福建马坑铁矿床地质与地球化学*

张承帅[1,2]，毛景文[2]，张长青[2]，李 莉[3]

（1 中交投资有限公司，北京 100029；2 中国地质科学院矿产资源研究所，北京 100037；
3 中国地质图书馆，北京 100083）

马坑铁（钼）矿床是闽西南地区的一个重要的大型铁多金属矿床，为华南地区最大的铁矿床。本文在充分收集并总结前人研究成果的基础上，对矿床成因类型、成矿岩体成因及构造背景、成矿物质来源、成矿流体性质、成矿机制及成矿模型等一系列科学问题做了较为深入的研究和探讨，取得了如下主要认识：

（1）马坑铁矿主矿体为大型似层状隐伏矿体，赋存于莒舟-大洋花岗岩体外接触带黄龙组（C_2h）灰岩和林地组（C_1l）碎屑岩层间构造破碎带中，矽卡岩与矿体密切共生。铁矿石类型以石榴子石磁铁矿、透辉石（次透辉石）磁铁矿、石英磁铁矿为主；矿石构造主要呈致密块状和斑杂状，矿石结构常见交代残余结构、似海绵陨铁结构。钼矿矿石主要呈石英-辉钼矿脉或浸染状产于矽卡岩和磁铁矿中。围岩蚀变以矽卡岩化为主。矽卡岩分带明显，小的手标本清晰可见，大的可涉及整个矿床。矿床的形成经历了矽卡岩阶段、退化蚀变阶段、石英硫化物-碳酸岩阶段，其中退化蚀变阶段为主成矿期；

（2）利用 LA-ICP-MS 方法测得大洋花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 127 Ma 和 128 Ma，用 SHRIMP 锆石 U-Pb 方法测得大洋岩体年龄为（132.6±1.3）Ma，利用 LA-ICP-MS 方法测得莒舟花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 125 Ma、126 Ma、129 Ma、130 Ma 和 130 Ma，大洋和莒舟岩体都形成于早白垩世岩石圈伸展的背景下。利用 LA-ICP-MS 方法测得辉绿岩的锆石 U-Pb 年龄为 303 Ma 和 64 Ma，表明闽西南晚石炭世和古新世发生地壳拉张（裂谷）事件。

（3）大洋-莒舟花岗岩具高硅、富碱、贫钙镁和高分异指数等特点，属弱过铝或准铝质花岗岩；岩石稀土元素含量较高，稀土元素配分模式呈轻稀土富集并缓向右倾斜，呈明显铕负异常的“V”型展布；微量元素具有 Rb、U、Th、La 等元素强烈富集而 Ba、Sr、P、Ti 等元素相对亏损的特点；大洋岩体的$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$值变化于 0.70878～0.71349 之间；εNd(t)值变化于-7.2～-8.6 之间，$f_{(Sm/Nd)}$=-0.27～0.16，T_{2DM} =1511～1637Ma，$(^{206}Pb/^{204}Pb)_i$=18.588～18.955，$(^{207}Pb/^{204}Pb)_i$=15.660～15.682，$(^{208}Pb/^{204}Pb)_i$=38.935～39.168，μ值介于 9.54～9.59，ω 值介于 36.77～38.13。岩石地球化学和同位素组成特征表明大洋-莒舟花岗岩属于高分异壳源型花岗岩，主要来源于元古代地壳物质，有 EMⅡ型富集地幔组分的参与，使花岗岩的地壳留存年龄的降低（1.51～1.63 Ga）。

（4）马坑矽卡岩矿物组合主要为辉石、石榴子石和钙蔷薇辉石，退化蚀变岩的矿物组合为角闪石、绿帘石、绿泥石、石英等，其中单斜辉石以透辉石和钙铁辉石为主，仅存在少量锰钙辉石，似辉石成分为钙蔷薇辉石和蔷薇辉石；石榴子石以钙铁榴石为主，伴生少量钙铝榴石；角闪石属于钙角闪石。

*本文为国家重点基金项目：华南地区中生代板内成矿作用及其动力学背景（编号：40930419）和成矿作用与资源评价重点实验室开放研究项目(编号：ZS1104)资助成果
第一作者简介 张承帅，男，1985 年生，博士，主要从事矿床学及矿床地球化学研究，Email：zhangchengshuai@gmail.com

（5）石榴子石、辉石、黄铁矿和磁铁矿矿石的稀土分配模式具有相似性，多为轻稀土富集，正铕异常，基本无铈异常，表明其成矿环境为氧化环境，暗示它们之间存在成因联系。矿体附近大理岩和交代岩内稀土元素特征出现规律性变化，表明它们与岩浆热液的交代作用有关，碎屑岩和褪色辉绿岩可能提供了部分铁质。

（6）流体包裹体类型主要有气体包裹体、液体包裹体、含子矿物三相包裹体和少量富 CO_2 包裹体，其中以液体包裹体为主。激光拉曼探针和色谱分析表明，气体组成均以 CO_2、H_2O、N_2、O_2 为主，其次为 CH_4、C_2H_4、C_2H_6 和少量 C_2H_2，液相成分中阳离子以 Na^+、K^+和 Mg^{2+}为主，其次为 Ca^{2+}和少量 Li^+，阴离子以 SO_4^{2-}、F^-、Cl^-为主，还含有少量 Br^-、NO_3^-。矽卡岩阶段均一温度分布于 460～600℃之间，盐度集中于（6%～24%）和（32%～44%）两个区间。退化蚀变阶段的包裹体均一温度分布在 260～540℃，盐度分布于（4%～16%）和（36%～44%）之间。石英-硫化物阶段的均一温度分布于 160～400℃之间，盐度集中在 0%～4%。

（7）方解石脉和方解石磁铁矿的 $\delta^{13}C$＝-2.17‰～-7‰），$\delta^{18}O_{SMOW}$＝4.28‰～12.05‰，大理岩的 $\delta^{13}C_{PDB}$=1‰～6.69‰，$\delta^{18}O_{SMOW}$=5.08‰～11.6‰，表明碳来源主要由岩浆-地幔经溶解作用所提供，且受到了低温蚀变作用和大气降水的影响。

（8）矽卡岩阶段的 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为 6.17‰，$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为-63‰。退化蚀变阶段的磁铁矿阶段的 $\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值总体上偏低，除一个透辉石为-57.3‰外，其余集中在-84‰～92.9‰之间，$\delta^{18}O_{H2O}$ 变化范围较大，分布在 1.4‰-11.9‰之间，至石英-硫化物阶段的 $\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为（-47‰～-66‰），$\delta^{18}O_{H2O}$ 值（-5.5‰～-1.4‰）；磁铁矿的 $\delta^{18}O$ 集中在-1‰～3‰，平均 1.2‰。说明成矿流体以岩浆水为主，晚期有大气降水混入。

（9）$\delta^{34}S$ 变化范围较宽（-17.9‰～4.8‰），平均值-1.9‰，但是矿石的硫化物的同位素比值十分稳定，变化范围较窄，表明马坑铁矿床的的硫具有混合来源，主要自深源地幔，部分混染了围岩中沉积成因硫；7 件辉钼矿样品中 5 个样品 Re 质量分数为（0.47～5.14）$\times10^{-6}$，另外 2 个分别为 51.87×10^{-6} 和 186.2×10^{-6}，显示辉钼矿的 Re 主要源至上地壳，混有部分幔源组分；铁质的来源具有多样性，主要来自深源。总的来说，马坑矿床的成矿物质主要来源于地幔，存在部分围岩或地壳物质的加入。

（10）利用 Re-Os 同位素方法测得矿石中 7 件辉钼矿样品，获得的模式年龄为（131.9±1.9）Ma～（133.3±2.3）Ma，模式年龄加权平均年龄为（133.0±0.8）Ma，表明马坑铁（钼）矿床的成矿作用发生于早白垩世，与莒舟-大洋花岗岩体的侵位年龄一致，表明为同一构造-岩浆-流体活动的产物。

（11）早白垩世马坑铁（钼）矿的成矿可能为与太平洋板块俯冲引起弧后岩石圈伸展有关，是中国东部燕山期第三次大规模成矿作用的开端。从岩浆结晶分异到热液成矿的整个演化过程中经历了两种不同的液态不混溶作用，表明成矿过程中成矿流体（局部）发生过多次流体沸腾作用；岩浆热液的相分离及其与大气降水的混合作用和减压沸腾作用是马坑铁（钼）矿形成的主要原因。

（12）综合上述详细的研究，马坑铁矿为一层控矽卡岩型铁矿床。