

闽粤地区海底热液喷气成因 铁矿床的地球化学特征

王守伦 刘其严 张殿学 李宏臣^①

提 要 通过对闽粤地区震旦系、寒武系、泥盆系和石炭—二叠系四个含铁层位中铁矿床的矿石和自生沉积岩的研究认为,它们同属海底热液喷溢产物。初步建立了它们的地球化学标型特征:铁矿石组分 $\text{TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ 呈正相关、 Co/Ni 比值和 Ge 、 Cl 、 F 含量均高;铁矿石和自生沉积岩均属低铝-钾-磷型;硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 为 $-0.5\text{‰} \sim 0.4\text{‰}$;铁矿石的 ΣREE 为 $3.04 \sim 61.84\text{ppm}$,轻、重稀土分馏不明显,层状热液沉积岩的 ΣREE 为 $120.18 \sim 551.88\text{ppm}$,轻、重稀土分馏明显,两者 Ce 亏损不明显、 Eu 具弱的正或负异常;铁矿石的残留硅条带中包体均一温度为 $165 \sim 355^\circ\text{C}$ 。

关键词 地球化学 自生沉积物 沉积-喷气成矿作用 硅同位素

闽粤地区铁矿床分布广,多为中、小型,个别大型。这些矿床多具有沉积作用和热液作用双重性,表现在矿床的成层性、层控性和矿体在含矿层内的穿层性以及“热液蚀变”。因此对矿床的成因认识很不一致,概括起来有四种观点:(1)传统的矽卡岩观点,强调后期岩浆的作用和穿层性,同一矿床可以同时出现在上部灰岩和下部砂岩中^[1];(2)火山热液沉积观点,认为成矿物质来源于中酸性-基性火山岩^[2];(3)火山热泉沉积观点^[3],认为成矿溶液主要来自海水或地下水的海底热液循环和淋滤作用,海水循环作用的热源是火山活动高热区;(4)沉积改造观点,主要针对前泥盆系中的矿床,将矿层中出现的自生沉积物归因于后期变质改造。

1 铁矿床的一般地质特征

闽粤地区铁矿具有沉积喷气成矿作用^[4]特征。

(1)矿床具有上部层状相和下部交叉相双层结构,或称“T”字型构造。层状相由条带状或条纹状硅铁建造等成层自生沉积物构成;交叉相由角砾状、网脉状矿(岩)石构成,除铁矿外有时出现多金属硫化物网脉状矿化。如大宝山、银顶格等矿床。

^① 本文执笔者

(2) 闽粤地区铁矿床主要沿北东向古断裂带分布。福建地区的政和-大埔断裂带上分布有马坑、潘田、洛阳、阳山及银顶格等矿床;广东地区的吴川-四会断裂带上分布有地豆岗、大降坪、红岩、单竹坑、大宝山等矿床;怀集-郴州断裂带上分布有藤铁、将军头等矿床。这些继承性古断裂带均分布在古陆和水下降起边缘,由于它们的长期活动形成了闽粤地区自元古代以来的前述四个不同时代的含铁层位。

(3) 闽粤地区与层状相硅铁建造伴生的有三种海底成层自生沉积岩(Srtatafer^①):①硅质岩。以石英为主,常被划为石英岩或石英砂岩;②钙硅质岩。以透闪石、透辉石为主,伴有石榴子石等,这种组合常被误认为是矽卡岩化产物,故有人定为“层间矽卡岩”、“类矽卡岩”及“不受后期岩浆岩控制的矽卡岩”;③碱硅质岩。由长石和石英的微纹带组成,除个别矿床中以长石为主的被鉴定为热水沉积岩外,一般均被认为是粉砂岩。这三类岩石,经过研究均为热液喷溢沉积的产物,即属自生沉积岩,它们是矿床产自海底热液的标志和佐证。

2 化学成分和微量元素

2.1 铁矿石的化学成分和微量元素

(1) 充分水解或海解后形成的岩石或矿石,都存在着很好的 $TiO_2 = a + bAl_2O_3$ 的线性^[2]关系。相反,接触交代型铁矿的 TiO_2 和 Al_2O_3 之间则无上述关系,或是反相关。选用马坑铁矿的22个样品^[2]和研究区其它矿床的10个样品(无矽卡岩化叠加干扰者),分别作图(图1、图2),显示出单一铁矿床或全区铁矿床的 Ti 和 Al 之间存在正相关关系,相关系数为0.802,表明该区铁矿石是从海水中以沉积方式形成的。

(2) 陆源沉积型铁矿通常富 Al_2O_3 、 K_2O 和 P_2O_5 ,其含量分别为4.07%、0.6%~1.34%和0.46%;而本区铁矿石(不含矽卡岩化铁矿石) Al_2O_3 为0.01%~3.07%、平均0.9%, K_2O 为0.02%~0.75%,平均0.034%,属于低 Al_2O_3 、 K_2O 和 P_2O_5 类型,明显区别于陆源沉积型铁矿。

(3) 热液沉积型铁矿中 V 的含量变化于0.001%~0.005%,而陆源沉积型铁矿中 V 的含量(据王文斌,1981),平均变化于0.0244%~0.0364%;Ti 在陆源沉积型铁矿中往往具稳定的低值,在热液沉积型铁矿中则变化较大。Ti/V 比值(据 H·A·普拉克辛科),在陆源硅铁页岩建造中为1.33~10.9,而在火山沉积的硅铁建造中为25~85。本区铁矿的 Ti/V (Ti 的原始数据从略)比值为19~361.66,具有热液沉积型铁矿特征(表1)。

(4) 热卤水沉积物的 Co/Ni 比值约为2.5,而正常沉积物中 Co/Ni 比值则为0.5左右^[5]。本区大多数铁矿石的 Co/Ni 比值(表1、表2)大于或接近于2.5,具有热卤水沉积物或热液沉积的特征;少量铁矿的 Co/Ni 比值接近0.5,代表了远离热液喷口区或海水混合作用增强的沉积环境。

另外,黄铁矿中的 Co/Ni 比值大于1指示热液成因(Hegemann, 1943)。本区铁矿石中黄铁矿(或磁黄铁矿)中 Co/Ni 比值为2.4~12.3,反映出本区铁矿石的热液生成环境。

① G·A·Gross, 1988

表1 铁矿石的有关微量元素含量

Table 1 Microelements of Fe-Ores

顺序号	原编号	样品名称	地点及层位	微量元素(ppm)			
				V	Co	Ni	Ge
1	G90-28	块状赤铁矿	林湾,Z ₂	32	30	9	11
2	G90-67	条带状磁铁矿	四村,εbc ^b	59	25	32	1
3	G90-103	块状磁铁矿	洽水天堂顶,εbc ^b	49	12	5	3
4	G90-78		藤铁,D ₂ y-D ₂ d	51	46	9	5
5	G90-60	似条带状假象赤铁矿	将军头,D ₂ y-D ₂ d	71	7	8	15
6	G90-87	条带状磁铁矿	灰塘,D ₂ y-D ₂ d	22	28	8	11
7	G90-14	假象赤铁矿磁铁矿	芒饿岭,D ₃ sh	36	41	7	3
8	G90-43	赤铁矿化块状磁铁矿	地豆岗,D ₃ sh	3	17	3	3
9	G90-4	含黄铁矿磁铁矿	黑石岭,D ₃ sh	43	60	8	5
10	G90-159	条带状透闪石磁铁矿	铁山嶂,D ₃	10	26	5	6
11	潘-136	条带状石英磁铁矿	潘田,C ₁ l-P ₁	3	6	6	2.5
12	F89-66	含双透岩条带状磁铁矿	德化阳山, C ₁ l-P ₁	32	110	32	9
13	F89-72	透镜状透辉石磁铁矿		32	43	22	6
14	F91-173	赤铁矿	银顶格, C ₁ l-P ₁	3	16	7	1.9
15	F89-42	块状磁铁矿		15	79	30	9
16	F89-40	纹带状含铁透辉石砂卡岩		14	28	18	12
17	F91-166	层状褐铁矿		3	1	3	5
18	F89-14	铁质钙硅质岩	中甲,C ₁ -P ₁	15	18	9	16

表2 铁矿石的 Co、Ni 比值

Table 2 Co/Ni values of Fe-ores

编 号	Co/Ni	编 号	Co/Ni	编 号	Co/Ni	编 号	Co/Ni	编 号	Co/Ni
G90-28	3.3	G90-14	5.9	F89-72	2.0	G91-120	5.0	F89-44*	6.1
G90-67	0.8	G90-43	5.7	F91-173	2.3	马 坑	6	F89-33*	4.7
G90-103	2.4	G90-4	7.5	F89-12	2.6	阳 山	4.1	G90-60*	12.3
G90-78	5.1	G90-159	5.2	F89-40	1.6	洛 阳	3.5	F89-42*	2.4
G90-60	0.9	潘田-136	1.0	F91-166	0.3	G90-15*	9.4		
G90-87	3.5	F89-66	5.0	F89-14	2.0	H90-140*	6.8		

注:带*号为电子探针测定黄铁矿、磁黄铁矿的结果

(5)本区铁矿石的 Ge 平均含量为6.65ppm,最高者达16ppm,明显高于正常沉积岩石中的 Ge(0.2~2ppm)含量,也反映出热液-火山喷气特点(B·M·格里戈里耶夫等,1956)。

(6)本区许多矿石和有关地层中 F、Cl 等卤族元素均较富,如马坑的磁铁矿矿石含 F 0.02%~1.57%,Cl 0.05%,矿区的黄龙组灰岩含 F 0.45%、Cl 0.017%;洛阳的铁矿石中平均含 F 0.78%,最高可达1.84%^[1],矿区的林地组砂岩含 F 0.067%~0.24%、Cl 0.09%~1.07%;中甲铁矿区林地组砂岩含 F 0.037%~0.126%、Cl 0.002%^[2];有些矿区,如樟坑黄铁矿还产出石膏。这表明了铁矿沉积时处于卤水沉积环境。

2.2 容矿岩石的化学成分

本区硅质岩类与铁矿石的关系最密切,有些与铁矿呈互层状产出,有些呈单一层状就位于矿体底板。本区硅质岩的主要氧化物比值与热泉成因、生物成因和火山沉积型硅质岩^[6]相比,与热泉成因的硅质岩相当(表3)。

表3 不同成因类型硅质岩的化学成分对比
Table 3 Comparison of analysis for different genetic silicious rocks

原编号	硅质岩成因类型	$\frac{Fe_2O_3}{FeO}$	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{K_2O+Na_2O}$	$\frac{SiO_2}{MgO}$
	生物成因硅质岩 ^[7]	5.38	135.15	872	1798
	与火山有关的硅质岩 ^[7]	0.28	4.11	6.7	66.73
	与海底热泉有关的硅质岩 ^[7]	0.46	31.94	118.35	97.17
G90-29	纹带状钠长石英岩	0.65	15.91	20.81	87.25
G90-32	含白云母片状石英岩	2.38	70.59	181.03	800
G91-85	硅质岩	2.05	6.40	32.29	598.70
F91-162	石英岩	2.80	112.47	302.28	1381.86
中-1	硅质岩	13.3	80.88	954.4	318.13

2.3 容矿岩石及有关矿石的成分聚类分析判别

对本区19个样品7个组分的测定结果及有关比值共9个变量(1~19号样,变量为 TiO₂、Zr、Y、Sc、Ga、Ge、P₂O₅、Zr/TiO₂、Ga/Sc),用欧氏距离函数的方法进行了聚类分析。用作聚类分析的标准样品选自广西大厂及加拿大^[2]等地。最后结果以欧氏距离矩阵的方式表示于表4。19个样品(注:F91-152为银顶格石炭系云母石英片岩;4155ND-2为加拿大沙利文富电气石的热液沉积岩;15、21236、1800-1为加拿大不同矿山的条带状燧石岩;其余样品名称见表5)中16个样品被划为热液沉积岩类和燧石岩类(1、3、5~10、12~19号样);1个样品(G90-32)被划为砂岩类,参考表3应属有陆源物质混染的热液沉积岩;1个样品(潘田-136)被误判为灰岩类;1个样品(G90-71)被划为页岩类。此外,在被划分为热液沉积岩类和与火山有关的燧石岩类的上述16个样品中,有14个划到热液沉积岩类,2个划到与火山有关的燧石岩类。这说明本区铁矿床主要与沙利文矿床和大厂矿床的沉积喷气成矿环境相似,少数矿床与火山旋回的喷气成矿环境相

似。

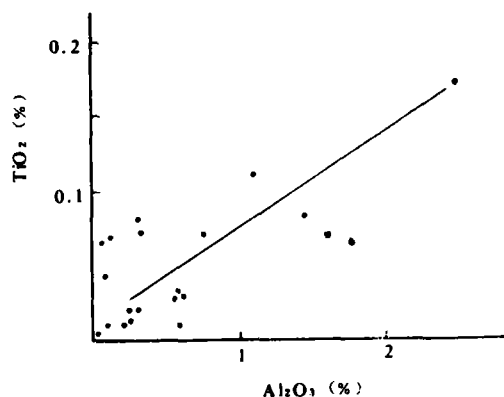
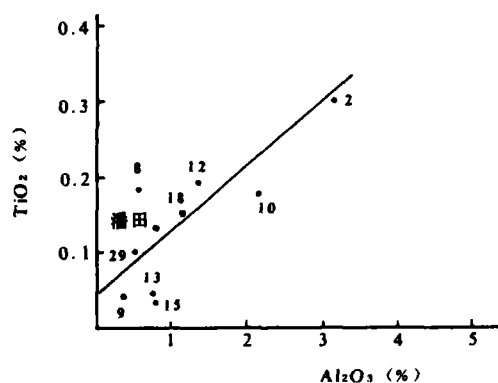


图1 马坑铁矿铝和钛关系图

Fig. 1 Plot (Al versus Ti) for Makeng Fe-ore



(注: 2代表样品序号及投影点,下同)

图2 闽粤地区铁矿铝和钛关系图

Fig. 2 Plot (Al versus Ti) for Fe-ores in Fujian-Guangdong Area

3 稀土元素

3.1 铁矿石的稀土元素

一般都认为阿尔戈马型和苏必利尔型条带状含铁建造是热水沉积物。对世界典型含铁建造的稀土元素研究表明:①含铁建造中的正 Eu 异常、弱 Ce 亏损(R·W·哈钦森,1977),说明该建造是从热水溶液中沉积出来的;②尽管稀土总量可能不同,但含铁建造中的单矿物与全岩的稀土模式相似;③不同时代、相同成因的含铁建造的稀土模式相似——即模式具“穿时性”[9,10,11,12]。

从表5和图3可见,本区铁矿石样品的稀土总量一般为3.04~61.81ppm,轻、重稀土分馏大多数不明显,La/Yb 比值最小者为1.89,10个样品中有8个样品的 La/Yb 比值小于8.16。稀土元素配分模式图型(以哈斯金1966年发表的球粒陨石 REE 平均丰度作标准化,下同)呈平缓型,与苏必利尔型和阿尔戈马型铁矿石类似,并且更接近于苏必利尔型铁矿石。这反映了本区铁矿与苏必利尔型或阿尔戈马型铁矿具有成因上的相似性,表明了本区铁矿尽管产出时代不同,但均具有海底热液沉积成因的特征。

本区所有矿石样品为 Ce 弱亏损或正常(Ce/Ce* 值为0.50~1.00)。两个样品 Eu 富集(Eu/Eu* 分别为1.78和1.69),Eu 富集是大量热水溶液输进沉淀它们的水中去的指示,反映出了热水沉积特点。

表4 据微量元素组成对闽粤地区铁矿床容矿岩石及有关矿石进行聚类分析的欧氏距离矩阵

Table 4 Clustering matrix of microelements for Fe-ores

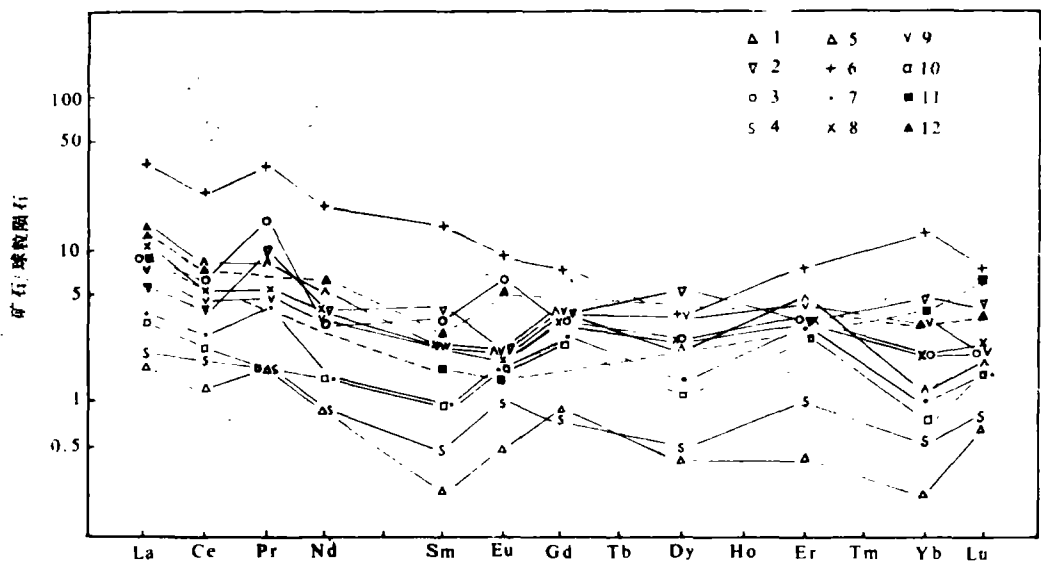
序号	样品号	C15-2	T11	DT25-1	4155ND-1	4155ND-2	19577a	15	21236	1800-1	砂岩	灰岩	页岩
1	G90-29	1.56	3.43	1.71	1.04	<u>1.07</u>	1.55	1.41	5.48	7.75	1.68	3.46	2.88
2	G90-32	4.16	4.73	4.04	3.73	3.39	4.20	3.28	7.14	8.67	<u>2.73</u>	3.06	4.99
3	G90-28	<u>1.52</u>	3.72	2.02	2.20	2.78	2.75	3.60	6.62	8.23	2.81	4.49	4.07
4	G90-71	5.05	6.20	5.66	4.56	4.15	3.79	4.24	3.25	6.70	5.28	7.02	<u>2.50</u>
5	G90-103	<u>1.96</u>	3.29	2.61	2.60	3.01	2.65	3.74	5.93	7.72	3.09	4.66	3.59
6	G91-56	2.36	4.35	3.14	2.09	2.04	<u>1.41</u>	2.51	4.13	6.62	3.26	5.18	1.48
7	G90-78	<u>1.46</u>	3.57	1.95	2.14	2.73	2.68	3.53	6.53	8.24	2.77	4.42	3.99
8	G91-85	3.64	5.40	4.18	2.87	2.45	2.82	<u>1.98</u>	5.19	7.59	3.16	4.82	3.16
9	G91-115	1.44	3.36	<u>1.12</u>	2.01	2.58	2.71	3.22	6.79	8.11	2.58	3.75	4.19
10	G90-159	<u>5.15</u>	6.43	5.51	5.52	5.75	5.73	6.33	8.44	9.02	5.40	6.82	6.49
11	潘田-136	3.51	3.44	2.52	3.76	4.02	4.12	4.20	7.45	8.64	3.61	<u>2.01</u>	5.27
12	F89-66	<u>2.01</u>	4.04	2.35	2.57	3.00	3.13	3.85	6.94	8.14	2.82	4.64	4.37
13	F89-72	<u>1.30</u>	3.52	1.57	1.96	2.57	2.62	3.35	6.62	8.32	2.71	4.25	4.03
14	F91-152	4.47	5.49	4.83	3.99	<u>3.10</u>	3.79	3.80	5.34	6.07	3.45	5.85	3.23
15	F91-162	2.08	3.26	<u>1.20</u>	2.60	3.10	3.25	3.63	7.20	8.62	2.88	3.27	4.69
16	F91-166	1.39	3.39	<u>1.30</u>	1.65	2.17	2.46	2.71	6.54	8.24	2.12	3.38	3.93
17	F89-42	<u>1.97</u>	4.04	2.36	2.58	3.07	3.12	3.85	6.93	8.16	2.90	4.61	4.39
18	F89-40	<u>1.57</u>	3.85	2.00	2.22	2.67	2.81	3.58	6.78	7.93	2.54	4.41	4.14
19	F89-14	2.05	2.33	<u>1.75</u>	2.19	2.42	2.62	2.68	6.16	8.35	1.99	2.40	3.79

注:在下面划横线的数字表明所研究样品与相应的已知标准样品属于同一类;C15-2、T11、DT25-1、4155ND-1、4155ND-2为热液沉积岩,19577a、15、21236、1800-1为与火山关的燧石岩,砂岩、灰岩、页岩为世界平均值

3.2 容矿岩石的稀土元素

把容矿岩石(部分样品中含有铁矿条带)作REE模式图,并与国内外有关矿床和北美页岩的图型对比,可分为两组(图4、图5),第一组中本区样品的稀土总量较低,一般为7.37~55.73ppm,轻、重稀土分馏明显,La/Yb比值为15.7~72.73,类似于沙利文矿山、Agnico-Eagle矿山和大厂的喷气沉积岩(图4),反映了其成因上的一致性。该组样品均具Ce弱亏损,Ce/Ce*值为0.65~0.87,不同于海水中显著的Ce亏损(Ce/Ce*值为0.16,据A·J·弗利特,1984),应是海水与喷气热卤水混合作用的结果;两个样品Eu富集,反映了热水沉积物特征;两个样品Eu弱亏损,反映了热水溶液与海水混合结果。

第二组本区样品的稀土总量较高,一般为120.18~551.88ppm。轻、重稀土分馏明显,La/Yb为10~21.25。大多数位于沙利文矿山样品、Agnico-Eagle矿山样品和北美页岩模式图型之间,少量高于北美页岩,且图型均十分相似(图5)。本组样品的Ce显示极微弱的负异常(Ce/Ce*为0.81~0.98)、Eu亦显弱亏损。这些特征表明这组样品应属于热液沉积与正常海相沉积混合的产物。因为陆源碎屑沉积中的REE浓度比热泉中的REE浓度要大得多,所以在热水沉积物



1. F91-173 2. F91-166 3. F89-42 4. 潘田-136 5. F89-72 6. F89-66 7. G90-159 8. G90-78 9. G90-103
10. G90-28 11. 苏必利尔型铁矿 12. 阿尔戈马型铁矿

图3 闽粤地区铁矿石稀土元素配分模式对比图
Fig. 3 REE patterns of Fe-ores in fujian-guangdong Area

中碎屑成分的加入会使稀土总量增高,同时 REE 模式会趋近于北美页岩。

3.3 $\Sigma Ce/\Sigma Y$ 和 $Eu/\Sigma REE$ 比值变化特征

我们以 $\Sigma Ce/\Sigma Y$ 、 $Eu/\Sigma REE$ (ΣCe 为 $La \sim Eu$, ΣY 为 $Gd \sim Lu + Y$) 分别为纵横座标作图(图6),同时引用了其它作者的大洋型沉积壳层、大洋型火山沉积壳层、洋壳、太平洋深海粘土、大陆型沉积壳层等有关资料^[4]。可以看出,本区容矿岩石均相对贫铈富铈族,其轻、重稀土分馏明显和贫铈,显示陆壳的特征;而铁矿石几乎全部相对富铈贫铈族,具洋壳特征。容矿岩石的九个样中八个为硅质岩类,另一个为凝灰质粉砂岩。按图6分析,硅质和铁质的来源深度有一定差异,即硅质主要来源于深度较浅的陆壳热液循环系统;铁质主要来源于深达洋壳的热液循环系统。根据硅质层往往产出于铁矿层之下的特征,显示热液循环有逐渐加深的规律。

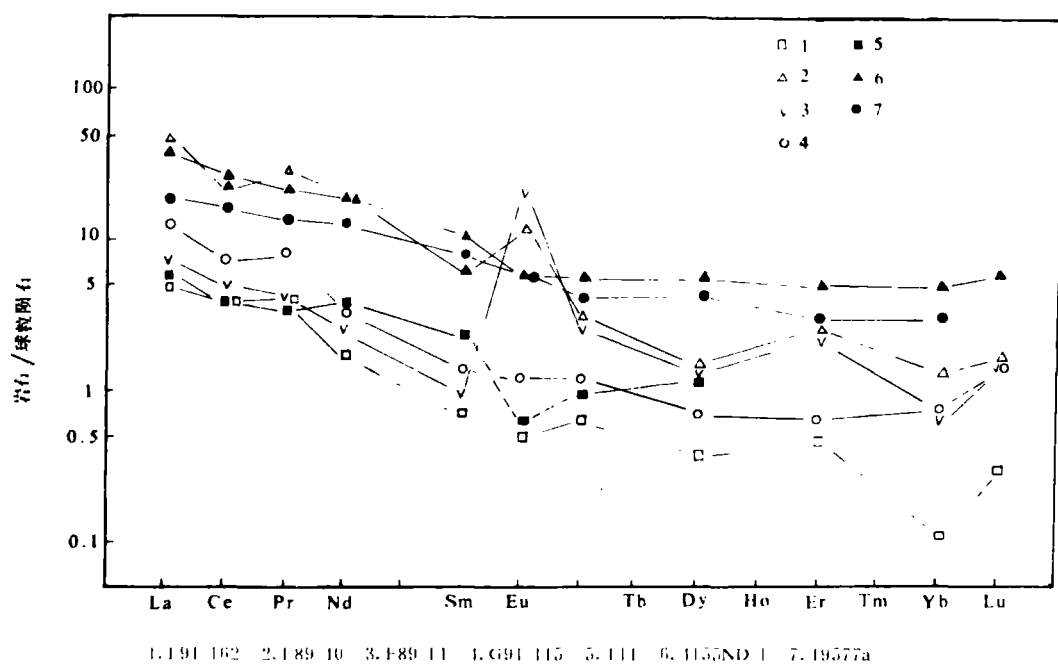


图4 闽粤地区第一组容矿岩石稀土元素配分模式对比图

Fig. 4 REE pattern comparison of group I of Fe ore hosts

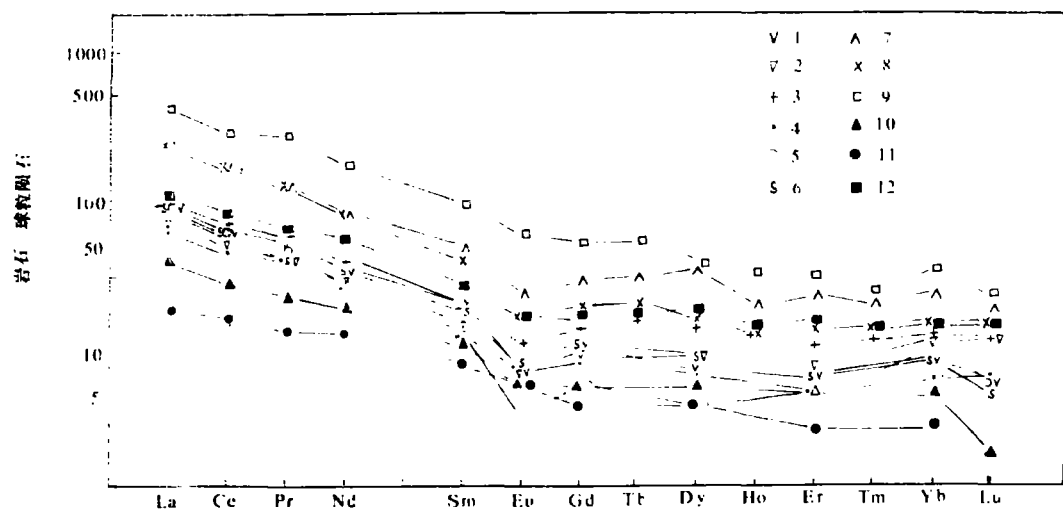


图5 闽粤地区第二组容矿岩石稀土元素配分模式对比图

Fig. 5 REE patten comparison of Fe-ores hosts of group II

表5 岩石和矿石的稀土含量及有关比值

Table 5 REE contents and ratios

顺序号	原编号	样品名称	地点及层位	稀 土 分 量 (ppm)														ΣREE (ppm)	Eu/Eu*	Ce/Ce*	La/Yb	
				La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					Y
1	F91-173	赤铁矿	银顶格, C ₁ L-P ₁	0.5	1	0.2	0.5	0.03	0.035	0.26	0.11	0.12	0.090	0.080	0.02	0.042	0.048	0.83	3.04	0.94	0.71	11.01
2	F91-166	层状褐铁矿		1.7	3.5	1.2	2.3	0.75	0.16	1.1	0.34	1.6	0.34	0.68	0.17	0.9	0.13	12	14.85	0.60	0.53	1.89
3	F89-42	块状磁铁矿		2.6	5.3	2.0	2.0	0.7	0.44	1.0	0.78	0.75	0.40	0.68	0.36	0.38	0.060	11	28.45	1.78	0.50	6.84
4	潘田-136	条带状石英磁铁矿	潘田, C ₁ L-P ₁	0.64	1.5	0.2	0.5	0.1	0.08	0.24	0.17	0.13	0.1	0.2	0.02	0.1	0.04	0.58	4.12	1.69	1.00	6.4
5	F89-72	层状透辉石磁铁矿	德化阳山, C ₁ L-P ₁	4.3	6.9	1.0	3.2	0.5	0.16	1.3	1.0	0.63	0.74	0.96	0.66	0.22	0.058	1.6	21.63	0.64	0.73	19.55
6	F89-66	含双透辉条带状磁铁矿		11	20	4.4	11	3.0	0.66	2.1	0.82	3.6	0.55	1.6	0.40	2.5	0.21	11	61.84	0.84	0.65	4.1
7	G90-159	条带状透闪石磁铁矿	铁山坪, D ₃	2.1	3.7	0.6	2.2	0.5	0.17	1.2	0.35	1.1	0.55	0.82	0.46	0.65	0.062	5.9	14.46	0.72	0.73	3.23
8	G90-78	块状磁铁矿	藤铁, D _{2y} -D _{2d}	1.1	2.3	0.5	0.8	0.2	0.12	0.84	0.30	0.42	0.46	0.64	0.41	0.19	0.046	1.8	8.33	0.86	0.70	5.79
9	G90-103	块状磁铁矿	冷水坑, D _{2y} -D _{2d}	3.1	4.6	0.6	2.1	0.5	0.14	0.96	0.83	0.69	0.46	0.70	0.41	0.38	0.073	2.4	15.84	0.68	0.71	8.16
10	G90-28	块状赤铁矿	林湾, Z ₂	1.0	1.9	0.2	0.8	0.2	0.12	0.74	0.78	0.34	0.42	0.56	0.36	0.14	0.047	0.97	7.61	0.95	0.91	7.14
11	F91-162	石英岩	银顶格, C ₁ L-P ₁	1.6	3.3	0.5	1	0.15	0.036	0.2	0.18	0.11	0.078	0.10	0.088	0.022	0.01	0.38	7.37	0.71	0.83	72.73
12	F89-40	纹带状含铁透辉石砂卡岩	中甲, C ₁ -P ₁ 单丹坑, D _{2d}	14	21	3.7	11	1.3	1.0	0.98	0.66	0.51	0.36	0.58	0.31	0.27	0.056	9.5	55.73	2.86	0.65	51.85
13	F89-14	铁质钙硅质岩		2.2	4.2	0.5	1.6	0.2	1.6	0.80	0.82	0.42	0.42	0.56	0.36	0.14	0.051	3.8	13.87	11.95	0.87	15.71
14	G91-115	条带状赤铁石英岩	铁山坪, D ₃	3.7	6.4	1	2	0.3	0.09	0.36	0.17	0.2	0.091	0.14	0.05	0.14	0.048	1	14.69	0.93	0.74	26.43
15	G90-152	绢云母石英岩	铁山坪, D ₃	28	53	6.1	18	4.2	0.47	3.1	0.81	2.4	0.54	1.3	0.38	1.7	0.18	15	120.18	0.42	0.88	16.47
16	G91-85	硅质岩	将乐, D _{2y} -D _{2d}	22	45	5.1	16	3.1	0.72	3.0	0.67	2.9	0.74	1.7	0.36	2.2	0.37	18	103.86	0.79	0.93	10.0
17	G91-56	黑云母化粉砂岩	葛坑坑, E _{2c}	28	61	6.7	22	3.9	0.83	4.3	0.81	4.4	0.92	2.2	0.40	2.5	0.37	25	138.33	0.68	0.97	11.2
18	G90-29	纹带状钠长石石英岩	林湾, Z	20	40	4.9	15	2.5	0.56	2.5	0.52	2	0.47	1.1	0.26	1.3	0.21	14	91.32	0.75	0.89	15.39
19	G90-32	含白云母片状石英岩		26	50	5.5	15	2.7	0.26	1.8	0.86	1.3	0.60	1.1	0.45	1.9	0.18	15	107.65	0.37	0.90	13.68
20	G90-49	透闪石石英岩	大降坪, 前E	26	53	5.1	19	3.8	0.62	3.2	0.74	2.9	0.58	1.4	0.34	1.7	0.17	15	118.55	0.58	0.98	15.29
21	H90-131	绢云母石英片岩	石绿, E ₂	70	140	15	50	10	1.7	10	1.5	10	1.4	4.8	0.72	4.6	0.56	41	320.28	0.57	0.93	15.22
22	G90-71	粉砂质千枚岩	四村, E _{2c}	68	149	15	46	8.2	1.2	5.6	1	5	0.97	3	0.46	3.2	0.48	27	298.11	0.56	0.95	21.25
23	F91-152	云母石英片岩	银顶格, C ₁ L	120	230	33	100	19	4.2	15	2.4	11	2.3	6.5	0.78	7	0.70	63	551.88	0.81	0.81	17.14
24	阿尔戈马型铁建造的磁铁矿		玛丽河 ^[13]	3.93	6.17		3.60	0.60	0.39							0.66	0.11					5.95
25	苏必利尔型铁建造的磁铁矿		澳大利亚 ^[13] 广西大厂长坡, D ₄	2.60			0.32	0.11								0.82	0.19					3.17
26	C15-2	含磁质条带的条带状硅质岩	广西大厂铜坑, D ₄ 及 D ₅ ^b	1.1	4.1	0.9	5.3	1.2	<0.05	0.9	0.1	0.9	0.08	0.5	<0.1	0.7	0.06	7	15.99	0.16	0.87	1.57
27	T11	块状硅质岩	广西大厂铜坑, D ₄ 及 D ₅ ^b	1.8	3.4	0.4	2.3	0.5	<0.05	0.3	<0.1	0.4	<0.05	<0.1	<0.1	<0.1	<0.05	3	9.65	0.40	0.87	18.00
28	DT25-1	条带状锡石-辉长石岩		0.9	2.3	0.3	1.5	0.4	<0.05	0.3	<0.1	0.2	<0.05	<0.1	<0.1	<0.1	<0.05	3	6.45	0.47	0.996	9.00
29	4155ND-1	条带状富电气石的热液沉积岩	加拿大沙利文, Agnico-Eagle 矿山	11.2	23.1	2.8	11.3	2.3	0.44	1.8	0.2	1.8	0.32	1.1	0.2	1.1	0.19	11.0	57.85	0.70	0.91	10.18
30	19577a	条带状磁石岩		5.6	13.7	1.7	7.8	1.8	0.43	1.3	0.2	1.4	0.15	0.6	0.1	0.6	<0.05	6.0	35.43	0.90	0.99	9.33
31		北美页岩	平均值	32	73	7.9	33	5.7	1.24	5.2	0.85	5.8	1.04	3.4	0.50	3.1	0.48	27	173.21	0.75	1.01	10.32

4 硅同位素

对样品采用 SiF₄法进行分析,质谱测定 MAT—251EM。以美国标准局 NBS—28号石英砂岩为标准样,测量结果用 δ³⁰Si 表示:

$$\delta^{30}\text{Si}(\text{‰}) = \frac{(^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si})_{\text{样品}} - (^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si})_{\text{标准}}}{(^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si})_{\text{标准}}} \times 10^3$$

硅同位素研究的一个重要领域是判别硅质岩的成因,从而为判断含硅质岩地层是否含有海底喷气矿床提供指示。

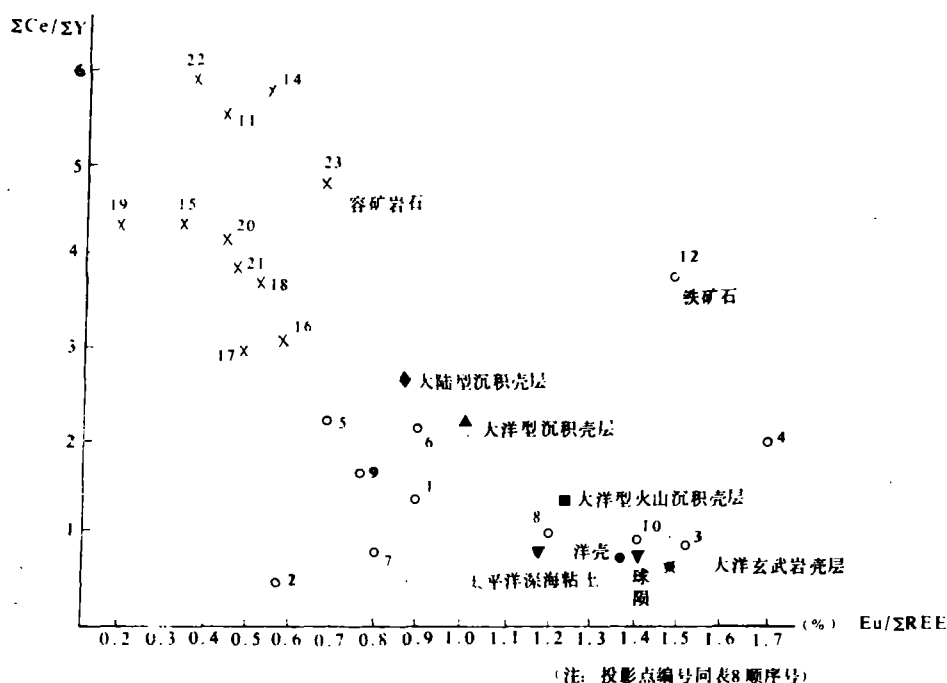
表6 铁矿石及有关岩石的硅同位素特征

Table 6 Si-isotopic character of Fe-ores and the retated rocks

样品编号	样品名称	地点及层位		$\delta^{30}\text{Si}$ NBS-28 (‰)
G90-32	含白云母片状石英岩	林湾, Z ₂		-0.3
G90-68	似砾状含砂卡岩磁铁矿	四村, C ₂		-0.5
G91-135	角砾状褐铁矿	大宝山, D _{2d} -D _{3sh}		-0.4
G91-115	铁石英岩	单竹坑, D _{2d} -D ₃		0.3
G90-61	阳起石绿帘石角岩	将军头	D _{2y}	0.2
G91-85	硅质岩			0.4
G90-58	黑云母花岗岩		γ_3^2	0
F91-166	层状褐铁矿	银顶格	C _{1L} -P ₁	-0.1
F91-162	石英岩			-0.2
F89-37	石英斑岩		γ_3^2	-0.1
	锡矿脉石英 ^[15]	广西大厂, D		0.5~0.6
	二长花岗岩 ^[16]	湘南广南		0
	花岗斑岩 ^[16]	广西大寺		0
	钠长花岗岩 ^[16]	福建魁歧		-0.1

铁矿石和矿石围岩的硅同位素($\delta^{30}\text{Si}$)测定结果(表6)表明, $\delta^{30}\text{Si}$ (‰)值大致可以划分为三组(图7):①第一组 $\delta^{30}\text{Si}$ 值为-0.3~-0.5(包括林湾一个岩石样,四村、大宝山两个铁矿石样),显示为小负值,类似于靠近深海底火山活动中心的放射虫硅质岩、玄武岩及陨石值,而不同于沉积石英砂岩值及花岗岩值。从矿区地质情况来看,这两个矿床(林湾、大宝山)的铁矿层又都产于火山喷发间歇期沉积的砂岩-粉砂岩、碳酸盐岩中。另外,四村铁矿床围岩中见有少量凝灰岩。因此上述三个矿床是与火山活动有关的热液喷气沉积产物。②第二组 $\delta^{30}\text{Si}$ 值为0.2~0.4(包括将军头、单竹坑等矿床的样品),显示为小正值,与将军头等地的花岗岩中的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值(0~-0.1)很不一致,而与热液喷气沉积矿床——广西大厂锡多金属矿床中脉状石英的值(0.5~0.6)十分相近,证明了本组样品中的硅主要来自热水沉积,而不是来自花岗岩。③第三组 $\delta^{30}\text{Si}$ 值为-0.1~-0.2,接近零值(银顶格铁矿床的样品),类似于一般花岗岩、沉积石英砂岩和银顶格矿区见到的小岩枝状石英斑岩值,这只能是一种偶合,因为该组的两个样品,其一是层状褐铁矿中呈细角砾被铁质胶结的硅质岩,其二是管道外壁呈墙状产出的石英爆裂而成的角砾状石英岩,两者的宏观产状显示同源性。这种同时产出于管道相和层状相的同源硅应是海底热液填充或沉积物,而与后期岩枝石英斑岩和陆源碎屑岩无关。

三组硅同位素值均摆动于零值附近,表明硅源的内生性,小负值可能反映与火山活动有关的喷气产物,小正值是热水沉积产物,近零值介于两者之间,可能是过渡环境的产物。



(注: 投影点编号同表5顺序号)

图6 铁矿石和容矿岩石样品的 $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 、 $\text{Eu}/\Sigma\text{REE}$ 比值变化特征

Fig. 6 $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$, $\text{Eu}/\Sigma\text{REE}$ characteristics of samples from Fe-ore and hosts

5 矿物包裹体特征和成矿温度测定

我们对广东单竹坑铁矿床中硅铁构成的角砾状铁矿(产于泥盆系地层中,角砾为硅质)、福建银顶格铁矿床中与铁矿石同生的硅质岩(产于下石炭统林地组地层中)样品进行了包体测温(表7),结果表明:单竹坑硅铁构成的角砾状铁矿中,其石英中包体较多,分为两组,一组为半定向平行分布的包体,以液体包体及含液态 CO_2 包体为主,多与纯液态包体在一起,气液比12%~15%左右,均一温度为165~245℃;另一组为石英中散布的包体,一般比前者大,以液体包体及含液态 CO_2 包体为主,气液比20%~35%,均一温度为255~355℃。银顶格铁矿床的同生钙硅质岩中,石英中包体少且小,一般包裹体大小在3μm左右,以液体包体为主,气液比在10%~15%左右,大部分包体平行拉长分布,均一温度为150~250℃。

前人在闽粤地区曾做过铁及多金属矿石的包体测温,从表7可以看出,该区泥盆纪和石炭纪铁及多金属矿床的成矿温度在110~395℃之间,反映了成矿不属于正常沉积成岩成矿,而十分相似于海底热液喷气成矿的温度。

表7 矿物包裹体测温结果
Table7 Homogenization and decrepitation T of inclusions

样品名称	样品位置及层位	样品数	测温矿物	均一温度 (℃)	爆裂温度 (℃)	资料来源
黄铁矿石	大宝山多金属矿床 (D ₂ d)		黄铁矿、磁黄 铁矿、共生石 英、闪锌矿	130~170及290~320		葛朝华, 1984
	红岩黄铁矿床(D ₂ d)	26	黄铁矿		254~270	裴太昌
	西岸汞矿床(D ₃ t)	3	共生方解石	127~237		赖应管, 1986
		1	萤石	181~237		
	锦潭黄铁矿床(D ₂)			黄铁矿		244~268
铅锌矿石	天字号锰铅锌矿床(D ₂ d)	6	共生方解石	180~235		成都地院, 1990
闪锌矿石	凡口铅锌黄铁矿矿床(D ₃)		闪锌矿	110~255		喻铁阶
锡矿石	谢家山锡(钨)矿床(D ₂ d)		锡石		335~336	冯连顺, 1981
辉锑矿石	乐家湾锑矿床(D ₃)	4	辉锑石		205~258	赖应管, 1986
含锑方解石		3	方解石		275~305	
硅化灰岩		4	硅化灰岩		328~395	
褐铁矿石	单竹坑铁(钨)矿床(D ₂ d)	1	共生石英	165~245 255~355		本文
含方解磁铁矿	马坑铁矿床(C ₂ l)		方解石	180~200		葛朝华, 1983
含萤石磁铁矿			萤石	210~230		
含石英磁铁矿			石英	180~220		
钙硅质岩	银顶格铁矿床(C-P)	1	石英	150~250		本文
磁铁矿石	德化阳山铁矿床,C-P ₁	22	硫同位素 平衡温度	240~385		地科院 及桂林 所资料
	潘田铁矿床,C-P ₁	3		315~380		
	洛阳铁矿床,C-P ₁	3		310~415		
	中甲铁矿床,C-P ₁	1		355		
铁矿石	宣龙式铁矿床		无包体			陈泽铭, 1979
	宁乡式铁矿床		无包体			

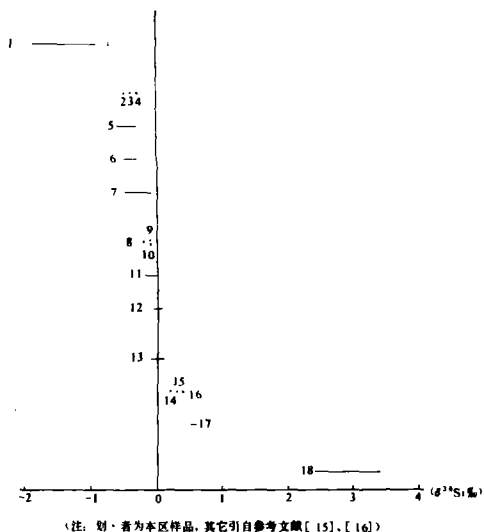
6 结 论

- (1)该区元古界、寒武系、泥盆系、石炭系一下二叠统等含矿层位中的铁矿床,初始成矿作用均为海相沉积成矿,而不是传统认识的接触交代型铁矿床。
- (2)该区常见的三种容矿岩石——硅质岩、钙硅质岩、钠长石石英岩为热液沉积岩,是海底热液喷气成矿成岩作用的产物;虽然该区铁矿床形成时代不同,但初始成矿作用却很相似——

应属海底热液喷气作用成因。

(3) 该区海底热液喷气成矿成岩作用中, 氧化物矿石相的喷出物主要为富硅贫铝岩石和铁矿石, 容矿岩石显示陆壳特征, 硅质主要来源于深度较浅的陆壳热液循环系统; 铁矿石具洋壳特征, 铁质主要来源于深达洋壳的热液循环系统, 并显示热液循环有逐渐加深的规律。

(4) 该区铁和硫铁、钨、锡、铜、钼、铋、铅、锌、锑、汞、锰等元素有时共生, 有时具有垂直分带和水平分带, 它们都是在古陆缘同生断裂控制下的拗陷盆地中以海底热液喷气成矿作用方式形成, 并在此基础上经后期的接触交代作用、褶皱作用、风化淋滤作用等过程而形成的矿床。



(注: 划·者为本区样品, 其他引自参考文献 [15], [16])

参考文献

- 1 赵一鸣, 等. 闽西南地区马坑式钙矽卡岩型铁矿床. 地科院矿床地质研究所刊, 1983, (1): 1~141
- 2 韩发, 等. 福建马坑铁矿床海相火山热液-沉积成因地质-地球化学特征. 地科院矿床地质研究所刊, 1983, (2): 1~118
- 3 刘聪, 等. 福建龙凤场黄铁矿型多金属矿床成因研究及找矿方向. 地质找矿论丛, 1987, (2): 15~27
- 4 王守伦. 矿床成因研究的一些新动向. 地质科技情报, 中国地质大学(武汉), 1988, (2): 71~74
- 5 Mercer W. 沉积岩中金属矿床的副元素. 层控矿床和层状矿床, 1981, 2, 1~16
- 6 张国林, 等. 广西大厂锡多金属矿床成因探讨. 地质论评, 1987, 33(5): 426~436
- 7 韩发, 等. 大厂锡多金属矿床热液喷气沉积的证据——含矿建造及热液沉积岩. 矿床地质, 1989, 8(2): 25~37
- 8 韩发, 等. 大厂锡-多金属矿床热液喷气沉积成因的证据——容矿岩石的微量元素和稀土元素地球化学. 矿床地质, 1989, 8(3): 33~41
- 9 Eichler J. 前寒武纪条带状含铁建造的成因. 层控矿床和层状矿床, 1981, 2, 116~147
- 10 Fryer B J. 含铁建造的稀土元素. 稀土元素在矿床研究中的应用, 1987, 161~168
- 11 Graf J L. 稀土元素是火山岩中块状硫化物矿床形成的示踪剂. 稀土元素在矿床研究中的应用, 1987, 14~36
- 12 约瑟夫 L, 等. 稀土元素、铁建造和海水. 国外地质参考资料(稀土元素地球化学专辑)(20), 1981, 209~216
- 13 梅纳德 J B, 等. 铁建造. 沉积矿床的地球化学, 1985, 8~32
- 14 王贤觉, 等. 东海大陆架海底沉积物稀土元素地球化学研究. 地球化学, 1982, (1): 56~65
- 15 丁梯平. 硅同位素地球化学研究进展. 矿物岩石地球化学通讯, 1990, (2): 99~101
- 16 丁梯平, 等. 硅同位素测量方法及其地质应用. 矿床地质, 1988, 7(4): 90~95
1. 风化型高岭土 2. G90-68 3. G91-135 4. G90-32 5. 近火山放射虫硅质岩 6. 玄武岩 7. 陨石 8. F91-162 9. F91-166 10. F89-37 11. 花岗岩 12. 石英岩 13. 热液型高岭土和粘土 14. G90-61 15. G91-115 16. G91-85 17. 大厂锡矿脉石英 18. 硅化球状叠层石

图7 硅同位素特征对比图

Fig. 7 Plot of Si-isotope comparison

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SUB-MARINE HYDROTHERMAL EXHALATED Fe-DEPOSTS IN FUJIAN-GUANGDONG AREA

Wang Shoulun

Liu Qiyun

Zhang Dianxue

*Li Hongchen **

(Tianjin Geological Academy MMI)

Abstract

Investigations of Fe-ore deposits of Fujian-Guangdong Area in Sinian, Cambrian, Devonian and Permian horizons and the autogenetic sediments reveals that they are resulted from the hydrothermal fluid flooding at sea floor. The typical geochemical characteristics are established:

1. Fe-ores are in high values of Ge, Cl and F showing positive correlation of TiO_2 and Al_2O_3 .
2. They are low in Al, P and K and have a range of $-0.5 \sim 0.4\%$ for $\delta^{30}Si$ of silicious rocks.
3. Fe-ores have a REE range of $3.04 \sim 61.84$ ppm without significant fractionation of HREE and LREE while the layered hydrothermal sedimentary rocks has a REE range of $120.18/557.88$ ppm with significant fractionation of HREE and LREE, and the both have no significant Ce depletion with only weak Eu enrichment or depletion.
4. Fluid inclusion in residual bands in Fe-ores has a homogenization temperature range of $165-355^\circ$