

鄂东南矿集区程潮大型矽卡岩铁矿的花岗质岩与成矿关系探讨

姚 磊¹ 刘佳林² 王 建¹ 孟维峰³ 岳 亮⁴

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 3. 内蒙古地质工程有限责任公司, 内蒙古呼和浩特 010010; 4. 江苏建筑职业技术学院矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:程潮铁矿床位于鄂东南矿集区鄂城岩体南缘, 矿体主要产于花岗质岩与大理岩或花岗质岩与闪长质岩的接触带附近。矿区矽卡岩和花岗质岩与矿体的接触关系密切。稀土元素分析结果表明: 石榴子石、绿帘石和磁铁矿矿石的稀土元素配分模式具有右倾、轻稀土富集、Eu 正异常和 Ce 无明显异常的特点, 显示它们具有相同的来源, 并且是在一种高温、高氧逸度、Eu 较富集的流体环境中形成的; 花岗质岩与矽卡岩、矿体在稀土元素组成特征方面具有相似性, 暗示它们具有成因联系。结合地质特征和稀土元素化学特征可知, 程潮铁矿的花岗质岩与矽卡岩和矿体在时间、空间和成因上都有着密切的联系。

关键词:鄂东南; 矽卡岩; 程潮铁矿; 花岗质岩

中图分类号: P618.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)06-1712-15

长江中下游地区是中国东部重要的 Cu-Fe-Au-Mo 成矿带^[1-2], 其范围西至武汉, 东至镇江, 主要包括鄂东南、九瑞、安庆—贵池、庐枞、铜陵、宁芜和宁镇等大型矿集区。其中, 庐枞、宁芜矿集区主要发育玢岩型 Fe 矿床, 另外 5 个矿集区主要发育与中生代侵入岩有关的 Cu-Au-Mo-Fe 矿床。鄂东南矿集区位于长江中下游多金属成矿带西段, 是中国重要的铁铜多金属矿产地之一^[3-4]。区内矿产以 Fe、Cu 为主, 其次为 Au、W、Mo 等, 矿床类型主要有矽卡岩型和矽卡岩—斑岩复合型, 代表性矿床包括: 程潮和金山店矽卡岩型 Fe 矿床、铁山矽卡岩型 (Cu) Fe 矿床、铜绿山矽卡岩型 (Fe) Cu 矿床、丰山洞和铜山口矽卡岩—斑岩复合型 (Mo) Cu 矿床以及鸡笼山矽卡岩型 (Cu) Au 矿床等。其中, 程潮铁矿是长江中下游地区最大的矽卡岩型 Fe 矿床, 也是鄂东南地区具有代表性的矽卡岩型矿床^[3,5]。前人曾对该矿床的地质特征、矿物学、岩石学、成岩成矿时代、矿床成因等

做了相应的研究^[3-4,6-17], 但是成矿与花岗质岩有关还是与闪长质岩有关仍然存在争议。本文以程潮铁矿为研究对象, 从矿床的地质特征和稀土元素地球化学特征角度出发, 探讨了该矿床成矿的物理化学特点、成矿物质来源和花岗质岩与成矿的关系, 为深入研究该矿床的成矿机制并总结鄂东南地区的成矿规律提供了新的地质和地球化学依据。

1 区域成矿地质背景

长江中下游地区位于扬子板块北缘, 秦岭—大别造山带和华北板块南侧 (图 1)。本区地质历史发展演化经历了前震旦纪基底发育阶段, 震旦纪—早三叠世盖层沉积阶段和中晚三叠世—新生代板内变形阶段^[6,18], 其中第三阶段与该区大规模的岩浆作用和成矿作用密切相关。区内地层发育完整, 包括零散分布的前震旦纪变质基底和震旦纪碎屑岩、白云岩和硅质岩, 广泛分布的寒武纪至早三叠世的海相碳

收稿日期: 2012-11-20; 改回日期: 2012-11-25

基金项目: 科学技术部 973 课题 (2012CB416802)、国土资源部公益性行业课题 (200911007-18) 和中国地质调查局地质大调查项目 (1212011120994) 联合资助。

作者简介: 姚磊, 男, 1986 年生, 博士生, 地球探测与信息技术专业; E-mail: lemmon20054255@yahoo.com.cn。

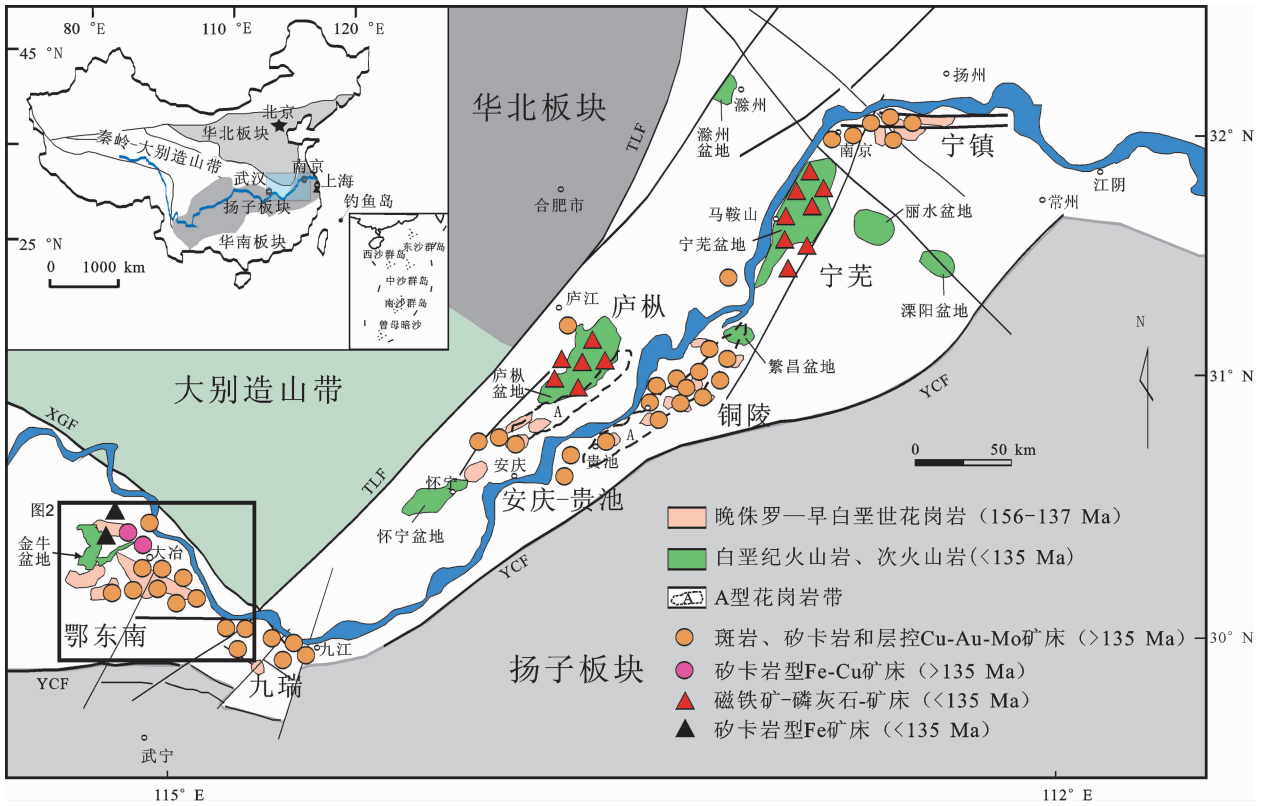


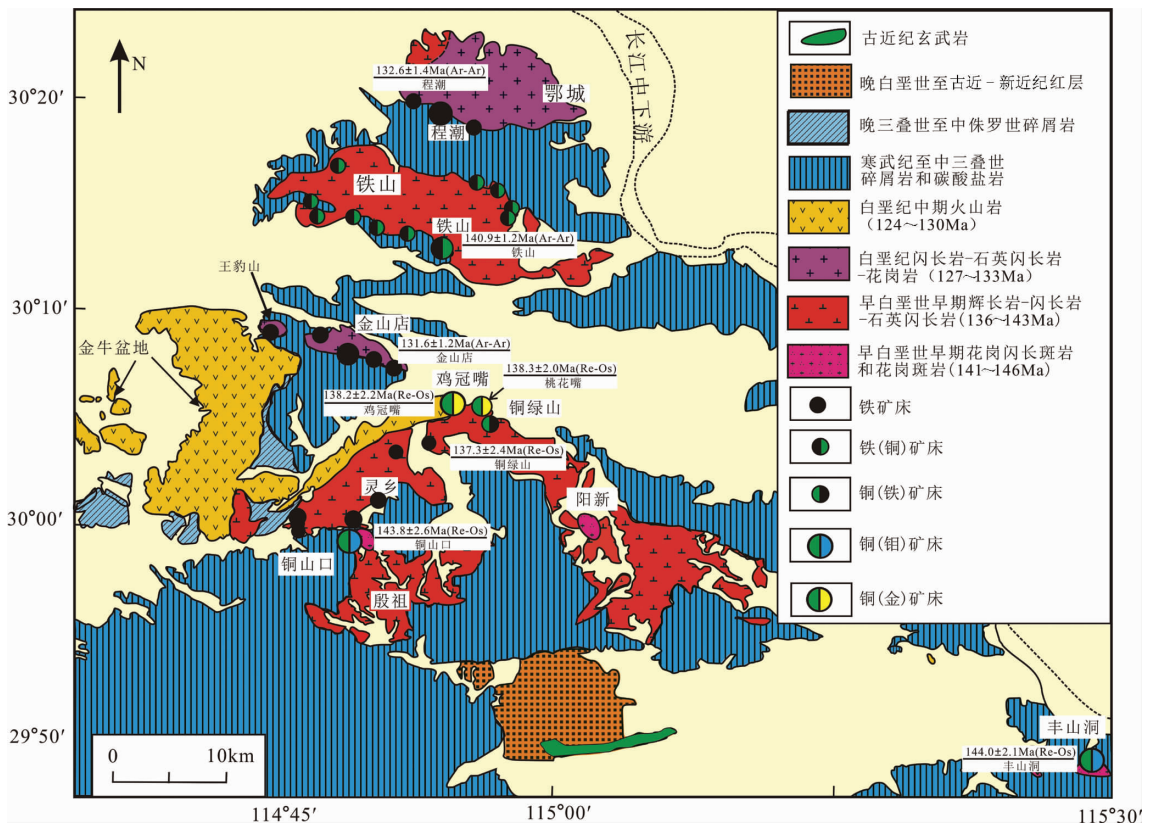
图 1 长江中下游地区地质矿产简图

Fig.1 Geological map of in the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, showing the distribution of ore deposits [2]; TLF-Tanlu Fault; XGF-Xiangfan and Guangji Fault; YCF-Changzhou and Yangxing Fault

酸盐岩以及侏罗纪—白垩纪陆相火山岩夹碎屑岩。中生代大规模的岩浆作用主要形成 2 大岩石系列^[9],即由闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩等 I 型花岗质岩石组成的高钾钙碱性侵入岩^[19-20]和由闪长玢岩、安山岩、英安岩和流纹岩组成的橄榄玄粗岩系列火山岩^[21]。此外,该区还发育有白垩纪碱性侵入—火山岩^[22]。区内矿产资源主要以铁铜为主,根据成矿地质特征和成矿年龄可将该区的岩浆作用和成矿作用划分为 2 期:1) 与高钾、钙—钙碱性花岗岩类岩石 (156~137Ma) 有关的斑岩—矽卡岩—层控型 Cu-Au-Mo-Fe 矿床 (148~135Ma); 2) 与橄榄玄粗系列岩石 (135~123Ma) 和有关的玢岩型铁矿 (134.9~122.9Ma)^[2]。

鄂东南地区地处扬子板块北缘,北与大别造山带相接,是长江中下游成矿带重要的组成部分(图 2),该区构造演化、岩浆作用和成矿作用与长江中下游其他地区相类似。区内地层发育完整,除太古宇和下泥盆统地层缺失外,各时代地层均有出露。其中,三叠纪大冶组灰岩和白云质灰岩、蒲圻组砂页岩、侏

罗纪武昌组含煤砂页岩和自流井组砂质碎屑岩、灵乡组、大寺组火山岩和火山碎屑岩分布广泛。该区位于鄂东褶皱束内,印支—燕山期的构造运动所形成的大型 NE 向深断裂和近 EW 向—NWW 向的褶皱,控制了鄂东南地区岩体和铁铜矿床的分布^[23]。区内以岩浆侵入为主,并伴有火山喷发,表现出多期次活动的特点。侵入体自北向南依次有鄂城 (100 km²)、铁山 (140 km²)、金山店 (16 km²)、灵乡 (55 km²)、阳新 (215 km²) 和殷祖 (90 km²) 6 大侵入岩体及铜山口、阮家湾、龙角山等多个小侵入体,岩性主要为(石英)闪长岩和花岗闪长(斑)岩。区内矿产资源丰富,主要以 Fe、Cu 为主,其次为 Au、W、Mo 等,根据近年来的最新研究成果,可将鄂东南矿集区与 Fe、Cu 矿产有关的矽卡岩型矿床划分为:1) 与辉长岩、闪长岩和石英闪长岩 (136~143 Ma) 有关的矽卡岩型 (Fe)Cu、(Cu)Fe 和 (Cu)Au 矿床 (137~144 Ma); 2) 与闪长岩、石英闪长岩和花岗岩 (127~133 Ma) 有关的矽卡岩型 Fe 矿床 (132~133 Ma); 3) 与花岗闪长岩和花岗斑岩 (141~146 Ma) 有关的矽卡

图2 鄂东南矿集区地质矿产简图^[3,15]Fig.2 Geological map of southeastern Hubei Province, showing main types of mineral deposits^[3,15]

岩—斑岩复合型(Mo)Cu矿床(143~144 Ma)^[15]。

2 矿床地质特征

程潮铁矿床为深部隐伏矿床,保有资源储量约2.8亿t,平均品位为Fe 45.1%,是鄂东南地区最大的矽卡岩型Fe矿床^[3,5,8]。矿区范围东西长3 km,南北宽1.5 km,面积4.5 km²。该矿于1952年9月由原地质部429队发现,1958年9月开始建设矿山,1969年11月投产。

矿区内地层出露较少,主要有三叠系和侏罗系,多分布在矿区南部。三叠系地层由下至上依次为大冶组、蒲圻群和鸡公山组,其中,大冶组地层主要呈透镜状或板状,多处于杂岩体与蒲圻群地层或者花岗质岩与闪长质岩之间,岩性主要为灰岩、白云质灰岩、白云岩和石膏岩等,是程潮铁矿的有利围岩^[8](图3-a,b)。矿区内构造较为复杂,NWW向的断裂控制着岩体产状以及铁矿体的分布。区内鄂城岩体主要由闪长质岩、花岗质岩以及一些中基性岩脉等

组成,其中,花岗质岩包括花岗岩、二长花岗岩和石英二长岩等;闪长质岩包括黑云闪长岩、含黑云二长闪长岩和闪长岩等。一般认为与成矿关系密切的是矿区的花岗质岩和闪长质岩^[6,8,12](图3-a,b)。

程潮铁矿床矿体由百余个铁矿体及硬石膏矿体组成,分为东、西两个矿区。其中,东区铁矿体主要由I、II、III号矿体组成,西区铁矿体主要由III、IV、V、VI、VII号矿体组成。程潮铁矿床铁矿体的地质特征主要表现为:1)矿体主要产于花岗质岩与大理岩或花岗岩与闪长质岩的接触带附近,底板一般为花岗质岩,顶板一般为大理岩或闪长质岩(图3-b),矿体受构造控制明显,倾向南或南南西并向北西西侧伏,一般为透镜状、囊团状和不规则状,常见膨大、缩小、分枝和尖灭再现的现象(图3-b)。2)矿体与花岗质岩主要有截然和渐变过渡的接触关系,呈渐变过渡者,一般在接触处往往发育有较宽的蚀变带,蚀变带宽度不一,一般为几十厘米至几米不等,主要由矽卡岩矿物、退化蚀变矿物以及碳酸盐矿物等组成(图4-

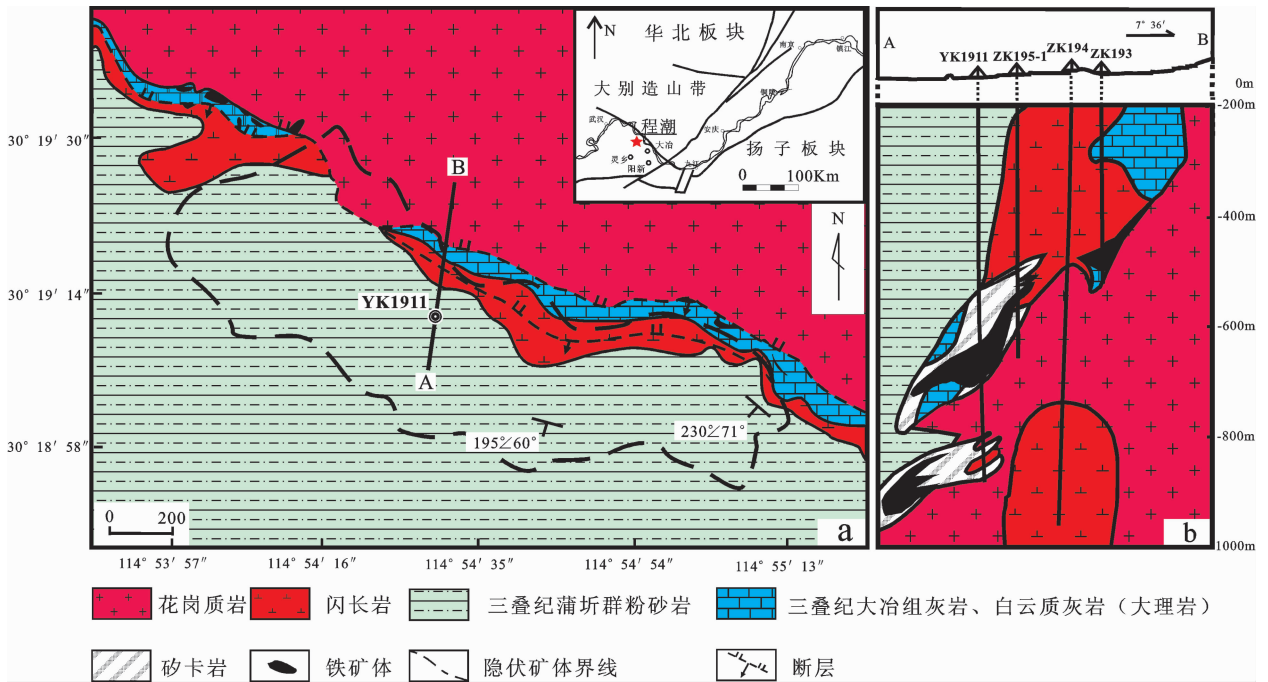


图 3 程潮铁矿地质简图^[6,24-25]

A—程潮铁矿地质简图及隐伏矿体;b—程潮铁矿 W19 勘探线剖面图

Fig.3 Geological map of the Chengchao Fe deposit^[6,24-25]

a—Simplified geological map of the Chengchao iron deposit and location of ore body; b—Geological section along W19 exploration line in the Chengchao iron deposit

a,b;图 6);接触关系截然者,接触界线清晰明显且较为平直,在接触处发育有较薄的蚀变层(图 4-c)。

3)在靠近花岗岩岩体的一侧,矿体边部往往可见无矿化的破碎花岗岩和石英二长斑岩角砾,这些破碎的角砾周围往往发生矽卡岩化或退化蚀变,他们之间的接触关系主要有截然和渐变过渡两种(图 4-d、e、f)。

4)矿体与矽卡岩和退化蚀变岩的接触关系密切,其中,矿体与矽卡岩的接触关系主要为渐变过渡关系,而矿体与退化蚀变岩的接触关系既有截然关系又有过渡关系(图 4-g、h、i)。

5)矿体与花岗岩、矽卡岩和退化蚀变岩接触关系为截然者,矿石往往较富,而接触关系呈渐变过渡者,矿石往往较贫。

6)部分矿体中的黄铁矿、石膏和方解石等呈自形—半自形中粗粒结构,可见黄铁矿呈长条状分布的现象(图 4-k),在大型石膏脉或石膏矿中可见磁铁矿矿体角砾(图 4-j)。

7)矿体多受后期构造运动的影响,被后期的黄铁矿、石膏以及一些基性岩脉所切穿或破坏(图 4-l)。

程潮铁矿床矿物种类多样,成分较为复杂,金属矿物主要有:磁铁矿、赤铁矿、镜铁矿、黄铁矿、黄铜

矿、斑铜矿和磁黄铁矿等。其中,黄铁矿电子探针显示:TFe 含量为 45.70%~47.07%,S 含量为 53.09%~54.04%,Co 含量为 0.04%~1.09%,Ni 含量为 0%~0.86%,Pb 含量为 0.09%~0.60%;黄铜矿电子探针成分为:Cu 含量为 34.75%~35.29%,S 含量为 34.62%~35.30%,TFe 含量为 30.55%~30.89%,Pb 含量为 0.12%~0.22%,Co 含量为 0.037%~0.076%。非金属矿物包括:石榴子石、透辉石、硅灰石、方柱石、韭闪石、透闪石、阳起石、金云母、绿泥石、绿帘石、蛇纹石、钾长石、斜长石、石英、方解石、石膏、硬石膏及高岭土等。其中,石榴子石以钙铁榴石为主,形成于成矿前阶段,可见被磁铁矿交代的现象(图 5-a);绿帘石在矿区发育广泛,部分与磁铁矿共生或被磁铁矿交代,是成矿阶段的产物(图 5-b)。矿区矿石结构主要有自形粒状结构、半自形—他形结构、交代结构、碎裂结构、放射状结构等。程潮铁矿矿石的主要构造包括:块状构造、浸染状构造、角砾状构造、条带状构造、斑点状构造、脉状构造等。根据矿石中的矿物组合特点可将该矿床矿石划分为:磁铁矿矿石、透辉石磁铁矿矿石、角闪石磁铁矿矿石、金云母磁铁矿矿

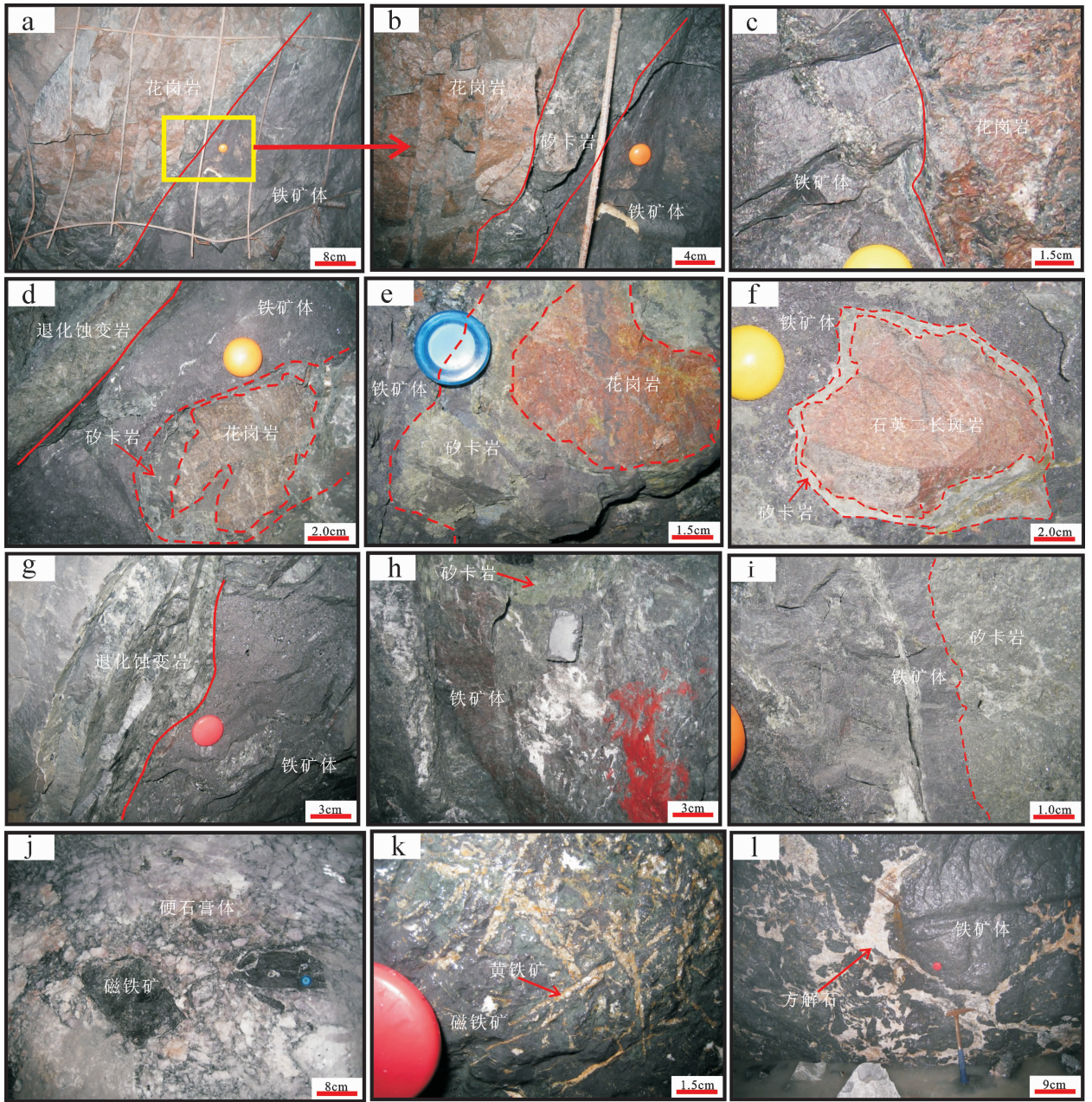


图4 程潮铁矿矿体的典型特征

a、b—花岗岩与矿体接触关系为渐变过渡；c—花岗岩与矿体的接触界线截然，几乎没有蚀变；d、e—矿体中的花岗岩角砾，角砾已发生砂卡岩化，接触关系为渐变过渡；f—矿体中的石英二长斑岩角砾，角砾周围发育薄层砂卡岩；g—矿体与退化蚀变岩的接触界线截然；h—矿体与砂卡岩呈渐变过渡关系；i—矿体与砂卡岩接触界线截然；j—石膏体中的矿体角砾；k—矿体中呈长条状的黄铁矿；l—被后期构造作用破坏的矿体，被方解石等胶结

Fig.4 Geological characteristics of ore bodies in the Chengchao iron deposit

a, b- Transitional contact relationship between granite and ore body; c- Sharp contact relationship between granite and ore body; d, e- Skarnized granite breccia in ore body; f- Low-skarnization quartz monzonite porphyry breccias in ore body; g- Sharp contact relationship between ore body and altered rocks; h- Transitional contact relationship between ore body and skarn; i- Sharp contact relationship between ore and skarn; j- Ore breccias in anhydrite ore body; k- Elongated pyrites; l- Ore body destroyed by tectonic activity and cemented by calcite

石、硬石膏磁铁矿矿石和金云母蛇纹石磁铁矿矿石。

程潮矿区广泛发育多种矿化蚀变,主要包括:钾化、砂卡岩化、绿泥石化、碳酸盐化、硬石膏化、绢云

母化等。根据矿物组合和共生关系,可将程潮铁矿的矿化蚀变阶段划分为:砂卡岩阶段、退化蚀变阶段和硫化物—碳酸盐阶段。

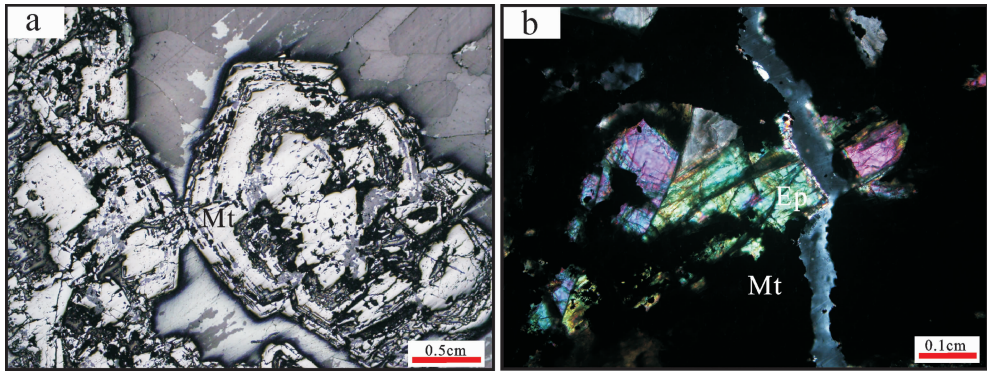


图 5 程潮铁矿石榴子石、绿帘石与磁铁矿的关系

a—磁铁矿交代石榴子石形成的假象;b—绿帘石与磁铁矿共生;Mt—磁铁矿,Ep—绿帘石

Fig.5 The relationship between garnets, epidotes and magnetites in the Chengchao iron deposit

a—Magnetites replacing garnets (under reflective light); b—Epidotes associated with magnetite (under transmitted light); Mt—Magnetite; Ep—Epidote

3 分析方法及样品特征

本次稀土元素分析所测岩体、围岩和矽卡岩单矿物样品由河北省廊坊市诚信地质技术服务公司进行挑选、清洗、粉碎、缩分并磨制成 200 目以下的粉末样品,然后将样品送至核工业北京地质研究院测试中心运用 ICP-AES 进行稀土元素分析测试,测试精度为 5%。

所测样品的采样位置和特征如下:本次所测矿区花岗质岩包括花岗岩和石英二长斑岩,其中,花岗岩主要采自 YK0011 钻孔 270 m 和 YK1911 钻孔 841 m 处,呈肉红色,一般为中细粒结构,块状构造,主要由斜长石(20%~25%)、钾长石(50%±)、石英(20%~)以及少量的黑云母、角闪石等组成,副矿物主要有榍石、锆石等;石英二长斑岩采自矿床东区-410.5 m 水平 8 号穿脉以东 28 m 处,属近矿岩体,斑状、细粒半自形结构,块状构造,斑晶由斜长石、钾长石及少量黑云母等组成,基质主要以斜长石为主,其次为钾长石、石英和少量辉石;大理岩主要采自 YK1611 钻孔 308 m 和 YK1911 钻孔 638 m 处;石榴子石采自 YK1911 和 YK1511 钻孔,呈棕褐色,半自形—他形中细粒结构,部分具明显的环带特征,为近矿矽卡岩中的石榴子石;绿帘石采自 YK0711 钻孔 430 m 处,呈草叶黄色、自形—半自形中粗粒结构,柱状晶形。

4 分析结果

15 件花岗岩、石英二长斑岩、大理岩、石榴子

石、绿帘石的稀土元素分析结果见表 1,同时还列出夏金龙等^[2]测得的 6 件矿石样品和新疆蒙库、内蒙古黄岗梁以及长江中下游一些矿床的 11 件石榴子石样品^[26-28]。本次所测数据的 REE 球粒陨石标准采用 Sun et al^[29]的数据,图 7 中列出了样品的球粒陨石标准化稀土元素配分模式。程潮铁矿岩体、围岩、矽卡岩单矿物以及矿石的稀土元素地球化学特征如下:

花岗质岩:3 件花岗岩的稀土含量较高,变化不大,在 $163.23 \times 10^{-6} \sim 216.38 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 值为 10.94~11.94, $(La/Yb)_N$ 为 11.2~12.08,表明程潮矿区花岗岩的轻重稀土元素发生了较为明显的分异作用,表现出轻稀土相对富集的特点。 $(La/Sm)_N$ 为 5.6~5.9, $(Gd/Yb)_N$ 为 1.29~1.32,显示轻稀土元素内部有较为明显的分异作用,而重稀土元素内部基本上没有发生分异。 $\delta Eu=0.52 \sim 0.83$,具有中等负铕异常。 $\delta Ce=1.02 \sim 1.06$,基本没有铈异常。如图 7-a 所示,程潮矿区与成矿有关的花岗岩稀土元素配分模式为轻稀土富集,而重稀土相对亏损的右倾型,表现为左陡右缓和铕负异常的特征。1 件石英二长斑岩的稀土总量较高,为 179.59×10^{-6} ,LREE/HREE 值为 10.52,表明其轻重稀土元素发生了较为明显的分异作用,表现出轻稀土相对富集的特点。 $(La/Sm)_N$ 为 5.01, $(Gd/Yb)_N$ 为 1.35,显示轻稀土元素内部有较为明显的分异作用,而重稀土元素内部基本上没有发生分异。 $\delta Eu=0.74$,具有中等负铕异常。 $\delta Ce=1.04$,基本没有铈异常。如图 7-a 和图 7-b 所示,与成矿有关的石英二长斑岩与花岗岩的稀土元素配分模式基本一致,表明他们具有相同的源区性质或为同源

表1 程潮铁矿床花岗岩、石英二长斑岩、大理岩、石榴子石、绿帘石以及矿石的稀土元素结果
 Table 1 Rare earth elements results of the granites, quartz monzonite prophyry, marbles, garnets, epidote and ores from the Chengchao Fe deposit

样品号	CC168	CC174	CC192	CC198	CC272	CC264	CC277	CC268	CC305	CC1180
样品名	石榴子石							绿帘石	石英二长斑岩	
La	7.23	2.48	12.1	8.1	6.5	8.29	2.5	6.81	24.6	39.9
Ce	26.2	15.4	42	33.1	29.6	42	15.6	38.2	40.1	78.8
Pr	4.98	4.28	8.36	6.84	6.69	9.34	3.94	8.97	4.68	8.64
Nd	29.9	30.6	45.5	38.3	36.8	52.4	26.3	52	17.7	30.4
Sm	7.36	8.47	8.52	8.85	8.69	11.6	7.38	12.5	2.92	5.14
Eu	2.72	2.95	3.84	3.02	3.1	4.57	2.61	4.58	1.91	1.12
Gd	5.58	6.14	6.42	6.89	7.11	9.15	5.78	10	2.51	4.14
Tb	0.99	1.14	1.03	1.17	1.35	1.63	0.96	1.74	0.43	0.72
Dy	5.22	6.15	4.85	6.5	7.15	9.43	5.34	9.66	2.21	4.15
Ho	0.99	1.16	0.83	1.19	1.36	1.72	0.89	1.85	0.35	0.72
Er	2.92	3.38	2.36	3.51	3.89	5.25	2.33	5.63	0.87	2.5
Tm	0.46	0.5	0.33	0.55	0.61	0.83	0.37	0.89	0.11	0.4
Yb	3.01	3.19	2.12	3.62	3.97	5.24	2.15	5.96	0.48	2.54
Lu	0.44	0.5	0.3	0.56	0.61	0.77	0.31	0.86	0.08	0.42
Y	28.1	31.8	22.2	32.2	37.6	47.6	23.6	51.4	9.8	22.2
Σ REE	98	86.34	138.55	122.2	117.43	162.22	76.46	159.65	98.95	179.59
LREE/HREE	4	2.9	6.6	4.09	3.51	3.77	3.22	3.36	13.06	10.52
(La/Yb) _N	1.72	0.56	4.09	1.61	1.17	1.13	0.83	0.82	36.61	11.27
δ Eu	1.3	1.25	1.59	1.18	1.21	1.36	1.22	1.25	2.16	0.74
δ Ce	1.07	1.16	1.02	1.09	1.1	1.17	1.22	1.2	0.92	1.04
(La/Sm) _N	0.63	0.19	0.92	0.59	0.48	0.46	0.22	0.35	5.44	5.01
(Gd/Yb) _N	1.53	1.59	2.51	1.57	1.48	1.44	2.22	1.39	4.31	1.35
La/Lu	1.75	0.53	4.4	1.54	1.14	1.16	0.86	0.85	32.55	10.21
Y/Ho	28.38	27.41	26.75	27.06	27.65	27.67	26.52	27.78	28.00	
样品号	CC197	CC200	CC1131	CC116	CC171	YK19-9	YK00-11	YK19-16	YK19-25	WK4124
样品名	花岗岩		大理岩			磁铁铁矿石		黄铁矿石		
La	47	41.1	38.1	16.4	23.5	8.4	1.5	7.9	13	35.9
Ce	98.6	76.5	72.5	37.2	51.8	16.7	2.6	19.3	35	38
Pr	11	8.15	7.92	5.36	6.83	1.75	0.29	2.15	4.13	2.64
Nd	36.7	27.1	25.7	24.4	29.6	5.26	1.06	6.35	13.4	7.6
Sm	5.42	4.5	4.29	5.31	7.19	0.59	0.2	0.56	1.46	0.96
Eu	0.94	0.72	1.05	1.02	1.47	0.25	0.2	0.13	0.35	0.17
Gd	4.7	3.9	3.47	4.56	7.1	0.72	0.27	0.69	1.45	0.98
Tb	0.74	0.65	0.59	0.81	1.37	0.07	0.04	0.05	0.11	0.09
Dy	4.03	3.63	3.51	4.56	7.96	0.29	0.19	0.18	0.35	0.48
Ho	0.83	0.72	0.65	0.91	1.54	0.05	0.03	0.03	0.05	0.07
Er	2.55	2.22	2.36	2.66	4.43	0.13	0.07	0.1	0.16	0.3
Tm	0.42	0.37	0.37	0.42	0.65	0.02	0.01	0.01	0.02	0.04
Yb	3.01	2.44	2.3	2.93	3.95	0.09	0.06	0.09	0.12	0.33
Lu	0.44	0.43	0.42	0.41	0.55	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06
Y	23.6	21.3	21.6	24.6	42.5					
Σ REE	216.38	172.43	163.23	106.95	147.94	34.33	6.53	37.56	69.62	87.62
LREE/HREE	11.94	11.01	10.94	5.2	4.37	23.89	8.62	31.05	29.56	36.32
(La/Yb) _N	11.2	12.08	11.88	4.01	4.27	66.21	18.88	62.27	77.71	78.03
δ Eu	0.57	0.52	0.83	0.63	0.63	1.17	2.63	0.64	0.74	0.54
δ Ce	1.06	1.02	1.02	0.97	1	1.07	0.97	1.15	1.17	0.96
(La/Sm) _N	5.6	5.9	5.73	1.99	2.11	9.19	4.84	9.11	5.75	24.14
(Gd/Yb) _N	1.29	1.32	1.25	1.29	1.49	6.55	3.92	6.27	10	2.46
La/Lu	11.37	10.36	9.79	4.25	4.55	81.84	20.09	60.48	87.08	66.34

注: YK19-9、YK00-11、YK19-16、YK19-25、WK4124 数据引自[12]。

岩浆演化的产物^[30]。

大理岩: 矿区 2 件大理岩的稀土总量较高, 变化不大, 在 $106.95 \times 10^{-6} \sim 147.94 \times 10^{-6}$ 之间, LREE/HREE 值为 4.37~5.2, (La/Yb)_N 为 4.01~4.27, 表明程潮矿区大理岩中的轻重稀土元素发生了较为明显的分异作用, 轻稀土元素明显富集。(La/Sm)_N 为 1.99~

2.1, (Gd/Yb)_N 为 1.29~1.49, 表明轻、重稀土元素内部都发生一定程度的分异作用。δ Eu=0.629~0.634, 具有中等负铕异常。δ Ce=0.97~1.00, 基本没有铈异常。稀土配分模式显示 (图 7-c), 2 件样品具有十分相似的稀土配分模式, 表现为轻稀土富集, 而重稀土相对亏损的右倾型, 显示出左陡右缓和铕负异常的特点。

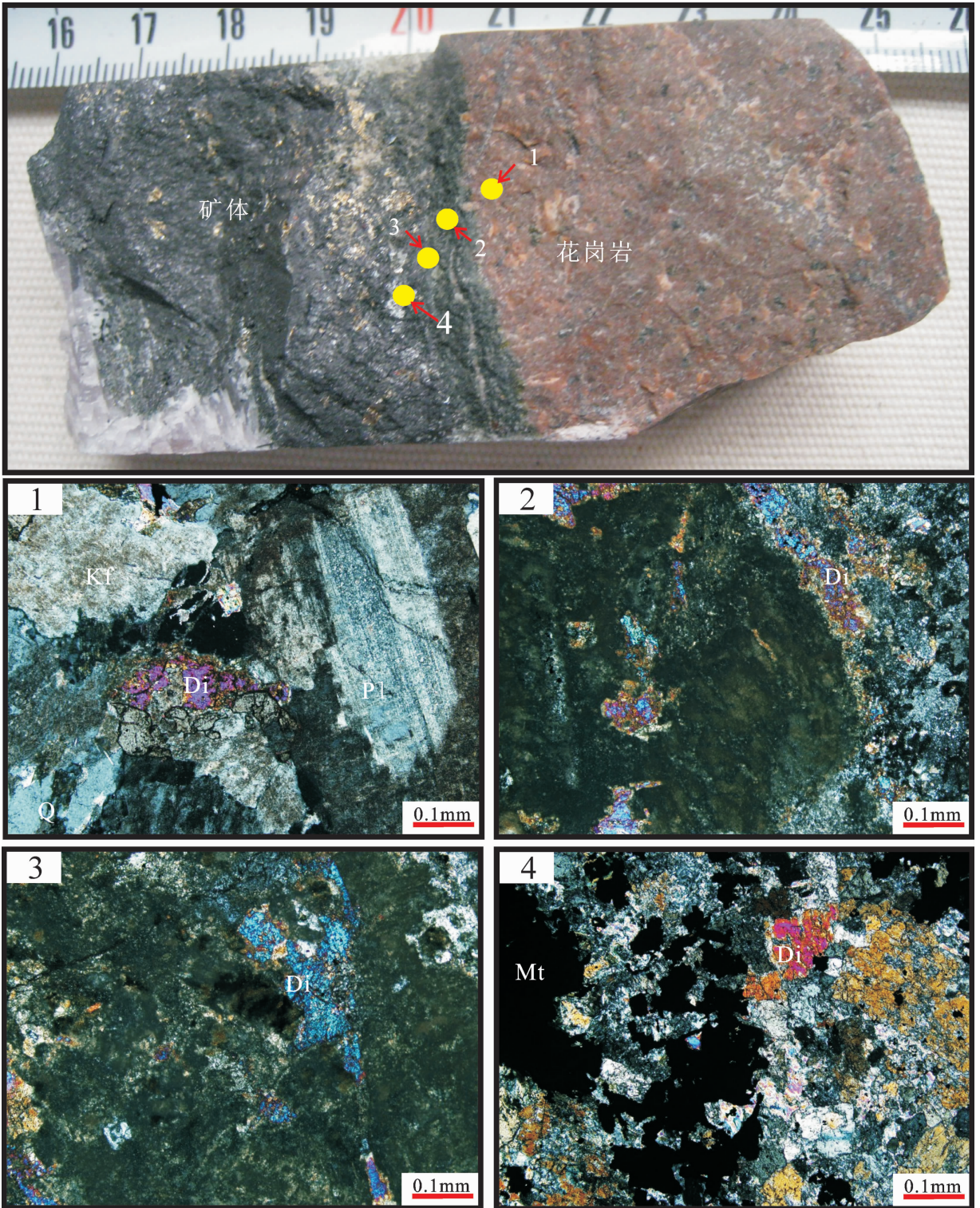


图 6 磁铁矿矿体与花岗岩之间的交代关系

Kf—钾长石;Pl—斜长石;Di—透辉石;Mt—磁铁矿;Q—石英

Fig.6 Metasomatism between magnetite ore body and granite

Kf- Potash feldspar; Pl- Plagioclase; Di-Diopside; Mt-Magnetite; Q-Quartz

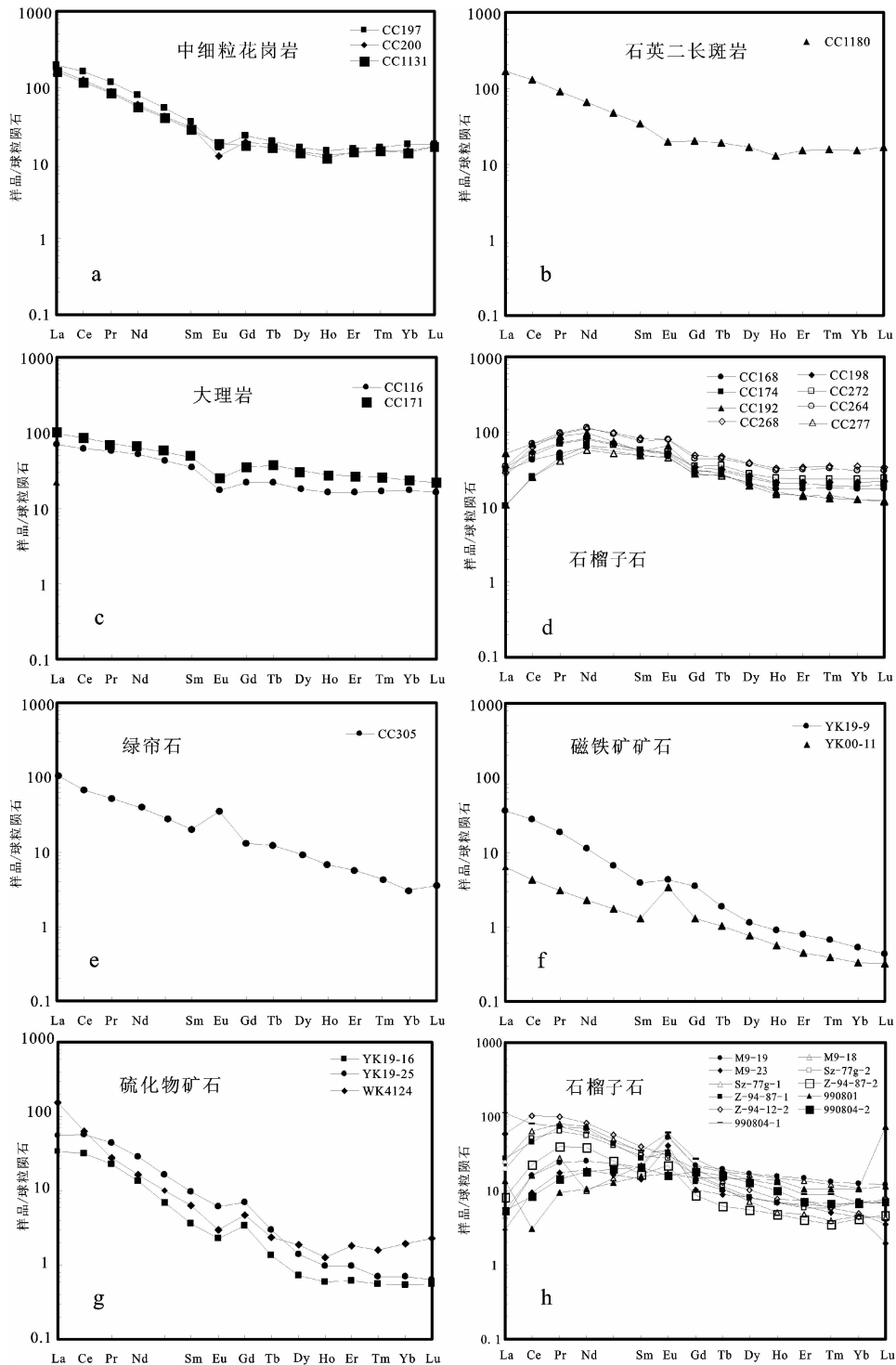


图7 程潮铁矿花岗岩、石英二长斑岩、大理岩、矽卡岩矿物和矿石的稀土元素配分模式(M1-19、M1-2、5M7-15、M9-18为新疆蒙库铁矿床石榴石样品,数据引自[28];Sz-77g-1、Sz-77g-2和Z-94-87-1、Z94-87-2、Z-94-12-2分为长江中下游地区小铜官山铁铜(金)矿床和伏牛山铜矿床石榴石样品,数据引自[26];990801、990804-1、990804-2为内蒙古黄岗梁铁锡矿床石榴石样品,数据引自[27];YK19-9、YK00-11、YK19-16、YK19-25、WK4124为程潮铁矿床矿石样品,数据引自[12])

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of granite, quartz monzonitic porphyry, marble, skarn minerals and ores from the Chengchao iron deposit (data of M1-19, M1-2, 5M7-15, M9-18 after [28]; Sz-77g-1, Sz-77g-2, Z-94-87-1, Z94-87-2 and Z-94-12-2 after [26]; 990801, 990804-1, 990804-2 after [27]; YK19-9, YK00-11, YK19-16, YK19-25, WK4124 after [12])

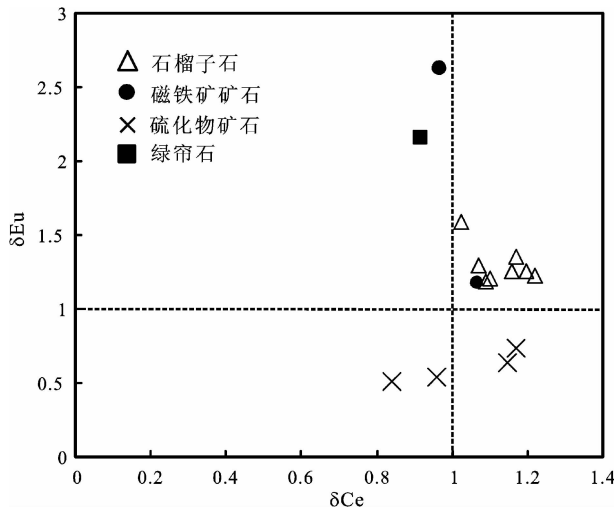


图 8 程潮铁矿石榴子石、绿帘石、矿石 $\delta\text{Eu}-\delta\text{Ce}$ 投影
(磁铁矿矿石和硫化物矿石数据引自[12])

Fig.8 $\delta\text{Eu}-\delta\text{Ce}$ diagram of garnets, epidote and ores from the Chengchao iron deposit (data of magnetite ores and sulfide ores from[12])

石榴子石:程潮矿区 8 件石榴子石单矿物样品的稀土元素总量相对较高,变化范围在 $76.46\times 10^{-6}\sim 162.22\times 10^{-6}$ 之间,平均为 120.1×10^{-6} 。LREE/HREE 值为 2.9~6.6,平均为 3.9; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 0.56~4.09,平均为 1.49,表明程潮矿区石榴子石中的轻重稀土元素发生了较为明显的分异作用,部分样品轻稀土元素相对富集。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 0.19~0.92, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为 1.39~2.51,表现出轻、重稀土元素内部发生了一定的分异作用。 $\delta\text{Eu}=1.18\sim 1.59$,具有弱正铕异常。 $\delta\text{Ce}=1.02\sim 1.22$,基本没有铈异常。稀土配分模式显示(图 7-d),8 件样品具有十分相似的稀土配分模式,显示出折线形分布、重稀土曲线平滑、整体近右倾等特点。

绿帘石:1 件绿帘石样品的稀土总量相对较低,为 98.95×10^{-6} ,LREE/HREE 值为 13.06, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 36.61,表明程潮矿区绿帘石中的轻重稀土元素发生了较为明显的分异作用,轻稀土元素表现出强烈富集的特点。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 5.44, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为 4.31,表明轻、重稀土元素内部都发生了明显的分异作用。 $\delta\text{Eu}=2.16$,具强烈的正铕异常。 $\delta\text{Ce}=0.92$,基本没有铈异常。稀土配分模式显示(图 7-e),绿帘石的稀土配分模式,表现为轻稀土富集,而重稀土相对亏损的右倾型,显示出左陡右缓的特点。

矿石:程潮铁矿的矿石数据引自[12],磁铁矿矿石

和金属硫化物矿石的稀土总量低于石榴子石、花岗岩和大理岩的稀土总量,接近于绿帘石的稀土总量。从 LREE/HREE、 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 来看,两种矿石都具有轻重稀土元素明显分异,轻稀土元素强烈富集的特点。在 δEu 值方面,磁铁矿矿石表现出一定的正铕异常,而硫化物矿石表现出 Eu 中度亏损的特点(图 7-f、g)。

5 讨论

5.1 石榴子石、绿帘石和矿石的稀土元素特征以及对成矿环境的指示

大量的统计研究结果表明,在不同类型的岩浆岩、硅酸盐碎屑沉积岩以及球粒陨石中, Y/Ho 值往往变化不大[31],而在水溶液中往往发生一定程度的分异,表现出 Y/Ho 值变化较大的特点。球粒陨石中的 Y/Ho 值为 28[32],矿区石榴子石、绿帘石的 Y/Ho 值变化范围较小,一般在 26.57~30.56,十分接近陨石的 Y/Ho 比值,说明程潮铁矿矽卡岩矿物和矽卡岩的形成可能与岩浆作用有关。矿区石榴子石端员组分以钙铁榴石为主,属典型的钙铁榴石-钙铝榴石系列 [17],其稀土元素配分模式表现为近右倾,正 Eu 异常,基本无 Ce 异常和轻稀土富集的特点,同时具有典型的折线型配分模式,这与长江中下游地区的一些矽卡岩型矿床以及内蒙古黄岗梁 Fe(Sn)矿、新疆蒙库 Fe 矿床中的石榴石稀土模式相一致 [26-28](图 7-h)。研究认为这类矽卡岩的形成可能与岩浆作用有着密切的联系,而导致石榴石轻稀土富集的原因可能是由于 LREE 元素与石榴石中八位配位的 Ca^{2+} 发生类质同像置换的结果[26]以及矿物晶体的化学结构决定。

稀土元素中 Eu 和 Ce 的异常特点是判断流体温度和氧化强度的重要指标,虽然流体中正 Eu 异常的形成机制目前仍存在争议,但是高温条件往往是决定流体中 Eu 正异常与否的重要因素 [33-36],同时也可以在一定程度上反映出流体的氧化还原条件的特点 [27,37];Ce 异常的产生主要是由于氧化条件下 Ce^{3+} 变为 Ce^{4+} 而难被流体溶解带走,因此 Ce 的异常特点也可以反映出环境的氧化还原条件特征 [38-39]。程潮铁矿床石榴子石、绿帘石和磁铁矿矿石以及硫化物矿石中均出现了 Eu 异常和 Ce 无明显负异常的特点。从程潮铁矿矽卡岩阶段的石榴子石→退化蚀变阶段的绿帘石、磁铁矿矿石→硫化物矿石的稀

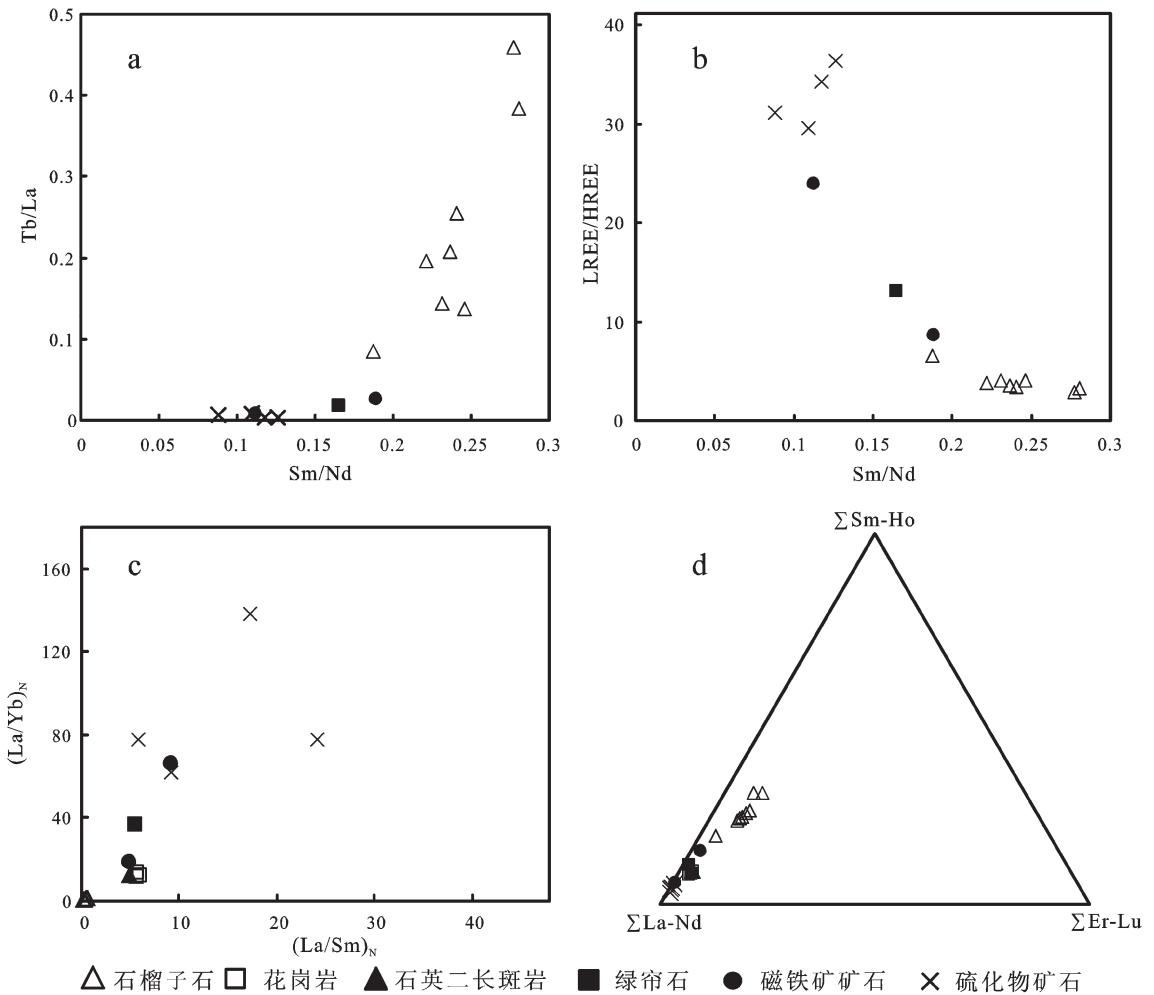


图9 程潮铁矿床花岗岩、石英二长斑岩、石榴子石、绿帘石和矿石的 Tb/La-Sm/Nd(a)、LREE/HREE-Sm/Nd(b) 稀土元素变异图和 $(La/Yb)_N$ - $(La/Sm)_N$ (c)、 $\Sigma La-Nd$ - $\Sigma Sm-Ho$ - $\Sigma Er-Lu$ 图解(d) (磁铁矿矿石和硫化物矿石数据引自[12])
Fig.9 Tb/La-Sm/Nd(a), LREE/HREE-Sm/Nd(b), $(La/Yb)_N$ - $(La/Sm)_N$ (c) and $\Sigma La-Nd$ - $\Sigma Sm-Ho$ - $\Sigma Er-Lu$ (d) diagrams of granites, quartz monzonite porphyry, garnets, epidote and ores from the Chengchao iron deposit (data of magnetite ores and sulfide ores from [12])

土元素变化特征来看(图8),它们的Ce值无明显负异常,而Eu值则显示出由弱正异常→中等正异常→负异常的变化特点,暗示流体在矽卡岩阶段和退化蚀变阶段处于高温氧化的环境,而硫化物—碳酸盐阶段则处于温度较低的还原环境。

程潮铁矿的花岗质岩属典型的同熔型花岗岩^[18],主要形成于高氧逸度的环境^[20],而矿区存在的大量以钙铁榴石为主的石榴子石(49.61%~97.78%)和绿帘石,也证明了矽卡岩阶段和退化蚀变阶段的流体具有高氧逸度的特点^[17]。这与石榴子石、绿帘石、磁铁矿Eu和Ce异常特点所得出的结论相一致。因此,程潮铁矿的矽卡岩阶段和退化蚀变阶段的流体具有高氧逸度、高温和Eu较富集的特征。

5.2 地质和稀土元素特征对岩体控矿的指示

矿床的地质特征和稀土元素特征可以很好地反映岩体与成矿的关系,因此可以作为岩体与矿体在时间、空间和成因上是否存在联系的重要依据。程潮铁矿主要矿体产于花岗质岩与大理岩或花岗质岩与闪长质岩的接触带附近,成矿与花岗质岩有关还是与闪长质岩有关一直存在争议。本文拟从矿床地质和稀土元素特征两个方面对程潮铁矿床花岗质岩与成矿的关系进行探讨。

其一,矿区花岗质岩与矿体的接触关系密切(图4;图6),常可以看到矿体沿着花岗岩的裂隙进行充填交代或者胶结花岗岩或石英二长斑岩角砾的现象,说明矿体形成稍晚于或近于花岗质岩的成岩年

龄。目前,所测得的矿区花岗岩的成岩年龄(128.8±0.5 Ma)(另文发表)和金云母磁铁矿矿体的成矿年龄(132.6±1.4 Ma)^[14]虽然显示出成矿年龄略早于成岩年龄,但基本在误差控制范围之内,并在一定程度上反映了上述地质特征。由此可知,矿区花岗质岩与矿体在时间和空间上存在着密切联系。

矿体与花岗质岩的接触处常发育不同宽度的矽卡岩化或退化蚀变带,主要由矽卡岩矿物或退化蚀变矿物等组成,蚀变带宽几厘米至数十厘米不等。从蚀变带及蚀变带两边的花岗质岩和矿体中的矿物组成与结构构造特征来看,从花岗质岩到矿体显示出一定的交代特征。如图 6 所示,从花岗岩至磁铁矿矿体表现为:花岗岩→透辉石化花岗岩→透辉石矽卡岩→透辉石磁铁矿矿体的变化,说明成矿流体在与花岗岩的接触过程中,发生了一定程度的交代反应,而这些交代反应的结果可能导致了磁铁矿的形成。因此,说明花岗质岩与矽卡岩和矿体在成因上有着一定的联系。

其二,研究表明,矿区与成矿有关的矿物、岩体和矿石中的稀土元素特征可以作为判断矿质来源和成矿条件的重要手段之一^[40-44]。程潮铁矿石石榴子石的稀土配分模式具有 Eu 正异常、LREE 富集和 HREE 相对亏损的特点。研究表明,酸性岩浆中 LREE 的丰度往往高于 HREE,而本矿区岩体的 Hf 和 Nd-Sr 同位素特征显示,与矽卡岩 Fe 矿床有关的岩体可能混入了更多的地壳物质^[15],这一方面说明矿区花岗质岩完全可以为石榴子石提供足够多的 LREE,另一方面从石榴子石的稀土元素配分模式特点来看,也说明石榴子石可能继承了花岗质岩富集 LREE 的特征(图 7-a、b、d)。因此,说明矿区花岗质岩与石榴子石有着一定的成因联系。

矿区石榴子石、绿帘石、磁铁矿矿体的稀土配分模式相似,都具有右倾、Eu 正异常、Ce 无明显异常的特点,说明矽卡岩矿物与磁铁矿矿体具有明显的成因联系^[43],而从矿体的矿物组成、结构构造等方面也可得到证实^[17]。在 Tb/La-Sm/Nd 和 LREE/HREE-Sm/Nd 图解中(图 9-a、b),所有样品都具有一定的相关性,说明程潮铁矿的石榴子石、绿帘石、磁铁矿矿体和硫化物矿石之间存在密切的成因联系,同时表明矽卡岩与矿体可能具有相同的来源。在 (La/Yb)_N-(La/Sm)_N 和 $\sum La-Nd-\sum Sm-Ho-\sum Er-Lu$ 图解中(图 9-c、d),花岗岩、石英二长斑岩、石榴

子石、绿帘石、磁铁矿矿石以及硫化物矿石中的稀土元素组成表现出一定的正相关性,暗示它们之间的 REE 有成因联系,同时说明矿体和矽卡岩的形成可能与花岗质岩密切相关。研究表明,在成矿后期的地质作用下,矿石中的稀土元素特征几乎不发生改变,而是仍然保持着成矿热液的稀土元素特征。因此,结合磁铁矿矿石稀土元素特点可知,矿体的形成与矽卡岩和花岗质岩之间有着密切的联系。

综上所述,程潮矿区花岗质岩与矽卡岩和矿体在空间、时间和成因上有着重要的联系。另外,本文主要以矿区的花岗质岩为对象,探讨了其与成矿的关系,而闪长质岩在成矿过程中的作用还需进一步研究和探讨。

6 结 论

1) 矿体与花岗质岩、矽卡岩和退化蚀变岩的接触关系密切,矿体中往往存在花岗质岩角砾,且花岗岩的成岩年龄与矿体的成矿年龄相近,暗示它们在时间和空间上存在着密切的联系。

2) 稀土元素分析结果表明矿区花岗岩和石英二长斑岩具有相似的稀土元素配分模式,都具有右倾、轻稀土富集、Eu 负异常和 Ce 无明显异常的特点,暗示它们具有相同的来源;大理岩的稀土元素配分模式为右倾、轻稀土富集、Eu 负异常和 Ce 无明显异常;矿区石榴子石、绿帘石和磁铁矿矿石的稀土元素配分模式具有右倾、轻稀土富集、Eu 正异常和 Ce 无明显异常的特点。这些特征暗示它们是在一种高温、高氧逸度、Eu 较富集的流体环境中形成的。

3) 结合地质特征和稀土元素化学特征可知,程潮铁矿的花岗质岩与矽卡岩和矿体在时间、空间和成因上都有着密切的联系。

致谢:野外工作期间得到了武汉钢铁集团矿业有限公司程潮铁矿地测科各位工程师、中国地质大学杨海波硕士、于森硕士等同志的大力支持和帮助;在论文撰写过程中得到了中国地质科学院矿产资源研究所杨富全研究员的热情帮助和指导;审稿专家对论文提出了许多宝贵的意见和建议,在此一并致以衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, et al. Molybdenite Re-Os and albite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry

- systems in the Changjiang valley and metallogenic implications [J]. *Ore Geology Reviews*, 2006, 29:307-324.
- [2] Mao J W, Xie G Q, Duan C, et al. A tectono-genetic model for porphyry - skarn - stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite - apatite deposits along the Middle - Lower Yangtze River Valley, Eastern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 34:294-314.
- [3] 舒全安, 陈培良, 程建荣, 等. 鄂东铁铜地质[M]. 北京:冶金工业出版社, 1992:1-532.
- Shu Quanan, Chen Peiliang, Cheng Jianrong, et al. *Geology of Iron-copper Deposits in Eastern Hubei Province* [M]. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1992, 1-532 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李均权, 谭秋明, 李江洲. 湖北省矿床成矿系列[M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 2005:187-241.
- Li Junquan, Tan Qiuming, Li Jiangzhou. *Minerogenetic Series of Hubei* [M]. Wuhan: Science and Technology Press of Hubei, 2005: 187-241 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王永基. 中国铁矿勘查回顾[J]. *江苏地质*, 2007, 3(3):161-164.
- Wang Yongji. Review of China iron deposit prospecting [J]. *Jiangsu Geology*, 2007, 31(3):161-164 (In Chinese with English abstract).
- [6] 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京:地质出版社, 1992:1-120.
- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Lin Xinduo, et al. *Fe-Cu (Au) Metallogeny of the Middle-Lower Changjiang Region* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992:1-120 (in Chinese with English abstract).
- [7] 陈洪新. 鄂东南程潮铁矿区矿化与三叠系蒸发岩的关系 [J]. *中国地质科学院地质力学研究所所刊*, 1993, 15:163-176.
- Chen Hongxin. Relationship of the Triassic evaporate beds with the mineralization of iron ores in Chengchao, Southeastern Hubei province [J]. *Bulletin of the Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences*, 1993, 15:163-176 (in Chinese with English abstract).
- [8] 姚培慧, 王可南, 杜春林, 等. 中国铁矿志[M]. 北京:冶金工业出版社, 1993:1-662.
- Yao Peihui, Wang Kenan, Du Chunlin, et al. *Records of Chinese Iron Ore Deposits* [M]. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1993: 1-662 (in Chinese with English abstract).
- [9] 闵厚禄, 徐伯骏, 季翔, 等. 程潮铁矿矿石微量元素因子分析[J]. *金属矿山*, 2008, (9):93-96.
- Min Houlu, Xu BoJun, Ji Ao, et al. Factor analysis of trace elements of Chengchao Iron Ore [J]. *Metal Mine*, 2008, (9):93-96 (in Chinese with English abstract).
- [10] 骆地伟. 程潮铁矿接触带构造研究与深部找矿[D]. 武汉:中国地质大学硕士学位论文, 2008:1-59.
- Luo Diwei. Study on Contact Zone Tectonic and Deep Exploration in Chengchao Iron Deposits, Hubei Province [D]. Master thesis of Wuhan: China University of Geosciences, 2008:1-59 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王磊, 胡明安, 张旺生, 等. 鄂东南程潮铁矿构造控矿特征及找矿方向[J]. *金属矿山*, 2009, (4):74-77.
- Wang Lei, Hu Mingan, Zhang Wangsheng, et al. Structural ore-controlling characteristic and prospecting direction in Chengchao Iron Deposit in Southeast Hubei [J]. *Metal Mine*, 2009, (4):74-77 (in Chinese with English abstract).
- [12] 夏金龙, 胡明安, 徐伯骏, 等. 湖北程潮铁矿成矿物质来源的地球化学制约[J]. *现代地质*, 2009, 23(2):285-291.
- Xia Jinlong, Hu Mingan, Xu Bojun, et al. Geochemistry constraint on the ore-forming materials of the Chengchao Iron Deposit, Hubei Province [J]. *Geoscience*, 2009, 23(2):285-291 (in Chinese with English abstract).
- [13] Xie G Q, Mao J W, Li R L, et al. Geochemistry and Nd - Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle -Lower Yangtze River belt, Eastern China: petrogenesis and tectonic setting [J]. *Lithos*, 2008, 104: 216-230.
- [14] Xie G Q, Mao J W, Zhao H J, et al. Zircon U - Pb and phlogopite ⁴⁰Ar-³⁹Ar age of the Chengchao and Jinshandian skarn Fe deposits, southeast Hubei Province, Middle -Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, China [J]. *Miner Deposita*, 2012, 47(6):633-652.
- [15] Xie G Q, Mao J W, Zhao H J. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Late Mesozoic intrusions in the southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt (MLYRB), East China [J]. *Lithos*, 2011, 125:693-710.
- [16] 毛景文, 段超, 刘佳林, 等. 陆相火山-侵入岩有关的铁多金属矿成矿作用及矿床模型—以长江中下游为例 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(1):1-14
- Mao Jingwen, Duan Chao, Liu Jialin, et al. Metallogeny and corresponding mineral deposit model of the Cretaceous terrestrial volcanic-intrusive rock-related polymetallic iron deposits in Middle-Lower Yangtze River Valley [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(1):1-14 (in Chinese with English abstract).
- [17] 姚磊, 谢桂青, 张承帅, 等. 鄂东南矿集区程潮大型矽卡岩铁矿的矿物学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(1):133-146.
- Yao Lei, Xie Guiqing, Zhang Chengshuai, et al. Mineral characteristics of skarns in the Chengchao large-scale Fe deposit of southeastern Hubei Province and their geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28 (1):133-146 (in Chinese with English abstract).
- [18] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带 [M]. 北京:地质出版社, 1991:1-90.
- Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. *The Copper-iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991:1-90 (in Chinese with English abstract).
- [19] Pei RF and Hong DW. The granites of South China and their metallogeny [J]. *Episodes*, 1995, 18:77-86.
- [20] Ishihara S. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks [J]. *Mining Geology*, 1977, (27):293-305.

- [21] Zhang Q, Jian P, Liu D Y, et al. SHRIMP dating of volcanic rocks from Ningwu area and geological implication [J]. Science in China(Series D), 2003, 33:830-837.
- [22] 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京:地质出版社,1998, 60-85.
Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng, et al. Geology of Copper-gold Polymetallic Deposits in the Along Changjiang Area of Anhui Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998:60-85(in Chinese with English abstract).
- [23] 裴荣富. 中国矿床模式[M]. 北京:地质出版社, 1995:1-357.
Pei Rongfu. Chinese deposit modeling [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995:1-357(in Chinese with English abstract).
- [24] 周涛发, 范裕, 袁锋. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 2008, 24(8):1665-1678.
Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8):1665-1678(in Chinese with English abstract).
- [25] 中国冶金地质总局中南地质勘查院. 程潮铁矿深部增加储量勘探报告[R]. 2008.
Geological Exploration Institute of South China. Deep exploration and Reserve Report of the Chengchao Fe Deposit [R]. 2008.
- [26] 赵斌, 赵劲松, 刘海臣. 长江中下游地区若干 Cu (Au)、Cu-Fe (Au) 和 Fe 矿床中钙质矽卡岩的稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 1999, 28(2):113-125.
Zhao Bin, Zhao Jinsong, Liu Haichen. REE geochemistry for vein calcareous skarns from some iron-copper (gold) deposits along the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River [J]. Geochimica, 1999, 28(2):113-125(in Chinese with English abstract).
- [27] 肖成东, 刘学武. 东蒙地区矽卡岩石榴石稀土元素地球化学及其成因[J]. 中国地质, 2002, 29(3):311-316.
Xiao Chengdong, Liu Xuewu. REE geochemistry and origin of skarn garnets from eastern Inner Mongolia [J]. Geology in China, 2002, 29(3):311-316(in Chinese with English abstract).
- [28] 杨富全, 毛景文, 徐林刚, 等. 新疆蒙库铁矿床稀土元素地球化学及对铁成矿作用的指示 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (10):2443-2456.
Yang Fuquan, Mao Jingwen, Xu Lingang, et al. REE geochemistry and the indication for iron mineralization of Mengku iron deposit in Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10):2443-2456 (in Chinese with English abstract).
- [29] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J (eds). Magmatism in Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [30] Yang FQ, Wu H, Pirajno F, et al. The Jiashan syenite in northern Heber: A record of lithospheric thinning in the Yanshan intracontinental orogenic belt [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 29:619-636.
- [31] Bau M, Dulski P. Anthropogenic origin of positive gadolinium anomalies in river waters [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1996, 143: 245-255.
- [32] Anders E, Greves N. Abundances of the elements: Metaoritic and solar [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53:197-214.
- [33] Bau M. Rare earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and significance of the oxidation state of europium [J]. Chemical Geology, 1991, 93:219-230.
- [34] Klinkhammer G P, Elderfield, Edmond J M, et al. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluid from mid-ocean ridges [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, 58 (23):5105-5113.
- [35] Hass J R, Shock E L, Sassani D C. Rare earth elements in hydrothermal systems: Estimates of standard partial modal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, 59(21):4329-4350.
- [36] 丁振举, 刘丛强, 姚书振, 等. 东沟坝多金属矿床矿质来源的稀土元素地球化学限制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33 (4):437-442.
Ding Zhenju, Liu Congqiang, Yao Shuzhen, et al. The REE constraints on ore sources of the Donggouba polymetallic deposit [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33 (4):437-442 (in Chinese with English abstract).
- [37] 赵劲松, 邱学林, 赵斌, 等. 大冶-武山矿化矽卡岩的稀土元素地球化学研究[J]. 地球化学, 2007, 36(4):400-412.
Zhao Jinsong, Qiu Xuelin, Zhao Bin, et al. REE geochemistry of mineralized skarns from Daye to Wushan region, China [J]. Geochimica, 2007, 36 (4):400-412 (in Chinese with English abstract).
- [38] DeBaar H J W, Bacon M P, Brewer P G. Rare earth elements in the Pacific and Atlantic oceans. Geochim [J]. Cosmochim. Acta, 1985, 49:1943-1959.
- [39] 杨兴莲, 朱茂炎, 赵元龙, 等. 黔东南震旦系-下寒武统黑色岩系稀土元素地球化学特征[J]. 地质论评, 2008, 54(1):3-15.
Yang Xinglian, Zhu Maoyan, Zhao Yuanlong, et al. REE geochemical characteristics of the Ediacaran-Lower Cambrian black rock series in Eastern Guizhou [J]. Geological Review, 2008, 54(1):3-15 (in Chinese with English abstract).
- [40] Hanson G N. Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous systems [J]. Ann. Rev. Earth & Planet Sci., 1980, 8:371-406.
- [41] Henderson P. Rare earth element geochemistry [J]. New York: Elsevier Science Publishers B V, 1984, 10.
- [42] 葛朝华, 韩发. 马坑铁矿床稀土元素地球化学研究[J]. 矿床地质, 1984, 3(1):1-10.
Ge Chaohua, Han Fa. Geochemistry of rare earth elements in the Makeng iron deposit [J]. Mineral Deposits, 1984, 3 (1):1-10 (in Chinese with English abstract).
- [43] Frietsch R, Perdahl J A. Rare earth elements in apatite and

magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types [J]. *Ore Geology Reviews*, 1995, 9: 489–510.

[44] 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠. 迤纳厂稀土铁铜矿床稀土元素地球化学[J]. *矿物学报*, 2004, 24(3): 301–308.

Yang Yaomin, Tu Guangchi, Hu Ruizhong. REE geochemistry of Yinachang Fe–Cu–REE deposit in Yunnan Province [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24 (3): 301–308 (in Chinese with English abstract).

The relationship between granitoids and mineralization of the Chengchao large-size skarn iron deposit in southeastern Hubei ore concentration area

YAO Lei¹, LIU Jia-lin², WANG Jian¹, MENG Wei-feng³, YUE Liang⁴

(1. Faculty of Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 3. Inner Mongolia Geological Engineering Co., Ltd., Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 4. College of Mining Engineering, Jiangsu Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: Located on the southern margin of Echeng batholith in the southeastern Hubei ore concentration area, the Chengchao iron deposit is the largest skarn iron deposit in the Middle - Lower Yangtze River Valley metallogenic belt. The ore deposit occurs along the contact between granitoids and carbonates or between granitoids and diorites. Ore bodies, granitoids and skarns have close contact relationships. REE analyses show that the chondrite-normalized REE patterns of garnets, epidote and magnetite ores in the Chengchao iron deposit are similar to each other and enriched in LREE (light REE) with Eu positive anomaly and without Ce anomaly, implying that they were formed in an oxidation environment by magmatic fluids characterized by high temperature and richness of Eu. The REE characteristics of granitoids, skarns and ores indicate their close genetic relationships. Geological and REE geochemical features show that granitoids, skarns and ore bodies are closely related to each other in time, space and genesis.

Key words: southeastern Hubei Province; skarn; Chengchao iron deposit; granitoids

About the first author: YAO Lei, male, born in 1986, doctor candidate, majors in earth exploration and information technology; E-mail: lemmon20054255@yahoo.com.cn.