chinese with English abstract)
- Yang XQ, Li HM, Li LX, Yao T, Chen J and Liu MJ. 2014. Geochemical characteristics of Banded Iron Formations in Liaoning-eastern Hebei area; I. Characteristics of major elements. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1218-1238
- Zhai MG, Windley BF, Sill JD, Yang RY and Han S. 1989. REE and trace element geochemistry of the Archean Anshan-Benxi BIF, Liaoning, Northeast China. *Geochimica*, 3: 241-250 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Amakawa H and Nozaki Y. 1994. The comparative behaviors of yttrium and lanthanides in the seawater of the North Pacific. *Geophysical Research Letters*, 21(24): 2677-2680
- Zhang XJ, Zhang LC, Xiang P, Wan B and Pirajno F. 2011. Zircon U-Pb age, Hf isotopes and geochemistry of Shuichang Algoma-type banded iron-formation, North China Craton: Constraints on the ore-forming age and tectonic setting. *Gondwana Research*, 20(1): 137-148
- Zhang ZC, Hou T, Santosh M, Li HM, Li JW, Zhang ZH, Song XY and Wang M. 2014. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 57: 247-263
- Zhao ZH. 2010. Banded iron formation and related great oxidation event. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 1-12 (in Chinese with English abstract)
- Zhou ST. 1987. The petrochemical study of the Archean banded iron deposit in Anshan-Benxi district, Liaoning Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 9(2): 139-153 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 丁文君, 陈正乐, 陈柏林, 董法先, 崔玲玲. 2009. 河北迁安杏山铁矿床地球化学特征及其对成矿物质来源的指示. *地质力学学报*, 15(4): 363-373
- 蒋少涌, 丁梯平, 万德芳, 李延河. 1992. 辽宁弓长岭太古代条带状硅铁建造(BIF)的硅同位素组成特征. *中国科学(D辑)*, 22(6): 626-631
- 蓝廷广, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 郑小礼, 张华东. 2012. 鲁东昌邑古元古代BIF铁矿床地球化学特征及矿床成因讨论. *岩石学报*, 28(11): 3595-3611
- 李文达. 1987. 稀土元素在矿床学研究中的应用. 北京: 地质出版社, 1-202
- 李文君, 靳新娣, 崔敏利, 王长乐. 2012. BIF微量稀土元素分析方法及其在冀东司家营铁矿中的应用. *岩石学报*, 28(11): 3670-3678
- 李延河, 侯可军, 万德芳, 张增杰, 乐国良. 2010. 前寒武纪条带状硅铁建造的形成机制与地球早期的大气和海洋. *地质学报*, 84(9): 1359-1373
- 李延河, 侯可军, 万德芳, 张增杰. 2012. Algoma型和Superior型硅铁建造地球化学对比研究. *岩石学报*, 28(11): 3513-3519
- 李志红, 朱祥坤, 唐素寒. 2008. 鞍山-本溪地区条带状铁建造的铁同位素与稀土元素特征及其对成矿物质来源的指示. *岩石矿物学杂志*, 27(4): 285-290
- 李志红, 朱祥坤, 唐素寒, 李津, 刘辉. 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. *现代地质*, 24(5): 840-846
- 沈其韩. 1998. 华北地台早前寒武纪条带状铁英岩地质特征和形成的地质背景. 见: 程裕淇主编. *华北地台早前寒武纪地质研究论文集*. 北京: 地质出版社, 1-30
- 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. *地球学报*, 30(6): 693-699
- 沈其韩, 宋会侠, 杨崇辉, 万渝生. 2011. 山西五台山和冀东迁安地区条带状铁矿的岩石化学特征及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 30(2): 161-171
- 万德芳, 蒋少涌. 2002. 前寒武纪条带状铁矿硅同位素特征及其地质意义. *矿床地质*, 21(S1): 346-348
- 杨秀清, 李厚民, 李立兴, 刘明军, 陈靖, 白云. 2012. 辽宁弓长岭铁矿床磁铁矿稀土元素特征及其地质意义. *岩矿测试*, 31(6): 1058-1066
- 杨秀清, 李厚民, 李立兴, 姚通, 陈靖, 刘明军. 2014. 辽冀地区条带状铁建造地球化学特征: I. 主量元素特征. *岩石学报*, 30(5): 1218-1238
- 翟明国, Windley BF, Sills JD, 杨瑞英, 韩松. 1989. 鞍本太古代条带状铁建造(BIF)的稀土及微量元素特征. *地球化学*, (3): 241-250
- 赵振华. 2010. 条带状铁建造(BIFs)与地球大氧化事件. *地学前缘*, 17(2): 1-12
- 周世泰. 1987. 鞍山-本溪地区鞍山群变质岩岩石化学研究及条带状铁矿的成矿条件. *地球学报*, 9(2): 139-153