

安徽西部霍邱周油坊铁矿床地球化学特征及成因^{*}

潘仙敏¹, 杨 强², 罗 通³

(1 江西省地质矿产勘查开发局 916 大队, 九江 332100)

(2 安徽省地质矿产勘查局 311 地质队, 安庆 246000)

(3 安徽省淮北矿业集团海孜煤矿, 淮北 235000)

摘要:周油坊铁矿床位于华北地台南缘皖西霍邱铁矿田中部, 含矿地层位于新太古界变质岩系上部, 矿石中的铁矿物主要为镜铁矿和磁铁矿。通过研究该矿床矿石和围岩的地球化学特征, 探讨矿床的成矿物质来源、成矿古地理环境及富铁矿的成因。结果表明, 周油坊矿床的主要成矿物质来源于混合了海底火山热液的高温海水, 形成于大洋岛弧与大陆之间有陆源物质输入的弧后陆前还原海洋环境, 初步认为该矿床为原始沉积变质型富铁矿。

关键词:铁矿床; 富铁矿; 地球化学特征; 周油坊; 霍邱

中图分类号: P618.31; P618.7; P595

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2016)01-052-09

前寒武系岩石中发现的细条带状硅质赤铁矿矿床, 主要由化学(或生物化学)沉积的燧石和富铁的氧化物、碳酸盐、硅酸盐或硫化物薄层组成。古元古代为条带状含铁建造(BIF)产出的高峰期, 发育于邻近太古宙克拉通边界的古元古代盆地或地槽中, 其形成与海底热液喷流作用有关, 主要发育时期为 2.6~1.8 Ga 之间^[1]。条带状含铁建造(BIF)主要分阿尔戈马型(Algoma)和苏必利尔型(Superior)^[2], 这两种类型的矿床是世界上最主要的铁矿资源。我国从中太古界(如冀东地区)到新太古界(如霍邱地区、鞍山地区、冀东地区)均产巨大的条带状含铁建造矿床。

前人已对霍邱 BIF 型铁矿地层划分^[3]、变质作用^[4-5]、地质构造^[6]、地质年代学^[7-8]、地球化学^[9-11]等方面进行了研究, 但研究程度仍不如其他地区的 BIF 型铁矿, 且有关该区的富铁矿成因尚未报道。本文介绍霍邱矿田周油坊铁矿床的成矿地质背景及地质特征, 在对铁矿石和围岩主量、稀土和微量元素特征研究的基础上, 探讨周油坊铁矿床的成矿物质来源、成矿古地理环境及成矿模式, 进而讨论该矿床贫铁矿石中富铁矿石的成因。

1 区域地质背景

霍邱铁矿田处于华北地台南缘, 分布在合肥坳

陷西北部, 皖西霍邱县西北周集—重新集一带, 即淮河南岸四十里长山东侧的Ⅱ级阶地。矿田南北向展布约 40 km, 东西 2~8 km, 主要由李楼、周油坊、草楼、重新集等矿床组成(图 1)。钻孔揭露霍邱矿田发育混合岩化区域变质岩系—霍邱群, 太古宙霍邱群一套区域变质的片麻岩、变粒岩、片岩、大理岩、斜长角闪岩类岩石, 混合岩化较强烈^[4], 总厚约 3.3 km。自南向北呈一由北西向渐转为北东向的弧形, 南部收敛, 北部舒展, 由图 1 可知含矿带的展布与向西凸出的弧形构造方向一致。霍邱群划分为花园组、吴集组和周集组三个岩石地层组, 为中基性火山沉积旋回^[3], 各组之间均为整合接触。地层表现为一复式向斜, 由大致平行排列的周集倒转向斜、李老庄向斜、范桥向斜等次级构造组成, 南缘为南北向展布的海槽条带状硅铁建造。

2 矿床地质特征

2.1 矿体特征

矿体被厚 73.99~196.18 m 的第四系覆盖, 因受周集倒转向斜控制, 铁矿体均集中分布于周集倒转向斜两翼^[11], 矿床内上、下矿带的矿体在矿体层数、形态和产状方面均有相似之处, 各矿带上部矿体

^{*} 收稿日期: 2015-04-17 改回日期: 2015-06-15 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 江西省地质矿产勘查开发局地质科研项目(编号: 201187)资助。

第一作者简介: 潘仙敏, 1990 年生, 男, 助理工程师, 主要从事固体矿产勘查、区域地质调查、科研及成矿预测工作。

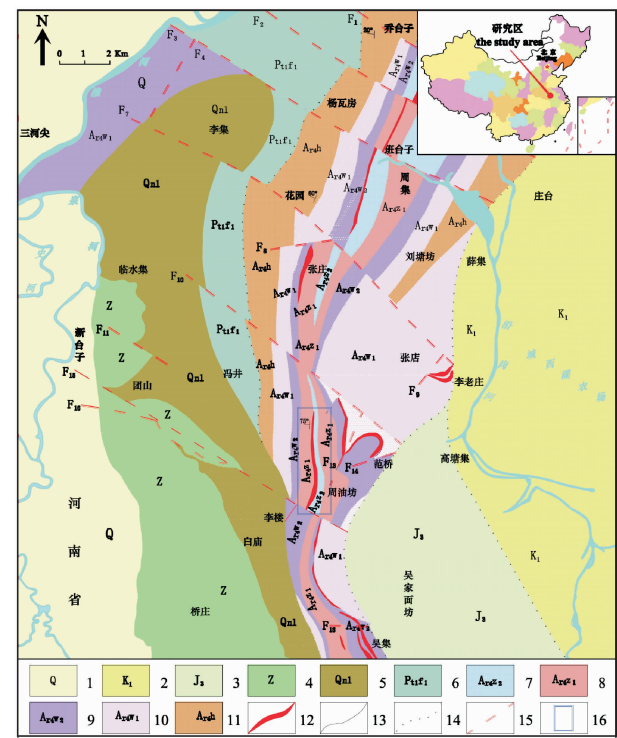


图 1 安徽霍邱铁矿田地质略图(安徽省地矿局 313 地质队资料^①修编)

Fig. 1 Generalized geologic map of the Huoqiu iron orefield, Anhui province

1-第四系;2-下白垩统;3-上侏罗统;4-震旦系;5-青白口系;6-风阳群;7-周集组上段;8-周集组下段;9-吴集组上段;10-吴集组下段;11-花园组;12-铁矿体;13-地质界线;14-不整合界线;15-断层;16-工作区

均为透镜体状,中部矿体为似层状,底部矿体为层状。含矿岩段位于新太古界变质岩系上部,由两次成矿旋回形成自下而上呈铁的碳酸盐相—硅酸盐相—氧化物相含矿建造,即位于海相复理式建造与富镁碳酸盐建造之间,呈明显带状分布。矿体由于受硅质岩控制一般呈层状或似层状,矿体产状变化稳定,厚度沿走向及倾向变化稳定(图 2)。矿区内含矿岩组呈西倾的单斜构造,由 S 向 N 逐渐变薄,浅部产状陡峻,构成直立片理带,倾角 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$,深部产状变缓,局部有变厚的趋势,深部有向上翘起的趋势。另有一条平移的 F_1 断层切割矿体, F_1 断层走向约 280° ,倾向 NNE,倾角约 85° (图 2),该断层不但具平移性质,且在上盘相对下降的同时产生扭转,使矿体产状变陡,埋深增大,断层破碎带内岩石破碎,裂隙发育。无明显大的断裂构造切穿矿体,矿体受构造的影响不大。矿区内岩浆岩均为岩脉,沿断裂充填。主要岩性有云英岩化花岗岩、伟晶岩、细粒花岗岩、斜长花岗岩和辉绿岩等。脉岩对矿体具有切割破坏作用。

周油坊铁矿床可分为 I_1 、 I_2 、II、III、IV、V、VI、VII 七个含矿带,其中上矿带由 I_1 、 I_2 、II、III 号矿体组成,下矿带由 IV、V、VI、VII 号矿体组成(图 2)。下矿带 V、VI 号为主矿体,其中 V 号矿体分布于 8~63 线,走向长 3610 m,沿倾向控制斜长 92~429 m,最大真厚度 31.26 m,矿体平均厚度 9.48 m。VI 号矿体贯穿全矿区,控制长 3670 m,控制斜长 138~667 m,最大真厚度 76.84 m,矿体平均厚度 29.79 m。

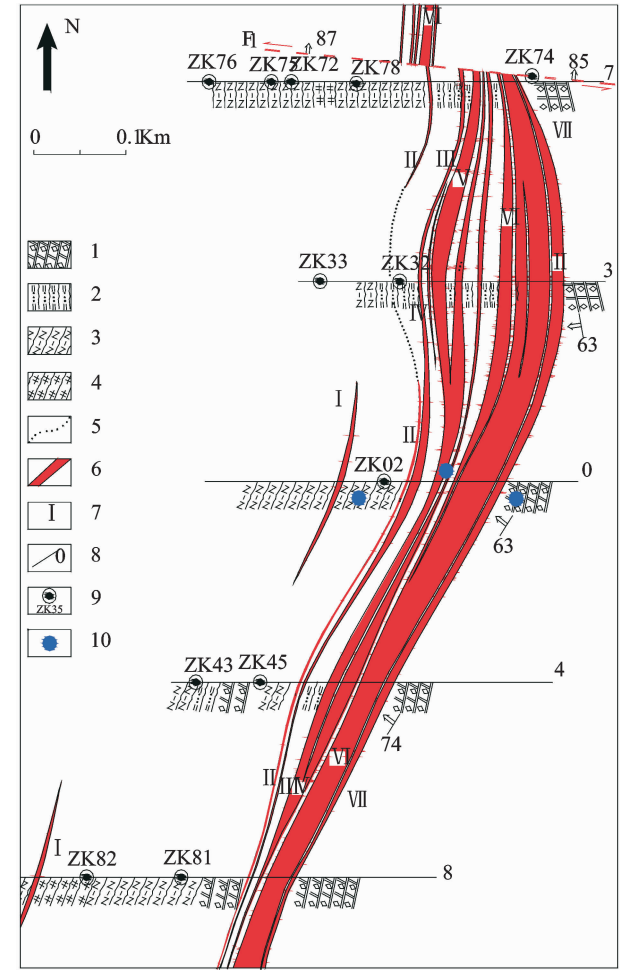


图 2 安徽霍邱铁矿田周油坊铁矿床地质略图(安徽省地矿局 313 地质队资料^①改绘)

Fig. 2 Generalized geologic map of the Zhouyoufang iron deposit in the Huoqiu iron orefield, Anhui province

1-白云石大理岩;2-白云石英片岩;3-斜长黑云片岩;4-铁闪片岩;5-岩相界线;6-矿体界线;7-矿体编号;8-勘探线位置及编号;9-钻孔位置及编号;10-采样位置

2.2 矿石结构构造

矿石主要为变晶结构,次为交代结构和压碎结构。矿石构造以条带状和浸染状构造为主,二者常复合在一起或呈相互过渡,次为斑点状构造、片状构造、块状构造。浅部矿石氧化作用较强烈,主要分布于古风化壳内,其次分布在深部构造破裂带内。区

内由南向北氧化带的下限埋深逐渐增大,厚度逐渐变薄。

2.3 矿石矿物

矿石中的铁矿物主要为镜铁矿、磁铁矿,偶有少量赤铁矿和褐铁矿等。

镜铁矿:呈钢灰—银灰色,多为半自形—他形片状或粒状,具明亮的镜面(图 3a),镜下白色微带蓝灰色,非均质性清晰,常有 2~3 组片状双晶,双晶纹清晰,消光均匀(图 3c),一般大小为 0.05 mm×0.15 mm~0.3 mm×1.2 mm。

磁铁矿:呈灰色、微带玫瑰色,半金属光泽,多呈半自形—他形,粒径 0.05~0.5 mm。脉石矿物主要为石英及闪石类矿物,少量黑云母、白云母等(图 3b、图 3d)。石英粒度 0.2~0.5 mm,闪石类矿物主要为普通角闪石、铁闪石、少量透闪石、阳起石、蓝闪石等,呈柱状、粒状、纤维状,粒径 0.3~1.0 mm。

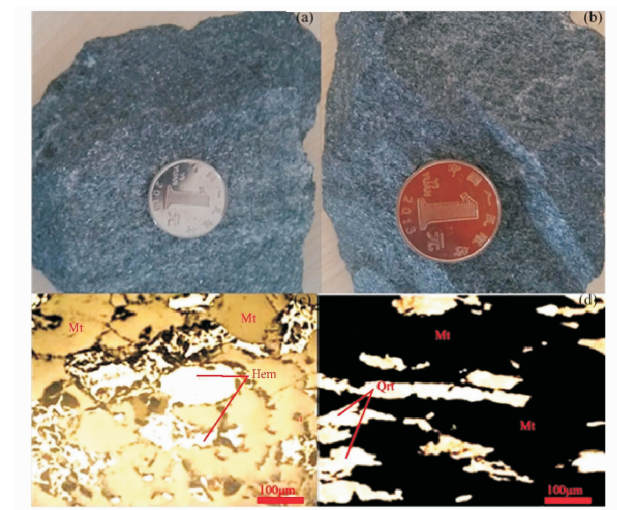


图 3 周油坊铁矿床镜铁矿(a,c)、磁铁矿(b,d)手标本及镜下特征

Fig. 3 Hand specimens and microscopic characteristics of specularite(a, c)and magnetite(b,d) in the Zhouyoufang iron deposit
Mt-磁铁矿;Hem-镜铁矿;Qrt-石英

3 地球化学特征

研究测试的 12 件样品均采自周油坊铁矿区坑道。TK-01、DLY-01、YM-01、YM-02 采自-350 中段南 11P 号穿脉,TK-02、TK-03、DLY-02、YM-03 采自-410 中段南 11R 号穿脉,TK-04、DLY-03、DLY-04、YM-04 采自-470 中段南 11P 号穿脉(图 2 中 0 号勘探线附近,各中段地质平面图略)。样品均较新鲜,无明显风化和细脉充填现象。

3.1 矿石地球化学特征

矿石样品主量元素和稀土元素地球化学分析结果见表 1。富铁矿石(TK-03、TK-04)含铁量平均为 85.52%,远高于石英型铁矿石(TK-01)的含铁量(29.82%)和闪石型铁矿石(TK-02)的含铁量(44.76%)。

表 1 周油坊铁矿床铁矿石的主量元素(%)
和稀土元素(×10⁻⁶)分析结果

Table 1 Major elements (%)and REE compositions (×10 ⁻⁶) of iron ores in the Zhouyoufang iron deposit				
样品号	TK-01	TK-02	TK-03	TK-04
样品深度/m	348.70	408.50	409.20	468.70
样品名称	石英型 铁矿石	闪石型 铁矿石	富铁矿石	
SiO ₂	61.06	39.64	6.73	4.12
TiO ₂	0.15	0.20	0.28	0.21
Al ₂ O ₃	2.84	3.97	6.36	3.31
Fe ₂ O ₃ ^T	29.82	44.76	83.97	87.07
MnO	0.05	0.19	0.04	0.04
MgO	1.47	5.15	2.86	1.39
CaO	0.90	1.72	0.75	0.78
Na ₂ O	—	—	0.01	0.01
K ₂ O	0.03	0.03	—	0.02
P ₂ O ₅	0.05	0.08	0.06	0.06
LOI	3.55	4.29	-0.90	2.97
Total	99.93	100.04	100.17	99.98
La	1.55	1.32	0.50	1.02
Ce	2.75	2.51	0.83	2.05
Pr	0.27	0.25	0.10	0.21
Nd	1.00	0.90	0.40	0.80
Sm	0.17	0.16	0.11	0.15
Eu	0.11	0.11	0.08	0.09
Gd	0.16	0.16	0.14	0.16
Tb	0.03	0.03	0.02	0.02
Dy	0.13	0.14	0.13	0.13
Ho	0.03	0.03	0.03	0.03
Er	0.10	0.10	0.10	0.10
Tm	0.02	0.02	0.02	0.01
Yb	0.09	0.10	0.09	0.09
Lu	0.02	0.02	0.02	0.01
Y	1.40	1.50	1.45	1.36
ΣREE	6.38	5.81	2.55	4.87
LREE	5.84	5.24	2.01	4.32
HREE	0.55	0.57	0.54	0.55
LREE/HREE	10.71	9.18	3.76	7.79
La/La*	1.31	1.15	1.51	1.18
Ce/Ce*	0.98	1.01	0.87	1.03
Pr/Pr*	0.94	0.96	0.97	0.94
Eu/Eu*	3.09	3.18	3.03	2.78
Y/Y*	2.00	1.88	1.85	1.76
Y/Ho	47.50	50.00	48.33	47.50
(La/Yb) _{PAAS}	1.27	1.03	0.41	0.86

注:样品化学分析经中国地质大学(北京)地学实验中心测试完成,主量元素利用 ICP-AES 法进行测试,RSD<2%,微量元素(含稀土元素)利用 ICP-MS 法进行测试,RSD<3%;"—"代表未测出;标准化值据文献[12],下同。

矿石 SiO_2 含量为 4.12%~61.06%,平均 27.89%,其在铁矿石中的含量与 $\text{Fe}_2\text{O}_3^\text{T}$ 呈负相关(图略), SiO_2 与 $\text{Fe}_2\text{O}_3^\text{T}$ 含量之和占铁矿石 90%以上。

石英型铁矿石稀土元素总量($\Sigma\text{REE}+\text{Y}$)为 7.78×10^{-6} ,闪石型铁矿石的稀土总量($\Sigma\text{REE}+\text{Y}$)为 7.31×10^{-6} ,与石英型铁矿石稀土总量接近。富铁矿石(TK-03)和富铁矿石(TK-04)的稀土总量($\Sigma\text{REE}+\text{Y}$)分别为 4.00×10^{-6} 和 6.23×10^{-6} 。表 1 中异常值算法见文献[13],用 Post Archean Australian Shale(简称 PAAS)[12] 对以上四类铁矿石的稀土元素进行标准化处理(图 4a),发现铁矿石样品稀土元素特征相似,稀土总量较低(平均值 6.33×10^{-6}),LREE 含量平均为 4.35×10^{-6} ,HREE 含量平均为 0.55×10^{-6} ,LREE 相对富集,HREE 相对亏损,LREE/HREE 为 3.76~10.71,平均 7.86,分馏明显;La 正异常($\text{La}/\text{La}^*=1.15\sim 1.51$),Eu 正异常($\text{Eu}/\text{Eu}^*=2.78\sim 3.18$)和 Y 正异常($\text{Y}/\text{Y}^*=1.76\sim 2.00$),Y/Ho 为 47.50~50.00,平均 48.33。这种稀土总量较低、Eu 与 Y 呈正异常及 Y/Ho 较高的特征与其他地区的 BIF 具有相似性[14-15]。

3.2 围岩地球化学特征

围岩(大理岩和石英云母片岩)的主量、稀土和微量元素测试结果见表 2。大理岩(DLY-01、DLY-02、DLY-03、DLY-04)的 SiO_2 平均为 6.10%, Al_2O_3 平均为 0.42%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^\text{T}$ 平均 0.65%,CaO 和 MgO 平均为 49.98%,明显高于其他氧化物,(CaO+MgO)/LOI 平均为 1.21,且镁质较高,显示方解石和白云石(较方解石多)为大理岩的主要组分,为白云质大理岩。大理岩的稀土元素总量($\Sigma\text{REE}+\text{Y}$)为 $(11.06\sim 13.90)\times 10^{-6}$,平均为 12.39×10^{-6} ,LREE 平均为 10.09×10^{-6} ,HREE 平均为 0.78×10^{-6} ,LREE/HREE 为 11.33~14.97,平均为 12.97; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{PAAS}}$ 为 1.38~2.33,平均为 1.76,显示 LREE 具有稍富集的右倾型特征(图 4b); Eu/Eu^* 为 1.16~1.76,平均为 1.48; Ce/Ce^* 为 1.03~1.07,平均为 1.05;Y/Ho 为 31.25~40.00,平均为 36.69。

石英云母片岩(YM-01、YM-02、YM-03、YM-04) SiO_2 平均为 65.56%; Al_2O_3 平均为 14.52%; $\text{Fe}_2\text{O}_3^\text{T}$ 平均为 9.17%;MgO 平均为 1.96%,高于 CaO(平均为 1.35%); K_2O (平均为 3.15%)明显高于 Na_2O (平均为 1.13%);其他氧化物含量较低。石英云母片岩的稀土元素总量($\Sigma\text{REE}+\text{Y}$)为 $(114.38\sim 138.69)\times 10^{-6}$,平均 125.62×10^{-6} ,

LREE 平均为 112.90×10^{-6} ,HREE 平均为 5.70×10^{-6} ,LREE/HREE 为 16.93~22.18; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{PAAS}}$ 为 2.20~3.26,平均为 2.84,显示 LREE 具有富集的右倾型特征(图 4c); Eu/Eu^* 为 1.44~1.70,平均为 1.58; Ce/Ce^* 平均为 0.98,Ce 异常不明显;Y/Ho 为 25.94~28.33,平均为 26.95。

4 讨论

4.1 成矿物质来源

铁矿石中 Al_2O_3 (2.84%~6.36%)高于鞍本地区铁矿石的 Al_2O_3 (0.09%~1.80%)[1],指示周油坊铁矿较鞍本地区有更多陆源碎屑物质加入,但总体含量仍较低,说明加入的碎屑物质有限。

Eu 的正异常可指示海底热液活动,这与现代“黑烟囱”型高温海底热液的 Eu 正异常表现一致[16-18],Klein(2005)[1] 与 Kato et al. (2006)[19] 认为 Eu 的正异常程度与海水中释放的高温热液多少有关。图 4a 中四类铁矿石 Eu 正异常明显,表明周油坊铁矿在成矿作用过程中有较多的高温热液输入。 Y^{3+} 和 Ho^{3+} 离子半径虽相近,但由于各自表层络合能力的差异导致海水中 Ho 的沉淀速率高出 Y 近 1 倍,据此,Y/Ho 可反演太古代海洋沉积环境[20-21],研究区铁矿石 Y/Ho(表 1)均大于上地壳 Y/Ho 平均值 27[22],介于海水的 Y/Ho(44~74)之间[13,17],说明周油坊铁矿形成于海水与高温热液的混合(其中海水贡献略大),属于海洋化学沉积。大理岩的 Y/Ho 为 31.25~40.00,介于陆源碎屑 Y/Ho(26)和古元古代表层海水 Y/Ho 的下限值(44)之间,其主要物质来源既不是单一的陆源碎屑,也不同于海水,可能与海底热液有关。结合铁矿石具有较高的 Eu 异常峰值,成矿与火山作用有关,所以混合了海底火山热液的高温海水是周油坊铁矿床的主要成矿物质来源。分散在矿源层的流体及其他物质来源对成矿物质来源贡献,需要通过同位素年代学进一步研究。

4.2 铁矿石 REE 示踪

成矿作用过程中对 Ce 的差异性氧化作用及 Ce 富集在含磁铁矿石云母片岩中的 LREE 含量较大(含磁铁矿石云母片岩 Ce 平均值 55.03×10^{-6} ,高于铁矿石 Ce 平均值 2.04×10^{-6}),使其 LREE/HREE(平均值 20.10)高于大理岩的 LREE/HREE(平均值 12.97)和铁矿石的 LREE/HREE(平均值 7.86)。Ce 含量变化及 LREE/HREE 由铁矿石—含磁铁矿石云母片岩增高的趋势可代表氧化程度的增强,有利于含磁铁矿石云母片岩在铁质析出过程

表 2 周油坊铁矿床大理岩、含磁铁石英云母片岩主量元素(%)、稀土元素和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 2 Major element(%),REE and trace element($\times 10^{-6}$) contents of marble and magnetite-bearing quartz-mica schist in the Zhouyoufang iron deposit

样品号	DLY-01	DLY-02	DLY-03	DLY-04	YM-01	YM-02	YM-03	YM-04
样品深度	349.00	408.30	469.20	468.60	349.20	348.40	408.30	468.70
样品名称	大理岩				含磁铁石英云母片岩			
SiO ₂	4.63	5.52	4.83	9.41	70.92	62.80	64.10	64.41
TiO ₂	0.01	0.02	—	0.01	0.33	0.52	0.41	0.44
Al ₂ O ₃	0.35	0.50	0.24	0.61	12.16	15.87	14.48	15.58
Fe ₂ O ₃ ^T	0.51	0.82	0.31	0.97	8.87	9.33	10.32	8.14
MnO	0.02	0.04	0.01	0.02	0.13	0.13	0.15	0.10
MgO	20.96	20.65	21.14	24.73	1.86	2.18	1.17	2.65
CaO	28.85	28.66	28.91	26.02	0.36	1.47	2.18	1.38
Na ₂ O	—	0.01	0.01	0.04	0.10	1.87	1.07	1.50
K ₂ O	0.19	0.26	0.13	0.16	3.29	3.32	2.83	3.17
P ₂ O ₅	0.07	0.01	0.14	0.03	0.09	0.15	0.10	0.13
LOI	43.08	42.15	43.10	36.80	1.79	2.19	2.73	2.13
Total	98.66	98.60	98.80	98.80	99.89	99.83	99.52	99.63
La	2.66	2.05	3.15	2.40	30.13	27.39	30.15	28.28
Ce	5.15	4.47	5.75	4.61	55.89	50.46	59.48	54.31
Pr	0.47	0.45	0.50	0.44	5.65	5.08	6.37	5.76
Nd	1.72	1.70	1.75	1.60	18.53	16.91	22.20	19.87
Sm	0.30	0.32	0.28	0.28	2.70	2.58	3.49	3.10
Eu	0.08	0.07	0.10	0.09	0.81	0.70	0.91	0.88
Gd	0.23	0.22	0.23	0.24	1.83	1.80	2.54	2.03
Tb	0.04	0.04	0.04	0.04	0.23	0.23	0.34	0.26
Dy	0.20	0.21	0.21	0.21	1.21	1.25	1.81	1.38
Ho	0.04	0.04	0.04	0.05	0.23	0.23	0.33	0.25
Er	0.12	0.12	0.13	0.14	0.66	0.64	0.92	0.67
Tm	0.01	0.02	0.02	0.02	0.10	0.09	0.14	0.10
Yb	0.10	0.11	0.10	0.13	0.76	0.68	1.01	0.64
Lu	0.01	0.02	0.02	0.02	0.11	0.10	0.15	0.09
Y	1.42	1.25	1.60	1.80	6.45	6.25	8.87	6.55
ΣREE	11.13	9.81	12.30	10.24	118.82	108.13	129.82	117.59
LREE	10.38	9.05	11.53	9.41	113.70	103.11	122.59	112.18
HREE	0.75	0.77	0.77	0.83	5.13	5.02	7.24	5.42
LREE/HREE	13.76	11.82	14.97	11.33	22.18	20.56	16.93	20.72
Ce/Ce [*]	1.05	1.07	1.04	1.03	0.98	0.98	0.99	0.98
Eu/Eu [*]	1.45	1.16	1.76	1.56	1.70	1.53	1.44	1.64
Y/Y [*]	1.27	1.10	1.41	1.48	0.98	0.92	0.91	0.88
Y/Ho	35.50	31.25	40.00	40.00	28.33	26.86	26.68	25.94
(La/Yb) _{PAAS}	1.93	1.38	2.33	1.42	2.93	2.97	2.20	3.26
(La/Ce) _{PAAS}	1.08	0.96	1.14	1.09	1.12	1.13	1.06	1.08
V	5.20	4.00	6.00	11.50	46.84	45.03	90.40	65.07
Rb	6.10	5.35	5.45	8.45	112.38	91.38	104.38	98.88
Sr	59.38	65.15	56.65	43.85	46.43	42.13	268.03	236.53
Zr	2.48	3.45	1.75	3.00	78.03	55.66	71.78	50.44
Nb	0.34	0.45	0.25	0.55	3.97	3.78	4.21	4.00
Cs	0.47	0.46	0.42	0.64	3.38	2.35	4.03	4.45
Ba	14.00	20.00	10.00	15.00	472.00	429.50	884.00	1019.50
Hf	0.08	0.10	0.05	0.10	2.06	1.45	1.96	1.39
Ta	—	—	—	0.03	0.32	0.31	0.32	0.30
Pb	2.90	3.05	2.90	18.85	11.29	22.17	24.09	9.76
Th	0.36	0.50	0.25	0.40	10.54	10.28	8.70	7.90
U	1.74	1.10	2.40	1.05	4.08	3.16	3.18	4.41

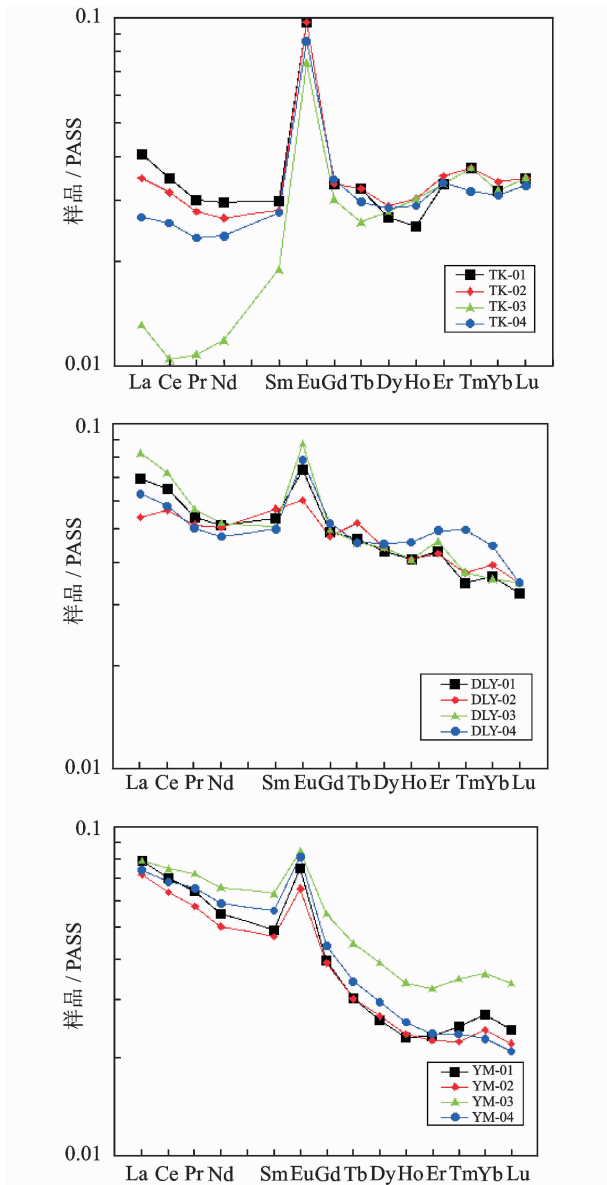


图 4 周油坊铁矿的铁矿石(a)、大理岩(b)和含磁铁矿石英云母片岩(c)稀土元素 PAAS 标准化配分图^[12]

Fig. 4 PAAS-normalized REE patterns of iron ores (a), marble (b) and magnetite-bearing quartz-mica schist(c) in the Zhouyoufang iron deposit

中对 LREE 的吸附。周油坊铁矿石 LREE 相对富集、HREE 相对亏损的特征与其他 BIF 型铁矿石的 LREE 亏损、HREE 富集特征的反差,可能是铁质沉淀析出过程中由于氧化程度的差异导致 LREE 差异性吸附的缘故。生物媒介的氧化是影响铁质沉淀析出的主要因素之一^[23-24],陆源碎屑和生物是影响 LREE 分布的主要因素。如前文所述,陆源碎屑物质加入稍有差异,结合研究区含铁建造中曾多次发现微体化石及线状石墨^①,说明岩石形成时有有机物参与,可能在有足够铁质来源的条件下使铁参

与铁硅溶液,推测研究区 LREE 这种特殊的 REE 分配型式可能是相对于其他 BIF 有更多陆源物质输入及生物氧化作用引起。

4.3 成矿古地理环境

含磁铁矿石英云母片岩的稀土元素配分型式显示,HREE 与 LREE 具有明显分馏的右倾特征(图 4c)。LREE 的富集或亏损程度可指示沉积环境,形成于深海平原、洋中脊的岩石几乎不受陆源物质的影响而表现出 LREE 亏损,形成于靠近大陆边缘的岩石受陆源物质的影响较大而表现出 LREE 富集^[30]。周油坊铁矿床应形成于边缘海环境。当变质程度低于角闪岩相时,REE 不发生明显迁移^[31],所以含磁铁矿石英云母片岩 REE 配分模式与大理岩较吻合,应是继承了原岩的 REE 特征,根据含磁铁矿石英云母片岩的稀土元素原岩恢复图解判别其原岩应为粘土岩(图 5),由构造环境判别图(图 6)可知,含磁铁矿石英云母片岩具有大陆边缘与大洋岛弧的双重特征,表明周油坊矿床形成于介于大洋岛弧与大陆之间的弧后陆前盆地。

由于受沉积建造控制,研究区含矿岩系与大理岩关系密切,周油坊矿床大理岩高场强元素 Zr、Ta、Th 和 U 含量低(表 2),表明其主要物质来源为海相沉积。Ce/Ce* 可灵敏地反应沉积环境变化^[32],铁矿石 Ce/Ce* (0.87~1.03) 低于大理岩 Ce/Ce* (1.03~1.07),表明以白云石大理岩为矿体顶板的矿石建造原始环境为相对还原的海相沉积。

Ce 对氧化、还原条件的改变反应较敏感^[32-33],溶解在海水中的 Ce³⁺ 在氧化环境下形成难溶的 Ce⁴⁺ 导致水体 Ce 亏损,Ce 的负异常通常指示水体属氧化环境^[34-35]。如图 7 所示,铁矿石未落入 Ce 异常区,Ce 负异常缺失,显示沉积环境为低氧逸度或缺氧的还原海洋,这与前人对早前寒武纪属缺氧环境的研究一致^[15,36],为海水中大量富集 Fe²⁺ 提供有利条件,为后续 BIF 沉淀提供物质基础。

综上,周油坊铁矿床应形成于介于大洋岛弧与大陆之间有陆源物质输入的弧后陆前还原海洋环境。

4.4 富铁矿成因

周油坊铁矿床富铁矿局部赋存于贫铁矿层中,富铁矿单层厚度 1.5~2.5 m,分布不连续,目前尚未发现独立富矿层,但探讨贫铁矿石中富铁矿石的成因具有现实意义。

稀土元素特征显示铁矿石具备海水和热液的特征,富铁矿石(TK-03、TK-04)的稀土元素总量和

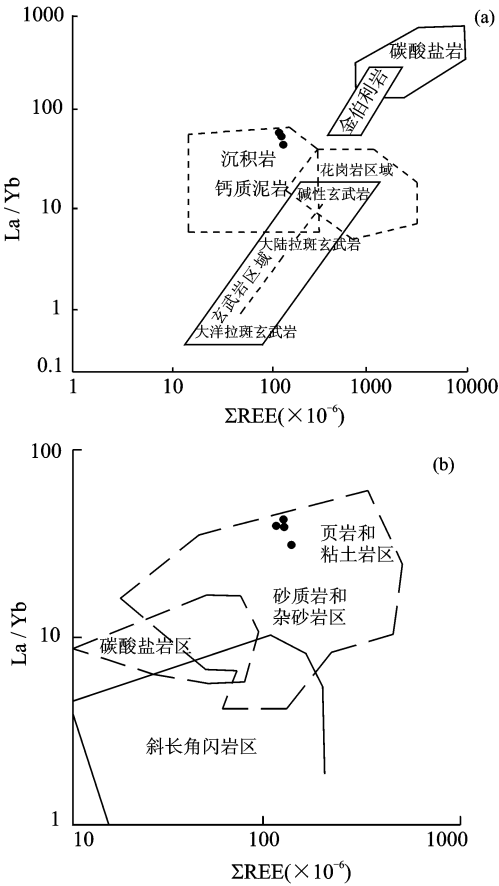


图 5 含磁铁矿石云母片岩稀土元素原岩恢复图^[25-26]
Fig. 5 REE protolith reconstruction diagrams of magnetite-bearing quartz-mica schist

Eu 含量低于其他贫铁矿石 (TK-01、TK-02), 经 PAAS 标准化后 (图 4a) 未显示出富铁矿石 LREE 比其他贫铁矿石更富集, Eu 异常也基本一致, 说明热液对周油坊富铁矿的成因贡献不大。富铁矿与贫铁矿相比, 除 Fe_2O_3^T 含量显著增加, SiO_2 含量显著减少外, 其他元素基本一致, 说明贫铁矿和富铁矿经历了同沉积、同进化的地质作用过程。周油坊富铁矿与贫铁矿伴生, 呈透镜状、薄层状夹于贫矿层中, 产状一致, 二者之间呈渐变关系, 富铁矿带状构造不明显, 呈块状构造, 富矿围岩也无明显热液蚀变现象, 这与地质事实相符, 也间接证明贫铁矿、富铁矿是同一沉积环境下的产物, 经历了相同的地质演化过程。综上, 初步认为周油坊富铁矿应为原始沉积变质型富铁矿。

5 结 论

周油坊铁矿矿石和围岩地球化学特征表明, 该矿床成矿物质来源可能为混合了海底火山热液的较高温海水, 形成于大洋岛弧与大陆之间有陆源物质输入的弧后陆前还原海洋环境。热液对周油坊富铁

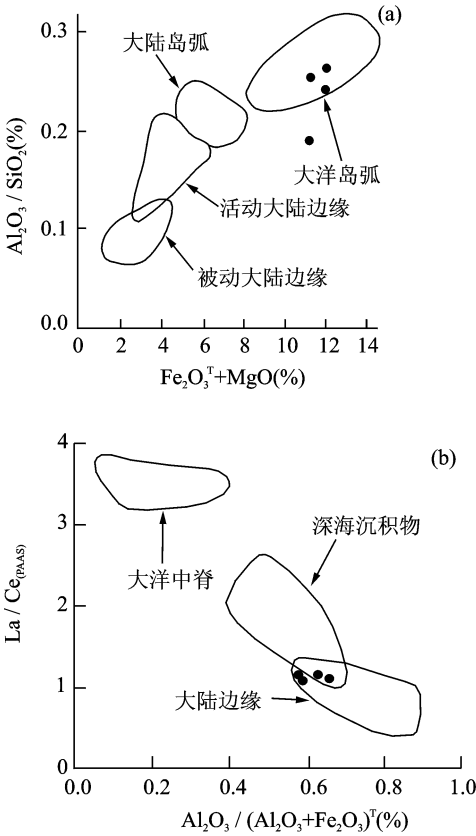


图 6 含磁铁矿石云母片岩构造环境判别图^[27-28]
Fig. 6 Tectonic setting discrimination diagrams of magnetite-bearing quartz-mica schist

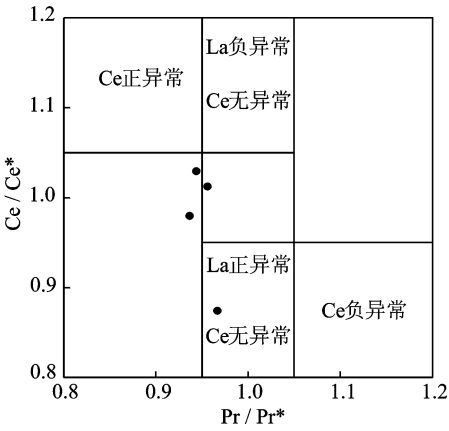


图 7 周油坊铁矿石 Ce/Ce* -Pr/Pr* 判别图^[29]
Fig. 7 Ce/Ce* vs. Pr/Pr* discrimination diagram of iron ores from the Zhouyoufang iron deposit

矿的成因贡献不大, 贫铁矿、富铁矿属同一沉积环境下的产物, 造成铁质富集的因素可能与原始沉积建造或沉积时铁质供给有关, 周油坊富铁矿为原始沉积变质型富铁矿。

注释

① 安徽省地质矿产勘查局 313 地质队, 安徽省霍邱县周油

坊铁矿勘探地质报告(内部资料). 2009.

参考文献

- [1] Klein C. Some precambrian banded iron — formations (BIFs) from around the world: their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origins[J]. *American Mineralogist*, 2005, 90(10): 1473-1499.
- [2] Gross G A. A classification of iron formation based on depositional environments[J]. *Canadian Mineralogist*, 1980, 18(2): 215-222.
- [3] 沈福农, 炎金才, 于凤池, 等. 皖西霍邱群地层层序与变质作用[J]. *西北大学学报*, 1982, (特刊): 84-98.
- [4] 岳元珍. 霍邱群的矿物特征及其变质作用[J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 1982, 3(3): 1-29.
- [5] 亓润章, 姚光炎. 论霍邱群变质作用特征[J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 1982, 3(3): 30-46.
- [6] 亓润章. 霍邱群 BIF 成因讨论[J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 1987, 8(1): 1-20.
- [7] WAN Yusheng, DONG Chunyan, WANG Wei, et al. Archean basement and a paleoproterozoic collision orogen in the huogiu area at the southeastern margin of North China craton: evidence from sensitive high resolution ion Micro-Probe U-Pb zircon geochronology[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2010, 84(1): 91-104.
- [8] 杨晓勇, 王波华, 杜贞保, 等. 论华北克拉通南缘霍邱群变质作用、形成时代及霍邱 BIF 铁矿成矿机制[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11): 3476-3496.
- [9] 黄华, 张连昌, 刘显凡, 等. 霍邱矿田李老庄铁矿地质与地球化学特征及对沉积环境的指示[J]. *岩石学报*, 2013, 29(7): 2593-2605.
- [10] 刘磊, 杨晓勇. 安徽霍邱 BIF 铁矿地球化学特征及其成矿意义: 以班台子和周油坊矿床为例[J]. *岩石学报*, 2013, 29(7): 2551-2566.
- [11] 尹青青, 丁杨, 徐林松, 等. 安徽霍邱重新集铁矿地质特征及找矿预测[J]. *资源调查与环境*, 2013, 34(2): 122-126.
- [12] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1989, 21(1): 169-200.
- [13] Bolhar R, Kamber B S, Moorbath S, et al. Characterisation of early Archaean chemical sediments by trace element signatures[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(1): 43-60.
- [14] Spier C A, Oliveira S, Siala N, et al. Geochemistry and Genesis of the banded Iron formations of the Caue Formation, Quadrilatero Ferriero, Minas Gerais, Brazil[J]. *Precambrian Research*, 2007, 152(3/4): 170-206.
- [15] Planavsky N, Bekker A, Rouxel O J, et al. Rare earth element and Yttrium compositions of archaean and paleoproterozoic Fe formations revisited: new perspectives on the significance and mechanisms of deposition[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(22): 6387-6405.
- [16] Danielson A, Möller P, Dulski P. The Europium anomalies in banded Iron formations and the thermal history of the oceanic crust[J]. *Chemical Geology*, 1992, 97(1/2): 89-100.
- [17] Bau M, Dulski P. 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*, 1999, 155(1/2): 77-90.
- [18] Douville E, Bienvenu P, Charlou J L, et al. Yttrium and rare earth elements in fluids from various deep-sea hydrothermal systems[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(5): 627-643.
- [19] Kato Y, Yamaguchi K E, Ohmoto H. Rare earth elements in Precambrian banded iron formations: Secular changes of Ce and Eu anomalies and evolution of atmospheric oxygen[C]// In GAS Memoir 198: evolution of earth's atmosphere, hydrosphere, and biosphere-constrains from ore deposits. Edited by kesler S E, ohmoto H. The Geological Society of American, Boulder, colo, 2006: 269-289.
- [20] Nozaki Y, ZHANG Jing, Amakawa H. The fractionation between Y and Ho in the Marine environment[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1/2): 329-340.
- [21] Lawrence M G, Greig A, Collerson K D, et al. Direct quantification of rare earth element concentrations in natural waters by ICP-MS[J]. *Applied Geochemistry*, 2006, 21(5): 839-848.
- [22] Byrne R H, Lee J H. Comparative Yttrium and rare earth element chemistries in seawater[J]. *Marine Chemistry*, 1993, 44(2/4): 121-130.
- [23] Widdel F, Schnell S, Heising S, et al. Ferrous Iron oxidation by anoxygenic phototrophic bacteria[J]. *Nature*, 1993, 362(6423): 834-836.
- [24] Kappler A, Pasquero C, Konhauser K O, et al. Deposition of banded Iron formations by anoxygenic phototrophic Fe (II)-oxidizing bacteria[J]. *Geology*, 2005, 33(11): 865-868.
- [25] Bhatia, R M. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 1983, (2): 611-627.
- [26] Murray, W R. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications[J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3):

213-232.

[27] Allegre C J, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 38(1): 1-25.

[28] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 65-66.

[29] Bau M, Dulski P. Distribution of Yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa[J]. Precambrian Research, 1996, 79(1): 37-55.

[30] Armstrong H A, Owen A W, Floyd J D. Rare earth geochemistry of Arenig cherts from the Ballantrae Ophiolite and Leadhills Imbricate Zone, southern Scotland: implications for origin and significance to the Caledonian Orogeny[J]. Journal of the Geological Society, 1999, 156(3): 549-560.

[31] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 284-285.

[32] Sholkovitz E R, Landing W M, Lewis B L. Ocean particle chemistry: The fractionation of rare earth elements between suspended particles and seawater[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1994, 58(6): 1567-1579.

[33] Bau M, Dulski P, Moller P. Yttrium and Holmium in South pacific seawater: vertical distribution and possible fractionation mechanisms[J]. Oceanographic Literature Review, 1995, 11(1): 1-15.

[34] Nozaki Y, Alibo D S, Amakawa H, et al. Dissolved rare earth elements and hydrography in the Sulu Sea [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1999, 63(15): 2171-2181.

[35] Alibo D S, Nozaki Y. Rare earth elements in seawater: Particle association, shale-normalization, and Ce oxidation[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1999, 63(3/4): 363-372.

[36] Bekker A, Slack J F, Planavsky N, et al. Iron formation: the sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes[J]. Economic Geology, 2010, 105(3): 467-508.

Geochemical characteristics and genesis of the Zhouyoufang iron deposit in Huoqiu County, western Anhui Province

PAN Xian-min¹, YANG Qiang², LUO Tong³

(1 No. 916 Geological Party, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Exploration, Jiujiang 332100, China)

(2 No. 311 Geological Party, Anhui Bureau of Geology and Mineral Exploration, Anqing 246000, China)

(3 Haizi Coal Mine Huaibei Mining Group Co., Ltd. Huaibei 235000, China)

Abstract: The Zhouyoufang iron deposit in the central part of the Huqiu iron orefield of western Anhui Province is tectonically located in the southern margin of North China platform, with ore-bearing strata developed in the upper part of the Neo-Archaean metamorphic series. Its iron-bearing minerals include specularite and magnetite. The study discussed the ore-forming material sources, metallogenic paleogeographic environment and genesis of the deposit through studying of the geochemical characteristics for ores and county rocks. The results show that the main ore-forming material sources of the Zhouyoufang iron deposit derived mainly from the high temperature seawater mixed with submarine volcanic hydrothermal and the deposit formed in a reducing marine environment of back-arc and foreland between oceanic island arc and continent. It can be preliminarily concluded that the deposit was a primary sedimentogenic metamorphic iron-rich deposit.

Key words: iron deposit; iron-rich ore; geochemical characteristics; Zhouyoufang; Huoqiu County

