

安徽铜陵马山金硫矿床稀土元素和稳定同位素地球化学研究

田世洪^{1, 2)}, 侯增谦^{2, 3)}, 杨竹森¹⁾, 丁悌平^{1, 2)}, 蒙义峰¹⁾, 曾普胜⁴⁾, 王彦斌³⁾, 王训诚⁵⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037; 2) 国土资源部同位素地质重点实验室, 北京, 100037;
3) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 4) 云南财贸学院资源环境系, 昆明, 650221;
5) 安徽省地质矿产局 321 地质队, 铜陵, 244033

内容提要:安徽铜陵铜官山铜矿田是中国长江中、下游铁、铜、硫、金成矿带中著名的矽卡岩型矿床。马山金硫矿床位于安徽铜陵铜官山矿田, 侵入岩体为天鹅抱蛋山石英闪长岩。文章通过对马山金硫矿床的氢、氧、碳、硫、硅同位素组成和稀土元素地球化学特征研究, 探讨成矿溶液中水、碳、硅和硫的来源以及成矿溶液的演化问题。研究表明, 稀土元素球粒陨石标准化组成模式为右倾型, 矿石的稀土配分曲线类似于天鹅抱蛋山石英闪长岩, 认为形成该矿床的热液流体主要来源于闪长质熔体。马山金硫矿床矿石中石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}-\text{SMOW}}$ 变化范围为 6.9‰~10.7‰, 平均为 8.7‰, 与岩体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值(9.3‰~11.1‰, 平均为 10.0‰)比较接近, 而矿石中石英的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 变化范围为-69‰~-62‰, 表明矿石成矿流体主要来自岩浆。矿石中方解石的碳、氧同位素组成与矿区围岩的碳、氧同位素组成明显不同, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值分别为-5.2‰~-3.6‰和 12.2‰~12.9‰, 与岩浆作用形成的 CO_2 的碳、氧同位素组成一致, 表明矿石中方解石的碳、氧来源于岩浆作用。硅和硫具深部岩浆或岩浆热液水来源的特点。

关键词: 地球化学; 稀土元素; 稳定同位素; 马山金硫矿床; 安徽铜陵

马山金硫矿床位于著名的铜陵铜官山矿田内, 矿体以金、硫为主, 并伴有铜、铅、锌、砷等多种元素, 其中金金属量为 45.8 吨, 硫元素量为 607.7 万吨, 砷元素量为 18.8 万吨, 是一大型的高砷硫金矿床(俞沧海和袁小明, 2002)。自 20 世纪 70 年代末期发现以来, 其成因一直为人们所关注, 相继提出层控型(车树政, 1982)、岩浆热液型(周真和汪正琼, 1982; 周真, 1984; 李学明等, 1987; 王兆荣等, 1996; 杜杨松等, 2000; Du Yangsong et al., 2003)、沉积加后期热液改造型(杨兵, 1985)、海底火山喷气沉积型(顾连兴和徐克勤, 1986; 王道华, 1987; Gu et al., 1993)。笔者在收集整理前人资料基础上, 通过对马山金硫矿床各种围岩地层和部分矿石的稀土元素地球化学特征和硫、碳、氧、硅、氢同位素组成的系统研究, 探讨成矿溶液中水、碳、硅和硫的来源以及成矿溶液的演化问题, 为了解热液和成矿物质的来源提供依据, 为在该区进一步寻找有关矿床提供科学依

据。

1 矿区地质概况

马山金硫矿床位于安徽省铜陵市区的东北端。矿区大地构造位置属扬子准地台下扬子凹陷沿江台褶带的中段。马山金硫矿床产在铜官山不对称背斜转折端靠近轴部的东南翼, 天鹅抱蛋山岩体的东侧(图 1)。地表出露二叠系、三叠系中下统地层, 深部经钻孔揭露有石炭系船山组、黄龙组和泥盆系上统的五通组。其中石炭系是最主要的容矿围岩, 主要岩性包括中部的厚层状白云岩和石灰岩及上部的厚层状石灰岩、球状灰岩。二叠系由下向上主要是一套由含燧石灰岩及沥青质灰岩→硅质岩、硅质页岩、含锰页岩→砂质页岩组合。在中石炭统, 发育有多层沉积黄铁矿层, 并且具有区域上的稳定性(王道华, 1987)。主要地层及岩性见图 2。上述各层之间除黄龙组与船山组之间为整合接触外, 其余均为假

注: 本文为国土资源部科技司专项研究计划(编号 20010103)、国家自然科学基金重点项目(编号 40234051)和国土资源部重点科技项目(编号 20010209)资助的成果。

收稿日期: 2007-05-12; 改回日期: 2007-06-24; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 田世洪, 男, 1973 年生。副研究员, 主要从事矿床学和同位素地球化学研究工作。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号; 电话: 010-68999547; Email: tiansh2002@sina.com。

整合接触,彼此化学成分,物理性质有明显的差异,在褶皱变形的过程中易产生层间滑动、破碎、为后来矿液提供运移通道,并在不同岩性界面或附近有利层位中形成层状、似层状矿体,少数为整合透镜状或复合脉状矿体(王秀娟,1981)。

天鹅抱蛋山岩体出露面积仅 0.8 km²,地表略呈“人”字形,向东南方向超覆于二叠系栖霞组之中(图 1 和 3),经研究证实为多次侵入的复式杂岩体,主体为石英闪长岩。钾—氩法全岩年龄为 143Ma(周真和汪正琼,1982),属燕山早期。岩体为中—浅成相小岩体,其演化系列为闪长岩→石英闪长岩→花岗闪长岩→微文象白岗岩。根据卫片、航片及物探重磁异常等资料分析,认为该岩体与铜官山、金口岭及虎山等邻近的中酸性小岩株都是深部大岩浆房的同源派生产物(周真,1984)。

主要断裂有北北东向、北西向和北东向的三组层间裂隙,具多期活动的特点,对岩体和矿体的形成有明显的控制作用。

2 矿床地质特征

主要矿体均为隐伏矿体,赋存在-100m 以下的层间矿化带内。矿化带长 1400m,平均厚 15m 左右,主要沿黄龙组白云岩段(下段)与纯灰岩段(上段)之间,以及船山组灰岩与栖霞组灰岩,黄龙组与船山组,黄龙组与上泥盆统五通组之间的层间破碎(剥离)带发育(图 2 和 3)。主要赋矿围岩为大理岩。矿床中共有大小矿体 44 个,其中主要矿体 5 个,赋存层位是: I 号在栖霞组与船山组之间, II、IV、V 号在黄龙组上、下岩性段之间,但偏于上段的大理岩之中, III 号在黄龙组与五通组之间。矿体形态较简单,呈似层状、透镜状和脉状,有分枝—复合,膨大—缩小,尖灭—再现的现象。矿体内部见有大理岩角砾,硫化物矿脉常斜切围岩层理,表明矿体受构造控制(周真,1984)。矿体与围岩的界线主要呈突变接触。矿体沿倾斜断续分布在三个不同深度范围内:即-100~-300m, -400~-500m, -850m 左右。浅部(-200m 以上)矿体向南东东缓倾,倾角 15°~35°;深部(-200m 以下)则同向陡倾,倾角 65°~85°。金矿体赋存在硫化物矿体内,两者基本吻合,或者金矿体出现在硫化物矿体的顶部或底部,或者在硫化物矿体中断续出现。金主要以自然金、银金矿产在黄铁矿、磁黄铁矿中。

矿石的矿物组成较复杂,主要为磁黄铁矿、黄铁矿、毒砂、胶状黄铁矿和菱铁矿,其次有少量闪锌矿、

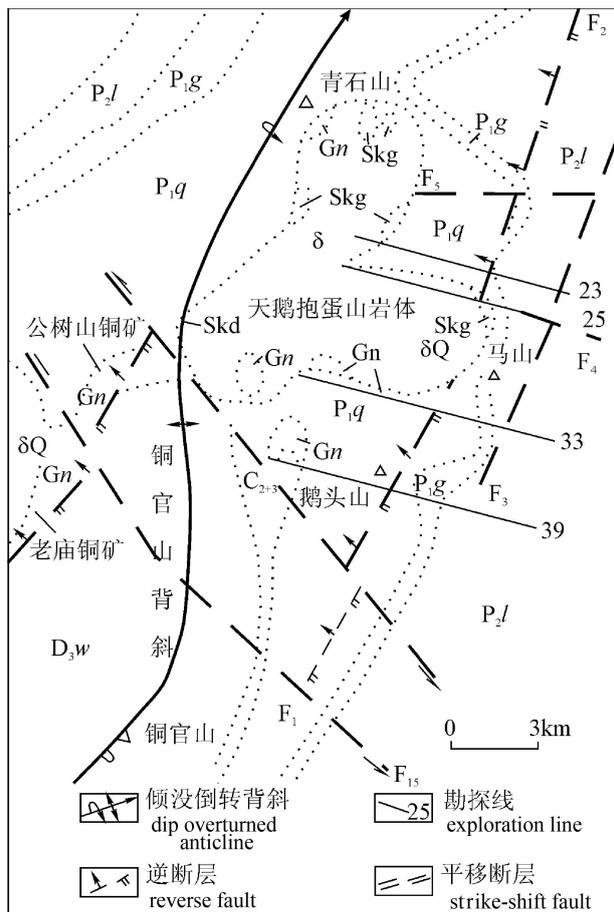


图 1 安徽铜陵马山金硫矿床地质略图
(据周真修改,1984)

Fig. 1 Geological summary map of the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province (modified from Zhou Zhen, 1984)

P₂l—龙潭组; P₁g—孤峰组; P₁q—栖霞组; C₂₊₃—黄龙组、船山组; D₃w—五通组; δ—闪长岩; δQ—石英闪长岩; Skg—石榴子石夕卡岩; Skd—透辉石夕卡岩; Gn—铁帽; F₁—断层
P₂l—Longtan Formation; P₁g—Gufeng Formation; P₁q—Qixia Formation; C₂₊₃—Huanglong and Chuanshan Formation; D₃w—Wutong Formation; δ—diorite; δQ—quartz diorite; Skg—garnet skarn; Skd—diopside skarn; Gn—iron cap; F₁—fault

黄铜矿、磁铁矿、方铅矿和微量的辉钼矿、白铁矿、方黄铜矿、自然铋、碲铋矿等。金矿物有自然金、含银自然金和银金矿。非金属矿物有石英、方解石、白云石,以及蛇纹石、滑石、绿泥石、石榴石等。

矿石构造以块状为主,其次为浸染状。矿石结构以自形—半自形晶粒状为主,其次有各种图案的交代结构。

矿石类型主要有块状硫化物和浸染状硫化物两类,以前者为主,占 75% 以上。块状硫化物矿石的

平均品位: $Au 10.1 \times 10^{-6}$ (最高可达 376×10^{-6}); $Ag 36.1 \times 10^{-6}$; $S 33.5\%$ (最高 49.68%); $Fe 42.57\%$; $As 4.24\%$; $Cu 0.12\%$; Pb 和 $Zn < 0.2\%$; 浸染状矿石 (含金黄铁矿化大理岩): $Au 6.75 \times 10^{-6}$; $S 12.0\%$ (唐永成等, 1998)。

除 III 号矿体外, 围岩蚀变作用不甚发育, 主要有硅化、碳酸盐化和黄铁矿化。III 号矿体的围岩蚀变较强烈, 主要有蛇纹石—滑石化、硅化和绿泥石化; 局部有夕卡岩化, 可形成石榴石夕卡岩和透辉石夕卡岩等。

系	统	地层名称	代号	柱状图	矿化层位		厚度 (m)	主要岩性
					主	次		
第四系		近代堆积	Q				0~20	粘土夹砂砾
二叠系	上统	龙潭组	P ₂ l				60 90	页岩夹砂岩、顶部夹炭质页岩
	下统	孤峰组	P ₁ g				20~30	硅质岩、硅质页岩、含锰页岩
		栖霞组	P ₁ q				108~206	石灰岩含燧石灰岩及沥青质灰岩
石炭系	上统	船山组	C ₃ c				10~20	厚层块状石灰岩、球状灰岩
	中统	黄龙组	上段石灰岩	C ₂ h ²			30 35	厚层块状石灰岩
			下段白云岩	C ₂ h ¹			7 20	厚层块状白云岩
		五通组	D ₃ w				不全	砂页岩、粉砂岩、石英砂岩、石英岩

图 2 安徽铜陵马山金硫矿床地层柱状剖面图 (据周真修改, 1984)

Fig. 2 Histogram for strata from the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province (modified from Zhou Zhen, 1984)

3 分析方法

3.1 稀土元素分析方法

将要测定的样品粉碎、研磨至 200 目以下粉末备用。样品前处理采用酸溶法, 分析仪器为 ICP-MS, 以 In 作内标, 分析精度可达 10^{-9} , 并以标准样品和重复测试的样品数据控制分析质量, 分析工作在地球物理地球化学勘查研究所完成。分析样品主要取自 -160m 中段。

3.2 稳定同位素分析方法

此次工作分析了马山金硫矿床中岩石、矿石的代表性样品的 H、O、C、S 和 Si 同位素组成。所有同位素分析均在国土资源部同位素地质重点实验室利用 MAT-253EM 型质谱计完成。硫化物矿样以 Cu_2O 作氧化剂制备 SO_2 , 分析精度为 $\pm 0.2\%$, 相对标准为 V-CDT。碳酸盐样品采

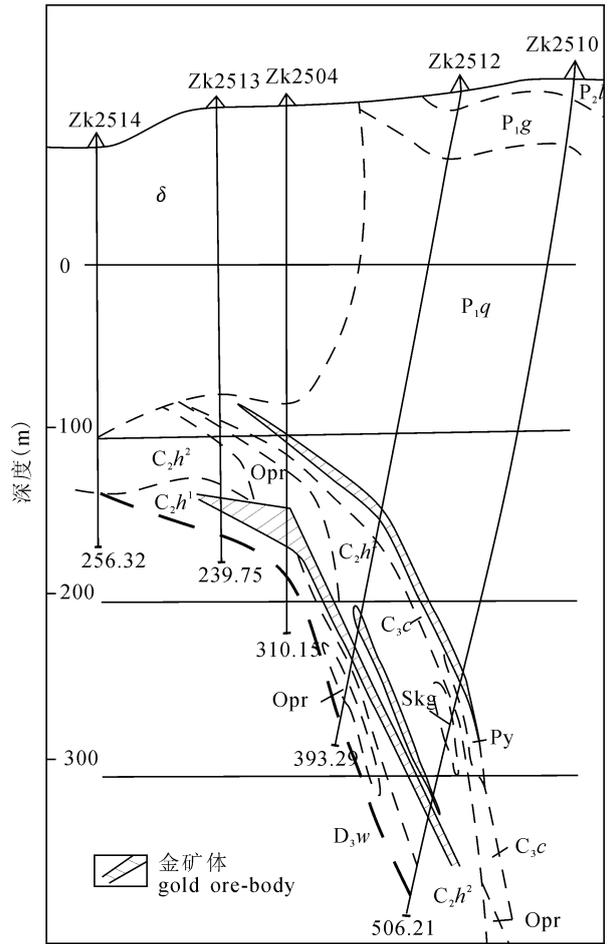


图 3 安徽铜陵马山金硫矿床 25 线剖面图 (据周真修改, 1984)

Fig. 3 25 line section of the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province(modified from Zhou Zhen,1984)
P₂l—龙潭组; P₁g—孤峰组; P₁q—栖霞组; C₃c—船山组; C₂h²—黄龙组上段; C₂h¹—黄龙组下段; D₃w—五通组; δ—闪长岩; Skg—石榴子石夕卡岩; Py—黄铁矿; Opr—磁铁矿
P₂l—Longtan Formation; P₁g—Gufeng Formation; P₁q—Qixia Formation; C₃c—Chuanshan Formation; C₂h²—Upper Member of the Huanglong Formation; C₂h¹—Lower Member of the Huanglong Formation; D₃w—Wutong Formation; δ—diorite; Skg—garnet skarn; Py—pyrite; Opr—magnetite

用 McCrea (1950) 描述过的正磷酸方法, 将不同碳酸盐岩矿物与 100% 的 H_3PO_4 在不同的温度下反应产生 H_2O 和 CO_2 气, 并通过恒温震荡使之达到氧同位素平衡, 收集 CO_2 气体, 分析精度均为 $\pm 0.2\%$ 。C 和 O 相对标准分别为 V-PDB 和 V-SMOW。硅同位素分析样品是在高温下与 BrF_5 反应生成 SiF_4 气体, 再经丙酮—干冰多次反复纯化, 最后通过 $70^\circ C$ 金属锌管进一步纯化获得

纯净的 SiF_4 气体,送质谱测定。详细过程可参见丁梯平等(1994)资料。分析精度优于 $\pm 0.1\%$, 相对标准为 NBS-28。对硅酸盐样品的氧同位素分析则采用传统的 BrF_5 分析方法 (Clayton et al., 1963), 用 BrF_5 与含氧矿物在真空和高温条件下反应提取矿物氧, 并与灼热电阻——石墨棒燃烧转化成 CO_2 气体, 分析精度为 $\pm 0.2\%$, 相对标准为 V-SMOW。选取 40~60 目的纯净石英、方解石样品, 在 150°C 低温下真空去气 4 小时以上, 以彻底除去表面吸附水和次生包裹体水, 然后在 400°C 高温下爆裂取水, 并与金属锌反应生成 H_2 , 分析精度为 $\pm 2\%$, 相对标准为 V-SMOW。

4 分析结果及讨论

4.1 稀土元素地球化学特征

采用 ICP-MS 方法对 -160 中段的围岩及矿石进行了稀土元素分析, 分析数据见表 1, 稀土配分曲线如图 4 所示。其特征值计算于表 2。

由表 1、表 2 和图 4 可见本区稀土特征如下:

(1) 稀土元素球粒陨石标准化配分模式(图 4 A 和 B)显示 LREE 相对富集, 球粒陨石标准化曲线为右倾单斜, 具明显 Ce 值负异常。

(2) 马山金硫矿床矿石与赋存的天鹅抱蛋山岩体石英闪长岩等的稀土元素球粒陨石标准化配分模式显示 LREE 相对富集, 从石英闪长岩到矿石, 稀土总量 ΣREE 降低 ($203.6 \times 10^{-6} \sim 209.2 \times 10^{-6}$, 平均为 $207.2 \times 10^{-6} \rightarrow 3.8 \times 10^{-6} \sim 51.2 \times 10^{-6}$, 平均为 17.3×10^{-6}), 且矿石的稀土模型总体上类似于石英闪长岩。故认为形成该矿床的热液流体主要来源于闪长质熔体。

(3) 五通组砂岩的 ΣREE 最高 ($100.6 \times 10^{-6} \sim 308.0 \times 10^{-6}$), LREE/HREE 为 2.97~7.31, 明显高于黄龙组、船山组和栖霞组地层(分别为 $4.5 \times 10^{-6} \sim 10.5 \times 10^{-6}$, 0.75~3.09)。

(4) 天鹅抱蛋山岩体与铜官山石英闪长岩体的稀土元素特征极为相似, 认为天鹅抱蛋山岩体与铜官山石英闪长岩体为深部大岩浆房同源派生产物。

表 1 安徽铜陵马山金硫矿床岩石和矿石稀土元素浓度 ($\times 10^{-6}$)

Table 1 REE contents of rocks and minerals from the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province ($\times 10^{-6}$)

类型	样号	产状	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	资料来源
岩体	XI-19	天鹅抱蛋山石英闪长岩	41.49	77.98	9.5	32.37	6.06	1.56	5.7	0.79	3.63	0.79	2.15	0.35	2.06	0.32	18.87	国连杰, 1990 田世洪等, 2005
		天鹅抱蛋山石英闪长岩	44.44	83.06	10.27	35.97	6.76	1.7	5.67	0.83	4	0.86	2.3	0.37	2.19	0.35	10.43	
		天鹅抱蛋山石英闪长岩	46.07	81.63	9.53	30.94	5.88	1.47	4.76	0.68	3.35	0.72	1.98	0.32	1.98	0.3	18.15	
		天鹅抱蛋山石英闪长岩	42.68	81.16	9.55	33.99	5.95	1.62	5.03	0.76	3.51	0.76	2.05	0.33	1.99	0.3	18.39	
		铜官山石英闪长岩	40.3	89.7	9.95	41.4	6.48	1.76	5.94	0.70	3.90	0.68	1.98	0.26	1.63	0.26	17.7	
地层	MSP-1	栖霞组灰色含砾青大理岩	1.8	2.3	0.38	1.6	0.35	0.36	0.41	0.06	0.34	0.07	0.17	0.02	0.12	0.02	2.5	本文
	MSP-4	船山组青灰色灰岩	2.1	2.8	0.42	1.5	0.29	0.11	0.28	0.04	0.21	0.05	0.12	0.02	0.11	0.02	1.5	
	MSP-6	船山组青灰色大理岩化灰岩	1.0	1.2	0.17	0.6	0.10	0.09	0.11	0.02	0.09	0.02	0.05	0.01	0.04	0.02	1.0	
	MSP-12	黄龙组灰白色大理岩	1.2	1.4	0.22	0.9	0.17	0.30	0.23	0.04	0.26	0.06	0.18	0.03	0.15	0.03	3.5	
	MSP-14	黄龙组糖粒状大理岩	2.1	2.5	0.28	0.9	0.18	0.04	0.16	0.02	0.15	0.04	0.10	0.01	0.09	0.02	1.7	
	MSP-15	黄龙组糖粒状大理岩	0.7	0.7	0.14	0.6	0.13	0.03	0.16	0.03	0.17	0.05	0.11	0.02	0.09	0.02	2.4	
	MSP-16	黄龙组含闪锌矿细脉之浸染状黄铁矿白云岩	0.7	0.9	0.15	0.7	0.17	0.11	0.19	0.03	0.19	0.05	0.12	0.02	0.13	0.02	2.1	
	MSP-20	五通组含黄铁矿之粉砂岩	16.9	33.8	4.55	16.6	2.92	0.54	2.52	0.43	2.73	0.60	1.79	0.27	1.87	0.30	14.8	
	MSP-21	五通组含泥质粉砂岩	51.9	95.2	11.96	44.3	8.15	1.44	7.01	1.03	5.51	1.08	2.92	0.43	2.67	0.42	28.2	
	MSP-22	五通组含泥质粉砂岩	61.7	109.0	13.67	49.4	8.78	1.60	7.47	1.17	6.76	1.48	4.05	0.62	4.07	0.66	37.6	
	MSP-23	五通组石英砂岩	43.6	75.7	8.95	30.5	5.05	1.09	4.38	0.69	4.13	0.96	2.86	0.45	3.14	0.51	29.3	
	MSP-24	五通组石英砂岩	58.1	101.1	12.04	41.6	6.37	0.99	4.98	0.66	3.25	0.61	1.63	0.21	1.39	0.20	17.2	
	MSP-25	五通组石英砂岩夹泥质薄层	38.3	62.0	6.99	23.1	4.12	0.84	3.92	0.67	4.11	0.96	2.79	0.43	2.88	0.46	23.1	
矿体	MSP-2	顺层 Pb-Zn 矿矿石	0.7	0.7	0.15	0.5	0.12	0.09	0.13	0.03	0.14	0.03	0.08	0.01	0.08	0.02	1.1	本文
	MSP-7	块状黄铁矿矿石	12.7	20.8	2.68	9.6	1.63	0.37	1.12	0.12	0.40	0.06	0.11	0.01	0.07	0.02	1.5	
	MSP-11	块状黄铁矿矿石	0.8	1.2	0.21	0.9	0.19	0.09	0.15	0.02	0.10	0.02	0.05	0.01	0.04	0.02	0.6	
	MSP-13	含 PbZn 黄铁矿矿石	5.2	8.1	1.07	3.8	0.70	0.17	0.50	0.06	0.24	0.04	0.11	0.01	0.10	0.02	1.5	
	MSP-18	含磁黄铁矿蛇纹石岩	0.8	1.4	0.29	1.4	0.47	0.09	0.64	0.13	0.77	0.16	0.41	0.05	0.21	0.03	4.8	
	MSP-19	含石英方解石脉蛇纹石岩	1.1	1.8	0.32	1.3	0.39	0.22	0.47	0.09	0.53	0.12	0.37	0.06	0.35	0.06	3.9	

表 2 安徽铜陵马山金硫矿床岩石和矿石稀土元素特征值

Table 2 REE characteristic values of rocks and minerals from the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province

类型	样号	产状	Σ REE ($\times 10^{-6}$)	LREE/ HREE	δ Eu	δ Ce	(La/Sm) _N	(La/Yb) _N	(Gd/Yb) _N	资料来源
岩体	Xl-19	天鹅抱蛋山石英闪长岩	203.6	4.87	0.80	0.91	4.31	13.58	2.23	国连杰,1990
		天鹅抱蛋山石英闪长岩	209.2	6.75	0.82	0.90	4.14	13.68	2.09	
		天鹅抱蛋山石英闪长岩	207.8	5.44	0.82	0.89	4.93	15.69	1.94	
		天鹅抱蛋山石英闪长岩	208.1	5.28	0.88	0.93	4.51	14.46	2.04	
		铜官山石英闪长岩	222.6	5.74	0.85	1.05	3.91	16.67	2.94	田世洪等, 2005
地 层	MSP-1	栖霞组灰色含沥青大理岩	10.5	1.83	2.90	0.64	3.24	10.11	2.76	本文
	MSP-4	船山组青灰色灰岩	9.6	3.09	1.17	0.69	4.56	12.87	2.05	
	MSP-6	船山组青灰色大理岩化灰岩	4.5	2.29	2.61	0.62	6.29	16.85	2.22	
	MSP-12	黄龙组灰白色大理岩	8.6	0.93	4.64	0.59	4.44	5.39	1.24	
	MSP-14	黄龙组糖粒状大理岩	8.3	2.64	0.71	0.69	7.34	15.73	1.43	
	MSP-15	黄龙组糖粒状大理岩	5.3	0.75	0.64	0.50	3.39	5.24	1.43	
	MSP-16	黄龙组含闪锌矿细脉之 浸染状黄铁矿白云岩	5.5	0.94	1.86	0.60	2.59	3.63	1.18	
	MSP-20	五通组含黄铁矿之粉砂岩	100.6	2.97	0.59	0.91	3.64	6.09	1.09	
	MSP-21	五通组含泥质粉砂岩	262.2	4.32	0.57	0.89	4.01	13.11	2.12	
	MSP-22	五通组含泥质粉砂岩	308.0	3.82	0.59	0.87	4.42	10.22	1.48	
	MSP-23	五通组石英砂岩	211.3	3.55	0.69	0.88	5.43	9.36	1.13	
	MSP-24	五通组石英砂岩	250.4	7.31	0.52	0.88	5.74	28.18	2.89	
MSP-25	五通组石英砂岩夹泥质薄层	174.7	3.44	0.63	0.85	5.85	8.97	1.10		
矿体	MSP-2	顺层 Pb-Zn 矿矿石	3.8	1.37	2.19	0.47	3.67	5.90	1.31	本文
	MSP-7	块状黄铁矿矿石	51.2	14.01	0.79	0.82	4.90	122.32	12.91	
	MSP-11	块状黄铁矿矿石	4.4	3.35	1.58	0.68	2.65	13.48	3.03	
	MSP-13	含 PbZn 黄铁矿矿石	21.6	7.38	0.84	0.78	4.67	35.06	4.03	
	MSP-18	含磁黄铁矿蛇纹石岩	11.6	0.61	0.50	0.68	1.07	2.57	2.46	
	MSP-19	含石英方解石脉蛇纹石岩	11.1	0.87	1.57	0.74	1.77	2.12	1.08	

4.2 稳定同位素地球化学特征

4.2.1 硫同位素地球化学

关于硫同位素的研究工作,前人已做了大量的工作,测试对象包括岩体、地层和矿体中的各种硫化物,每位研究者可能各有侧重。笔者在收集整理前人研究成果基础上,对矿体补做了 4 件样品,一同汇编于表 3,其硫同位素频率直方图见图 5。从表 3 和图 5 可以得出以下两点结论:

(1) 马山金硫矿床矿体中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 5.1‰~8.7‰,在频率直方图上呈明显的塔式分布(图 5),具岩浆来源的特征。岩体中黄铁矿和磁黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 5.1‰~6.2‰。从图 5 可以清楚看出,矿体与岩体的 $\delta^{34}\text{S}$ 值基本一致,说明两者具有相同的硫源。

(2) 地层中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -35.4‰~-13.0‰,且数据分散(图 5),与矿体中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值截然不同,其特征反映了外生沉积条件下生物细菌作用的结果,说明矿体与地层具有不同的硫源。

4.2.2 碳、氧同位素地球化学

马山金硫矿床的碳、氧同位素组成分析结果见

表 4。其大理岩、灰岩和白云岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 为 -1.4‰~-1.6‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 为 19.1‰~22.4‰;矿石中方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 为 -5.2‰~-3.6‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 为 12.2‰~12.9‰。马山金硫矿床矿石中方解石与该区栖霞组、船山组和黄龙组的大理岩、灰岩和白云岩碳氧同位素组成明显不同,这反映矿石中碳、氧不大可能来源于围岩地层。

成矿热液中的碳主要有 3 种可能来源(图 6):
①地幔射气或岩浆来源。地幔射气和岩浆来源的碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围分别为 -5‰~-2‰和 -9‰~-3‰(Taylor,1986);
②沉积岩中碳酸盐岩的脱气或含盐卤水与泥质岩相互作用。这种来源的碳同位素组成具有重碳同位素特征,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围为 -2‰~+3‰,海相碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 大多稳定在 0‰左右(Veizer et al.,1980);
③各种岩石中的有机碳。有机碳一般富集 ^{12}C ,因而碳同位素组成很低,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围为 -30‰~-15‰,平均为 -22‰(Ohmoto,1972)。

最近据 Ray et al.(1999,2000)的资料,全球原生碳酸岩(primary carbonatites)的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值

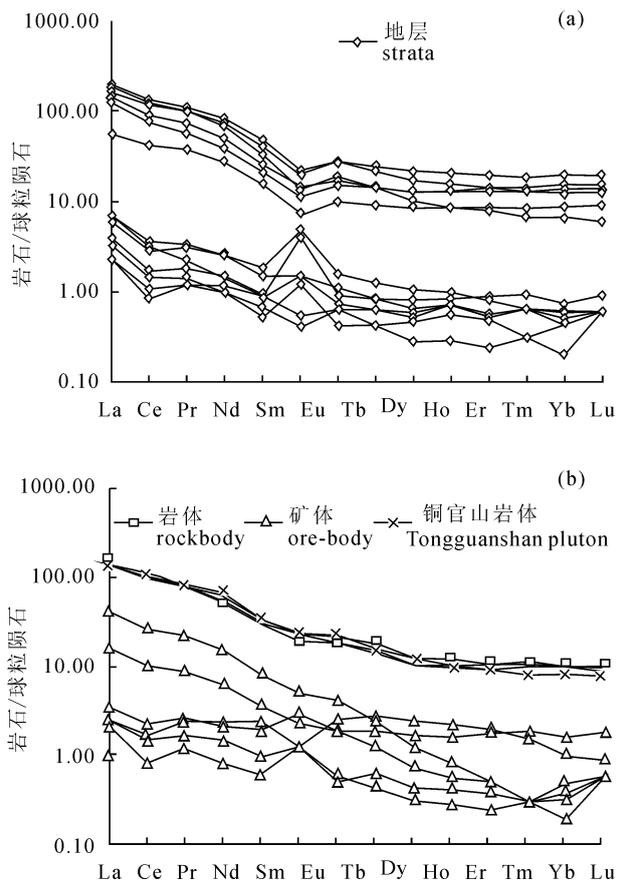


图4 安徽铜陵马山金硫矿床岩石和矿石
稀土元素配分曲线

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of rocks and minerals from the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province

区域远大于以往所预计的,达到如图6中五边形所示的范围。如表4和图6所示,马山金硫矿床矿石中方解石的碳、氧同位素组成较为稳定,其 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 、 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 分别为 $-5.2\text{‰} \sim -3.6\text{‰}$ 和 $12.2\text{‰} \sim 12.9\text{‰}$,与原生碳酸岩的碳、氧同位素组成相同,而围岩地层的碳、氧同位素组成 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 、 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 分别为 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 为 $-1.4\text{‰} \sim 1.6\text{‰}$ 和

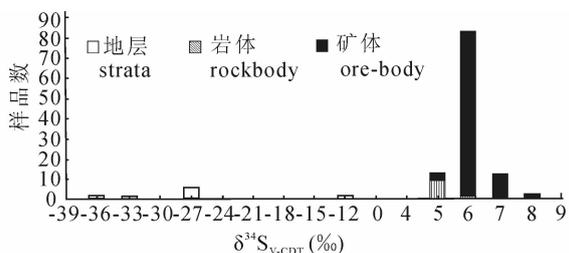


图5 马山金硫矿床的硫同位素频率直方图

Fig. 5 Histogram of $\delta^{34}S$ for sulfides from the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province

$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 为 $19.1\text{‰} \sim 22.4\text{‰}$,明显是沉积碳酸盐来源。

表3 安徽铜陵马山金硫矿床的硫同位素组成
Table 3 S isotope compositions of the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province

类型	样品名称	样品数	$\delta^{34}S_{V-CDT}(\text{‰})$	资料来源
岩体	黄铁矿	8	5.1	周真,1984
	黄铁矿	1	6.2	李学明等,1987
	磁黄铁矿	1	5.9	
地层	栖霞组 黄铁矿	1	-29.6	周真,1984
	船山组 黄铁矿	1	-13.0	
	黄龙组 黄铁矿	1	-35.4	
	五通组 黄铁矿	2	-29.3	顾连兴等,1986
	五通组 黄铁矿	2	-37.0	
矿体	五通组 黄铁矿	3	-28.3	李学明等,1987
	胶状黄铁矿	2	7.0	本文
	黄铁矿	1	6.1	
	磁黄铁矿	1	8.0	
	胶状黄铁矿	3	6.7	
	黄铁矿	16	6.4	
	黄铜矿	1	5.1	
	磁黄铁矿	31	6.1	
	方铅矿	2	6.9	
	闪锌矿	2	8.7	
	毒砂	4	7.5	
	黄铁矿	4	7.2	
	磁黄铁矿	7	6.4	
	胶状黄铁矿	4	6.7	
	闪锌矿	2	7.8	
毒砂	2	6.0		
黄铜矿	1	6.5		
黄铁矿	14	6.9	王义文,1987	

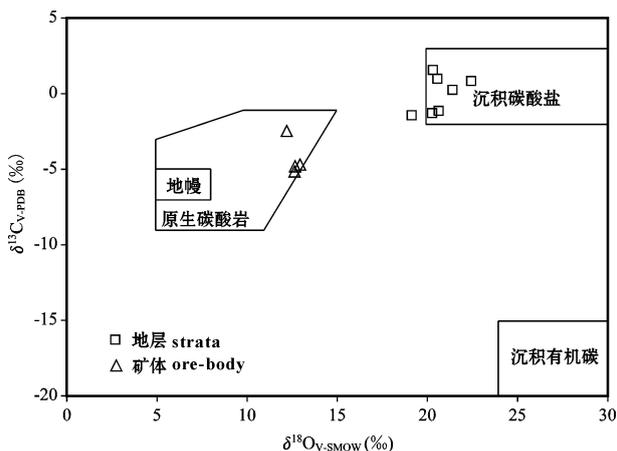


图6 安徽铜陵马山金硫矿床岩石和矿石碳氧同位素组成图解(原图据刘建明等,2003)

Fig. 6 $\delta^{13}C$ versus $\delta^{18}O$ diagram of rocks and minerals from the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province (modified from Liu et al., 2003)

表 4 安徽铜陵马山金硫矿床碳酸盐矿物碳、氧同位素组成

Table 4 Carbon and oxygen isotope determinations of carbonate rocks from the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province

类型	样号	产状	样品名称	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}^*(\text{‰})$
地层	MSP-1	栖霞组灰色含沥青大理岩	方解石	1.0	-10.1	20.5
	MSP-4	船山组青灰色灰岩	方解石	0.8	-8.2	22.4
	MSP-6	船山组青灰色大理岩化灰岩	方解石	1.6	-10.3	20.3
	MSP-12	黄龙组灰白色大理岩	全岩	-1.1	-9.9	20.7
	MSP-14	黄龙组糖粒状大理岩	全岩	-1.2	-10.2	20.3
	MSP-15	黄龙组糖粒状大理岩	方解石	0.1	-9.2	21.4
	MSP-16	黄龙组含闪锌矿细脉之浸染状黄铁矿白云岩	白云石	-1.4	-11.4	19.1
	矿体	MSP-2	顺层 Pb-Zn 矿矿石	方解石	-5.2	-17.5
MSP-7		块状黄铁矿矿石	方解石	-4.8	-17.5	12.9
MSP-13		含 PbZn 黄铁矿矿石	方解石	-3.6	-18.1	12.2
MSP-19		含石英方解石脉蛇纹石岩	方解石	-5.0	-18.0	12.3

注: * $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 1.03086 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} + 30.86$ (Friedman et al., 1977).

表 5 安徽铜陵马山金硫矿床硅同位素组成

Table 5 Silicon isotope compositions of the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province

类型	样号	产状	样品名称	$\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}}(\text{‰})$	资料来源
岩体	XI-19	铜官山石英闪长岩	全岩	-0.3	田世洪等, 2005
地层	MSP-21	五通组含泥质粉砂岩	全岩	-0.5	本文
	MSP-22	五通组含泥质粉砂岩	全岩	-0.3	
	MSP-23	五通组石英砂岩	全岩	-0.5	
	MSP-24	五通组石英砂岩	全岩	-0.2	
	MSP-25	五通组石英砂岩夹泥质薄层	全岩	-0.3	
矿体	MSP-17	含磁黄铁矿团斑的细粒蛇纹石岩	全岩	-0.3	本文
	MSP-18	含磁黄铁矿蛇纹石岩	全岩	-0.1	
	MSP-19	含石英方解石脉蛇纹石岩	石英	-0.4	

4.2.3 硅同位素地球化学

马山金硫矿床的硅同位素组成分析结果见表 5。根据卫片、航片和物探重磁异常等资料(周真, 1984), 岩性特征和锶初始比值(李学明等, 1987), 以及本文研究的天鹅抱蛋山岩体与铜官山石英闪长岩体的稀土元素特征极为相似, 认为天鹅抱蛋山岩体与铜官山石英闪长岩体为深部大岩浆房的同源派生产物。据此, 可用铜官山石英闪长岩体的硅氧同位素组成代替天鹅抱蛋山岩体的硅氧同位素组成。马山金硫矿床矿石中石英和全岩的 $\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}}$ 变化范围为 $-0.4\text{‰} \sim -0.1\text{‰}$, 平均为 -0.27‰ , 接近 -0.3‰ , 与岩体的 $\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}}$ 值 (-0.3‰) 非常接近, 这暗示着矿石的硅来源于岩体。而地层的 $\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}}$ 变化范围为 $-0.5\text{‰} \sim -0.2\text{‰}$, 平均为 -0.36‰ , 接近 -0.4‰ , 与矿石中石英和全岩的 $\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}}$ 值有所差别。

4.2.4 氢、氧同位素地球化学

马山金硫矿床的氢、氧同位素组成分析结果见

表 6。矿石中石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-V-SMOW}}$ 变化范围为 $6.9\text{‰} \sim 10.7\text{‰}$, 平均为 8.7‰ , 与岩体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值 ($9.3\text{‰} \sim 11.1\text{‰}$, 平均为 10.0‰) 比较接近, 这暗示着矿石的氧来源于岩体。而五通组砂岩的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 变化范围为 $10.8\text{‰} \sim 15.4\text{‰}$, 平均为 13.8‰ , 黄龙组、船山组和栖霞组中方解石和白云石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-V-SMOW}}$ 变化范围为 $15.3\text{‰} \sim 18.1\text{‰}$, 平均为 16.6‰ , 均与矿石中石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值 (平均为 8.7‰) 有显著差别。

从表 6 可以看出, 黄龙组、船山组和栖霞组中方解石和白云石的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 变化范围为 $-70\text{‰} \sim -34\text{‰}$, 矿石中石英的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 变化范围为 $-69\text{‰} \sim -62\text{‰}$ 。将它们与氧同位素一起绘于图 7。从图 7 可以看出, 矿石成矿流体主要来自岩浆, 而地层的流体主要来自变质水, 与前述研究成果一致。

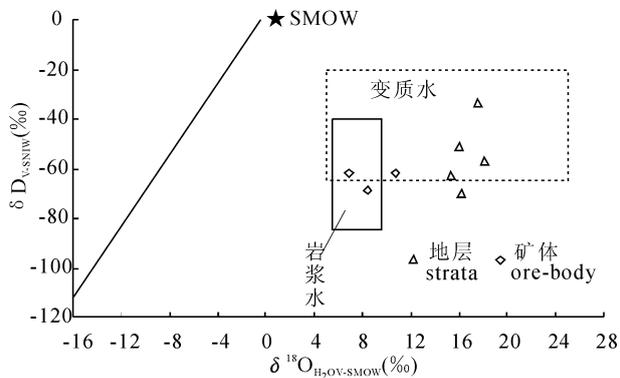
综上所述, 安徽铜陵马山金硫矿床成矿流体的 H、O、C、S、Si 同位素地球化学特征以及岩石、矿石的稀土元素地球化学特征反映出成矿作用与燕山期

表6 安徽铜陵马山金硫矿床氢和氧同位素组成

Table 6 Hydrogen and oxygen isotope compositions of the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province

类型	样号	产状	样品名称	$t(^{\circ}\text{C})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}(\text{‰})$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{V-SMOW}}}\text{ (‰)}$	资料来源
岩体	XI-19	铜官山石英闪长岩	全岩		11.1			田世洪等, 2005
	Z-94-83	铜官山石英闪长岩	全岩		9.8			赵斌, 1997
	L ₁ -Z ₂ -1	铜官山石英闪长岩	石英		9.3			储国正等, 1995
		铜官山石英闪长岩	全岩		9.7			黄华盛等, 1985
地层	MSP-1	栖霞组灰色含沥青大理岩	方解石	350	20.5	-70	16.2	本文
	MSP-4	船山组青灰色灰岩	方解石	350	22.4	-57	18.1	
	MSP-6	船山组青灰色大理岩化灰岩	方解石	350	20.3	-51	16.0	
	MSP-15	黄龙组糖粒状大理岩	方解石	370	21.4	-34	17.6	
	MSP-16	黄龙组含闪锌矿细脉之	白云石	370	19.1	-63	15.3	
		浸染状黄铁矿白云岩						
	MSP-21	五通组含泥质粉砂岩	全岩		14.6			
	MSP-22	五通组含泥质粉砂岩	全岩		14.6			
	MSP-23	五通组石英砂岩	全岩		10.8			
	MSP-24	五通组石英砂岩	全岩		15.4			
	MSP-25	五通组石英砂岩夹泥质薄层	全岩		13.6			
矿体	MSP-19	含石英方解石脉蛇纹石岩	石英	380	13.4	-69	8.4	本文
		石英黄铁矿脉	石英	380	15.7	-62	10.7	俞沧海和
		石英黄铁矿脉	石英	380	11.9	-69	6.9	袁小明, 2002

注: 计算所采用的分馏方程为 $1000\ln\alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 2.9$ (Clayton et al., 1972); $1000\ln\alpha_{\text{方解石-水}} = 2.78 \times 10^6 T^{-2} - 2.89$ (O'Neil et al., 1969); $1000\ln\alpha_{\text{白云石-水}} = 3.20 \times 10^6 T^{-2} - 1.50$ (Northrop, 1966)。

图7 安徽铜陵马山金硫矿床 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图解Fig. 7 δD versus $\delta^{18}\text{O}$ diagram of the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province

的岩浆活动密切相关。前人也从不同方面论证了马山金硫矿床与岩浆活动有密切关系。周真和汪正琼(1982)和周真(1984)通过大量光、薄片鉴定、扫描电镜、包裹体显微测温、硫同位素、铅同位素、以及岩体、矿体和围岩的微量金分析等测试工作,并结合野外地质观察,认为该矿床是与深部岩浆岩有关的高中温热液矿床。李学明等(1987)根据方铅矿、岩体和地层的铅同位素比值投在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 及 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 坐标图上,结果是方铅矿和岩体的点集中在一起,而地层的点很分散。此外,他们还采用 Russell-Stanton-Farguhur 模式,计算方铅矿

矿石铅的模式年龄为 135Ma,与天鹅抱蛋山岩体的形成年龄 137Ma 有较好的吻合,这从时间上也证明了矿体与岩体之间有成因联系。王兆荣等(1996)通过对矿体和围岩的微量金分析以及硫和铅同位素测试,认为该矿床为侵入岩浆热液矿床。杜杨松等(2000)和 Du Yangsong et al. (2003)通过成矿地质背景和成矿流体的研究,认为该矿床之所以形成金硫矿床,主要与岩浆岩岩体本身含金高而含铜低,围岩地层中有含有机质的赋金黄铁矿层存在,并且主成矿阶段的成矿流体以岩浆流体为主有关。

5 结论

(1) 硫的来源。硫同位素研究表明,马山金硫矿床矿体中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $5.1\text{‰} \sim 8.7\text{‰}$,在频率直方图上呈明显的塔式分布,且与岩体中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值基本一致,表明两者具有相同的硫源。地层中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-35.4\text{‰} \sim -13.0\text{‰}$,与矿体中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值截然不同,其特征反映了外生沉积条件下生物细菌作用的结果,说明矿体与地层具有不同的硫源。

(2) 碳、氧的来源。碳、氧同位素研究表明,马山金硫矿床矿石中方解石的碳、氧同位素组成与矿区围岩的碳、氧同位素组成明显不同,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值分别为 $-5.2\text{‰} \sim -3.6\text{‰}$ 和 $12.2\text{‰} \sim$

12.9%,与岩浆作用形成的 CO₂ 的碳、氧同位素组成一致,表明矿石中方解石的碳、氧来源于岩浆作用。

(3) 成矿热液中硅的来源。硅同位素研究表明,马山金硫矿床矿石的 $\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}}$ 变化范围为 $-0.4\% \sim -0.1\%$,平均为 -0.27% ,接近 -0.3% ,与岩体的 $\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}}$ 值 (-0.3%) 非常接近,这暗示着矿石的硅来源于岩体。

(4) 成矿热液水的来源。氢、氧同位素研究证实,马山金硫矿床矿石中石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}-\text{V-SMOW}}$ 变化范围为 $6.9\% \sim 10.7\%$,平均为 8.7% ,与岩体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值 ($9.3\% \sim 11.1\%$,平均为 10.0%) 比较接近,而矿石中石英的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 变化范围为 $-69\% \sim -62\%$,表明矿石成矿流体主要来自岩浆。

(5) 马山金硫矿床矿石与赋存的天鹅抱蛋山岩体石英闪长岩等的稀土元素球粒陨石标准化配分模式显示 LREE 相对富集,从石英闪长岩到矿石,稀土总量 ΣREE 降低 ($203.6 \times 10^{-6} \sim 209.2 \times 10^{-6}$,平均为 $207.2 \times 10^{-6} \rightarrow 3.8 \times 10^{-6} \sim 51.2 \times 10^{-6}$,平均为 17.3×10^{-6}),且矿石的稀土模型总体上类似于石英闪长岩。故认为形成该矿床的热液流体主要来源于闪长质熔体。

致谢: 野外工作期间,得到安徽省 321 地质队和马山金硫矿有关同志的大力支持和帮助;室内测试工作得到国土资源部同位素地质重点实验室白瑞梅高工、罗续容工程师、王成玉副研究员、李金诚高工等的帮助。在此对上述人员一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

车树政. 1982. 安徽铜陵马山层控金属矿床褶皱构造的初步研究. 华东地质, 1: 25(31).

储国正, 黄许陈, 张成火, 周捷, 吴才来, 李东旭, 黄华盛, 刘文灿. 1995. 安徽铜陵地区成矿控制因素的探讨. 安徽地质, 5(1): 47~58.

丁梯平, 蒋少涌, 万德芳, 等. 1994. 硅同位素地球化学. 北京: 地质出版社. 1~102.

杜杨松, 田世洪. 2000. 安徽铜陵天马山矿床与大团山矿床流体成矿作用对比研究. 地球科学, 25(4): 433(437).

顾连兴, 徐克勤. 1986. 论长江中、下游中石炭世海底块状硫化物矿床. 地质学报, 3: 176~188.

国连杰. 铜官山矿区两个成矿岩体对比研究. 河北地质学院学报, 1990, 13(2): 168~178.

黄华盛, 师其政, 崔彬, 温春齐. 1985. 铜官山铜矿床的组合特征及成因. 矿床地质, 4(2): 13~22.

李学明, 李彬贤, 张翼, 周泰禧. 1987. 马山金矿的同位素组成. 中国科学技术大学学报, 17(3): 408~412.

刘建明, 张宏福, 孙景贵, 叶杰. 2003. 山东幔源岩浆岩的碳—氧和

锶—钪同位素地球化学研究. 中国科学(D辑), 33(10): 921~930.

唐永成, 吴言昌, 等. 1998. 安徽沿江地区铜多金属矿床地质. 北京: 地质出版社. 1~351.

田世洪, 丁梯平, 侯增谦, 杨竹森, 谢玉玲, 王彦斌, 王训诚. 2005. 安徽铜陵小铜官山铜矿床稀土元素和稳定同位素地球化学研究. 中国地质, 32(4): 604~613.

王道华. 1987. 长江中下游区域铜、金、铁、硫矿床基本特征及成矿规律. 地质专报, 7: 35~42.

王秀娟. 1981. 安徽铜陵马山硫金矿床矿物—地球化学特征及富集规律的初步研究. 华东冶金地质, (2): 23~32.

王义文. 1987. 我国金矿床稳定同位素地球化学研究. 东北地质科技情报, 2: 5~12.

王兆荣, 周泰禧, 张汉昌. 1996. 安徽马山金铜矿的地球化学研究. 华东地质学院学报, 19(1): 36~41.

杨兵. 1985. 铜官山铜矿新类型矿体的发现及矿床成因模式. 矿床地质, 4(4): 45~53.

俞沧海, 袁小明. 2002. 铜陵天马山硫金矿床地质特征及成因探讨. 矿产与地质, 16(2): 74~77.

赵斌, 赵劲松. 1997. 长江中下游地区若干铁铜(金)矿床中块状及脉状钙质夕卡岩的氧、锶同位素地球化学研究. 地球化学, 26(5): 34~53.

周真, 汪正琼. 1982. 铜陵马山金矿地质特征及成因探讨. 华东冶金地质, 1: 1~10.

周真. 1984. 铜陵马山金矿床成因的研究. 地质论评, 30(5): 467~476.

Clayton R N, Mayeda T K. 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis. Geochim. et Cosmochim. Acta, 27: 43~52.

Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. Geophys. Res., 7: 3055~3067.

Du Yangsong, Tian Shihong, Qin Xinlong. 2003. Study on fluid inclusions of Tianmashan Au-S deposit and Datuanshan Cu deposit in Tongling, Anhui, China: Contrast in ore-forming fluid and metallogenesis. Acta Geologica Sinica, 77(1): 116~124.

Friedman I, O'Neil J R. 1977. Complication of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. In: Data of geochemistry-sixth edition. U. S. Gov. Printing Office, Washington, D. C. 117.

Gu Lianxin, Hu Wenxuan, He Jinxiang, Xu Yaotong. 1993. Geology and genesis of the Upper Paleozoic massive sulphide deposits in South China. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section B; Applied Earth Science, 83~96.

McCrea M. 1950. The isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. J. Chem. Phys., 18: 849~857.

O'Neil J R, Clayton R N and Mayeda T K. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. Chem. Phys., 51: 5547~5558.

Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in

- hydrothermal ore deposits. *Econ. Geol.*, 67: 551~578.
- Ray J S, Ramesh R, Pande K. 1999. Carbon isotopes in Kerguelen plume-derived carbonatites: evidence for recycled inorganic carbon. *Earth and Planetary Science Letters*, 170: 205~214.
- Ray J S, Ramesh R, Pande K, et al. 2000. Isotope and rare earth element chemistry of carbonatite-alkaline complexes of Deccan volcanic province: implications to magmatic and alteration processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 177~194.
- Taylor B E. 1986. Magmatic volatiles: Isotope variation of C, H and S. *Reviews in Mineralogy*. In: *Stable isotopes in high temperature geological process*. Mineralogical Society of America. 16: 185~226.
- Veizer J, Holser W T, Wilgus C K. 1980. Correlation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ secular variation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44: 579~588.

REE and Stable Isotope Geochemical Characteristics of the Mashan Au-S Deposit in Tongling, Anhui Province

TIAN Shihong^{1, 2)}, HOU Zengqian^{2, 3)}, YANG Zhusen¹⁾, DING Tiping^{1, 2)}, MENG Yifeng¹⁾
ZENG Pusheng⁴⁾, WANG Yanbin³⁾, WANG Xuncheng⁵⁾

1) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

2) *Key Laboratory on Isotope Geology, Ministry of Land and Resources, Beijing, 100037*

3) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

4) *Department of Resources and Environment, Yunnan College of Finance and Trade, Kunming, 650221*

5) *No. 321 Team of Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province, Tongling 244033*

Abstract

The Tongguanshan copper field in Tongling, Anhui, is one of the typical skarn orefields in the middle-lower Yangtze River iron, copper, sulfur and gold metallogenic belt of China. The Mashan Au-S deposit located in the Tongguanshan field is related to the Tian'ebaotanshan quartz diorite. A lot of research work has been done in such aspects as mineral deposit, mineralogy, tectonics, isotope geochemistry and fluid inclusions. Based on the work done, this paper mainly studied hydrogen, oxygen, carbon, sulfur, silicon isotopic compositions and REE geochemistry of the Mashan Au-S deposit. The results show that chondrite-normalized REE patterns are right-inclined, and the REE distribution patterns for ores are similar to those of the Tian'ebaotanshan quartz diorite, which indicates that the hydrothermal fluids of the deposit were mainly derived from dioritic melt. The O isotopic compositions of quartzes in ore range from 6.9‰~10.7‰ with average of 8.7‰, which are approximate to those of the pluton (9.3‰~11.1‰, with the average of 10.0‰). Together with the D isotopic compositions of quartzes in ore (-69‰~-62‰), it shows that the metallogenic fluids were mainly derived from magmatism. The C and O isotopic compositions of calcites in ore are different from those of country rocks in the orefield. The C and O isotopic compositions range from -5.2‰~-3.6‰ and 12.2‰~12.9‰, respectively, which are similar to the C and O isotopic compositions of magmatism. Therefore, C and O in ores might have come from magmatism. Silicon and sulfur isotopes are quite similar to those in magma or magmatic hydrothermal solutions.

Key words: geochemistry; REE; stable isotope; Mashan Au-S deposit; Tongling; Anhui Province

