



铜陵冬瓜山层状铜矿同位素地球化学 及成矿机制研究

徐兆文¹⁾, 陆现彩¹⁾, 高庚¹⁾, 方长泉¹⁾, 王云健¹⁾, 杨小男¹⁾, 蒋少涌¹⁾, 陈帮国²⁾

1) 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学系, 南京, 210093;

2) 安徽铜都铜业股份有限公司冬瓜山铜矿, 安徽铜陵, 244031

内容提要:长江中下游地区是中国重要的铜、金、硫产地, 区内分布着一系列喷流沉积及喷流沉积热液叠加改造型层状铜金矿床。本文以冬瓜山层状铜矿床为例, 通过热液流体和矿石同位素地球化学研究, 探讨层状铜矿床的成矿机制, 重点分析了成矿物质的来源。冬瓜山铜矿床热液流体氢、氧、碳和锶同位素分析表明, 成矿热液流体主要来自岩浆, 混有少量大气降水; CO_2 可能主要来自被岩浆同化的原始地层中海相沉积碳酸盐; I_{Sr} 具有地壳物质来源的特征。各种类型矿石的硫、铅同位素研究显示, 硫具有海底喷流沉积和后期岩浆热液叠加作用的特征, 铅则以上地壳铅为主, 混有少量的地幔铅。上述同位素地球化学特征表明冬瓜山层状铜矿床是在原始沉积基础上, 经燕山期岩浆热液叠加成矿作用所形成。

关键词:同位素地球化学; 物质来源; 成矿机制; 层状铜矿; 铜陵地区

冬瓜山层状铜矿床位于安徽省铜陵市东郊狮子山矿田内, 处于扬子板块北部, 长江深大断裂南侧, 是长江中、下游成矿带内具有代表性的超大型热液叠加改造型层状铜矿床。迄今为止, 前人已开展了大量的矿山地质调查和矿床学研究, 取得了许多成果(孟宪民, 1963; 徐克勤等, 1978; 常印佛等, 1983; 刘裕庆等, 1984; 顾连兴等, 1986, 2002; 李文达, 1989; 翟裕生等, 1992; 储国正等, 1992; 唐永成等, 1998; 肖新建等, 2002; 曾普胜等, 2005; Xu et al., 2005)。尽管如此, 有关其成因仍存在着争议。本文系统进行了热液改造型流体和主要矿石矿物的同位素地球化学研究工作, 试图探讨成矿物质的来源, 并进一步讨论成矿机制。

1 狮子山矿田地质概况及冬瓜山铜矿床地质特征

狮子山矿田地表出露地层为下、中三叠统, 局部有上三叠统地层零星分布(图1), 工程揭露深部发育有泥盆系上统、石炭系、二叠系地层。矿田构造主要为北东向青山背斜和近东西向、南北向、北东向断裂以及一些层间构造。矿田内岩浆岩多为小型侵入

体, 出露面积一般为 $0.1 \sim 0.25 \text{ km}^2$, 主要沿断裂构造侵入于青山背斜的轴部及两翼; 岩性主要为辉石闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩, 次为闪长岩、闪长玢岩及煌斑岩脉、花岗斑岩脉、闪长正长斑岩脉; 侵入时代为 $135 \sim 140 \text{ Ma}$ (唐永成等, 1998)。

冬瓜山层状铜矿床的赋矿层位主要为石炭系, 与热液叠加作用有关岩浆岩主要是青山脚石英闪长岩, 形成时代为 $135.6 \pm 1.1 \text{ Ma}$ (Xu et al., 2005)。主矿体呈层状、似层状赋存于上石炭统黄龙组白云岩、灰岩和下二叠统船山组灰岩之中, 产状与控矿岩层近于一致, 剖面上为一略向上凸的弯月形。矿石类型主要为含铜磁黄铁矿矿石、含铜蛇纹石岩、含铜矽卡岩, 次为含铜黄铁矿矿石、含铜硬石膏岩、含铜磁铁矿矿石、含铜粉砂岩、含铜石英闪长斑岩。矿石构造为块状构造、浸染状(细脉—浸染状)构造、脉状—网脉状构造、条纹状构造、条带状构造、角砾状构造等。矿石结构为粒状结构、交代结构、重结晶结构等。矿石矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等; 次为方黄铜矿、墨铜矿、闪锌矿、菱铁矿、白铁矿等; 脉石矿物主要为石榴子石、透辉石、透闪石、斜(粒)硅镁石、蛇纹石、滑石、硬石膏、石英和方解石;

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号 49873016)和高等学校博士点专项科研基金(编号 20020284035)的成果。

收稿日期: 2006-03-10; 改回日期: 2006-08-16; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 徐兆文, 1950年生。教授, 长期从事矿床学研究。通讯地址: 210093, 南京市汉口路22号南京大学地球科学系; 电话: 025-83592804; 传真: 025-83592804; Email: tzb@nju.edu.cn。

此外还有一些微量矿物(如金、银、铋等)。区内热液蚀变强烈,多叠加在接触交代变质作用之上。蚀变类型主要为钾化、硅化、蛇纹石化、碳酸盐化、硬石膏化、绿帘石化、绿泥石化、滑石化等,其中前五种蚀变与矿化关系密切。

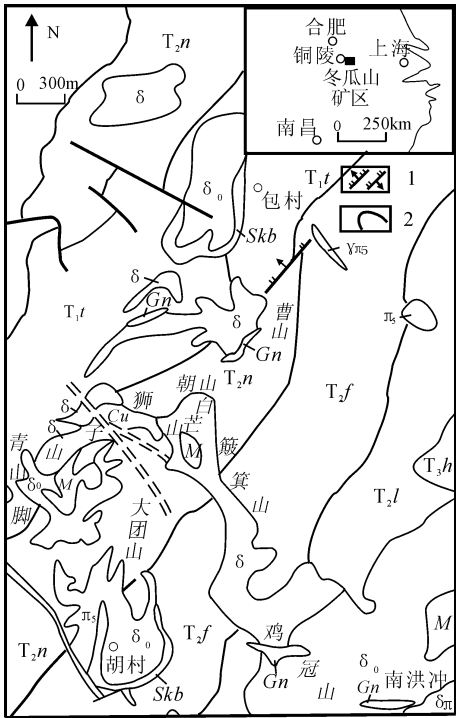


图 1 安徽铜陵狮子山矿田地质简图
(据许胜和国和平^①修改)

Fig. 1 Geological sketch map of the
Shizishan orefield in Tongling,
Anhui Province

T₃h—上三叠统黄马青组; T₂l—中三叠统龙头山组; T₂f—中三叠统分水岭组; T₂n—中三叠统南陵湖组; T₁t—塔山组; δ—闪长岩; δo—石英闪长岩; γπ₅—花岗斑岩; γδ—花岗闪长岩; υδ—辉石闪长岩; M—大理岩; Skb—矽卡岩; Gn—铁帽; Cu—铜矿化; 1—正、逆断层; 2—地层界线
T₃h—Upper Triassic Huangmaqing Fm. ; T₂l—Middle Triassic Longtoushan Fm. ; T₂f—Middle Triassic Fenshuiling Fm. ; T₂n—Middle Triassic Nanlinghu Fm. ; T₁t—Lower Triassic Tashan Fm. ; δ—diorite; δo—quartz diorite; γπ₅—granitic porphyry; γδ—granodiorite; υδ—augite diorite; M—marble; Skb—skarn; Gn—gossan; Cu—copper mineralization; 1—normal/reverse fault; 2—stratigraphic boundary

2 样品和测试方法

用于氢、氧、碳和锶同位素分析的样品采自冬瓜山铜矿床-730m 中段 48 线东、西两侧穿脉和-875 m 中段 54 线穿脉,样品为层状铜矿体和岩体内的矿化石英脉;用于硫、铅同位素分析的样品采自冬瓜山铜矿床-875 和-730 中段矿体,样品为层状铜矿石和矿化石英脉。流体包裹体氢同位素以及石英氧同位素分析,采用真空热爆裂法和还原法从脉石英流体包裹体中提取氢,使用 BrF₅ 法从石英中提取 O 并制成 CO₂。氢、氧同位素组成由内生金属成矿机制研究国家重点实验室 MAT-252 质谱仪测定;流体包裹体 Rb-Sr 同位素样品制备和分析由中国地质调查局同位素地球化学研究开放实验室(宜昌)完成,同位素组成由 MAT-261 质谱仪测定,具体分析方法见李华芹等(1998)。铅同位素分析由内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,用浓 HNO₃ 与浓 HF 混合酸(按照体积比 1:4 混合)溶解,使用器皿为聚四氟乙烯,元素分离空间的净化度达到 100 级,溶解后的样品采用 HBr 和阳离子交换树脂(BioRad AG1×8,200~400 目)将 Pb 分离纯化出来;运用传统的 H₃PO₄ 和硅胶法将分离纯化后的 Pb 涂在 Re 金属带上,用 Finnigan 公司最先进的 Triton TI 表面热电离质谱仪(TIMS)进行铅同位素比值测量。测量采用国际标样 NIST Pb-981 进行质量监控,样品和标样均在同一温度(1250℃)条件下进行测量,测量结果分别用国际标样 NIST Pb-981 与 NBS981 进行质量分馏校正和同位素分馏校正。铅同位素比值分析精度优于 0.05%,²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值重复性测量误差(0.2%,化学全流程铅含量本底为 1×10⁻⁹~2×10⁻⁹g,实验室空白流程本底 Pb<2×10⁻¹⁰g。硫同位素样品制备和分析由中国地质调查局地球化学研究开放实验室(宜昌)完成。

3 热液流体同位素研究

3.1 氢、氧同位素

冬瓜山铜矿流体包裹体氢、氧同位素分析(表 1)显示:成矿期流体 δD 为 -71.30‰~-59.30‰,δ¹⁸O 为 12.50‰~10.43‰;成矿晚期 δD 为 -73.00‰~-60.80‰,δ¹⁸O 为 11.00‰~14.90‰;利用 Clayton(1972)的石英与水的同位素平衡方程:δ¹⁸O_{石英}-δ¹⁸O_水≈3.38×10⁶·T⁻²-3.40,可获得与石英平衡时的成矿热液δ¹⁸O_{H₂O}值,计算结果表明成矿期流体 δ¹⁸O_{H₂O} 为 5.13‰~8.40‰,成矿晚期

$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 3.17‰ ~ 6.97‰, 将上述计算结果投影至 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图中(图 2), 可以看出成矿期流体属于岩浆水范围内, 成矿晚期流体投影点主要落在接近岩浆水附近的雨水线区域内。说明成矿流体以岩浆水为主, 晚期混有少量的大气降水。

表 1 冬瓜山层状铜矿成矿流体氢、氧和碳同位素组成分析结果

Table 1 Hydrogen, oxygen and carbon isotopic compositions of ore-forming fluids of the Dongguashan copper deposit

成矿阶段	样品号	温度(℃)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰)
成矿期石英脉	S10-1	365	-0.88	-59.30	11.23	6.33
	S10-2	398	-1.43	-66.00	12.50	8.40
	S13	381	-0.49	-59.90	12.09	7.59
	S13-2	350	-1.04	-71.30	11.53	6.23
	S14	350	—	-62.70	10.43	5.13
成矿晚期石英脉	MS-7	256	1.00	-65.60	11.00	5.29
	MS-9	250	0.60	-60.80	11.30	5.59
	MS-1	260	—	-65.10	11.10	3.17
	MS-2	270	1.30	-73.00	14.90	6.97

注: 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室测试; —表示未检出。

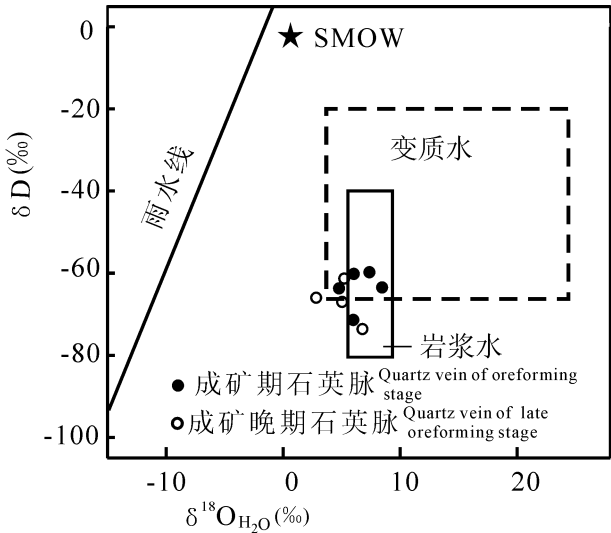


图 2 冬瓜山铜矿成矿流体 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解 (据 Taylor, 1979)

Fig. 2 Hydrogen —oxygen isotope diagram of the ore-forming fluids of the Dongguashan copper deposit (after Taylor, 1979)

3.2 碳同位素

表 1 显示冬瓜山层状铜矿床成矿期热液流体的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -0.49‰ ~ -1.43‰, 成矿晚期热液流体 $\delta^{13}\text{C}$ 为 +1.30‰ ~ +0.6‰, 将其分别投入 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$

$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图中(图 3), 可以看出冬瓜山层状铜矿床成矿期热液流体分布于原生碳酸盐范围附近, 成矿晚期热液流体分布于原生碳酸盐范围外, 并且有向低温蚀变方向漂移的趋势。热液方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值取决于流体的温度、氧逸度、pH 值以及 $\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{C}}$ (Ohmoto and Goldhaber, 1997)。据黄顺生等(2003)研究, 冬瓜山成矿热液流体呈中性—微弱酸性 ($\text{pH} = 6.8 \sim 7.0$), 温度普遍高于 270 ℃, 在上述物理化学条件下, 温度效应和氧化还原作用往往造成碳同位素分馏作用非常小, 一般可以近似认为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{方解石}} = \delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{C流体}}$ (Ohmoto and Rye, 1979), 因此热液流体中的碳可能来源于原沉积碳酸盐的溶解或脱碳作用, 以及岩浆、沉积岩或变质岩中还原碳的氧化、水解。不同的碳库有不同的同位素组成, 海相碳酸盐 $\delta^{13}\text{C} = -1‰ \sim +2‰$, 平均在零附近 (Ohmoto and Rye, 1979); 岩浆或地幔的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 主要介于 -7‰ ~ -2‰之间, 平均在 -5‰ (Cartigny et al., 1998); 沉积岩或变质岩中的还原碳亏损, $\delta^{13}\text{C} = -25‰$ (Jia et al., 2001); 碳酸盐溶解的 $\delta^{13}\text{C} \approx 0‰$, 碳酸盐脱碳作用会造成 $\delta^{13}\text{C} = +3‰ \sim +5‰$

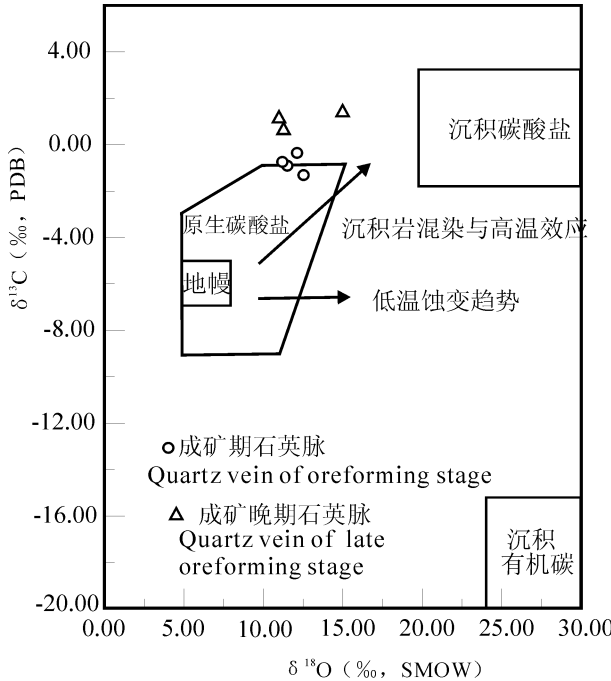


图 3 冬瓜山铜矿成矿流体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图解 (据 Ray, 2000 修改)

Fig. 3 Carbon —oxygen isotope diagram of the ore-forming fluids of the Dongguashan copper deposit (after Ray, 2000)

表 2 冬瓜山主矿化期流体包裹体 Rb、Sr 同位素数据
Table 2 Rb and Sr isotopic compositions of the ore-forming fluids

序号	样号	矿物	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(1\sigma)$	I_{Sr}
1	S10-1	石英	3.866	1.399	7.981	0.72488 ± 0.00007	0.710000
2	S10-2	石英	2.611	6.574	1.145	0.70975 ± 0.00003	0.709410
3	S13	石英	1.521	2.200	1.994	0.71319 ± 0.00004	0.709606
4	S13-2	石英	1.161	1.481	2.261	0.71319 ± 0.00006	0.709127
5	S14	石英	1.521	2.200	1.994	0.71319 ± 0.00004	0.710540

注:样品由中国地质调查局同位素地球化学研究开放实验室(宜昌)测定。

的富集(Burrows et al., 1986)。依据上述 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征,表明冬瓜山层状铜矿床成矿流体 CO_2 可能主要来自被岩浆同化的原始地层中海相沉积碳酸盐。

3.3 锶同位素

表 2 为冬瓜山铜矿床主矿化期流体包裹体 Rb、Sr 同位素数据,据 Xu 等(2005)流体包裹体 Rb-Sr 同位素定年法测定,冬瓜山铜矿床热液叠加成矿年龄约为 134 Ma,流体包裹体的 I_{Sr} [即($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i]同位素初始比值为 0.710540~0.709127。在 $\delta^{18}\text{O}-I_{\text{Sr}}$ 图解中(图 4)可以看出,主矿化期流体包裹体的 I_{Sr} 与华南 I 型花岗岩相近, $\delta^{18}\text{O}$ 则与华南 S 型花岗岩相近;说明在成矿过程中地壳物质参与较多,而且受雨水的影响不大(凌洪飞等,1998; Ray, 2000; 孙景贵等,2001;刘建明等,2003)。

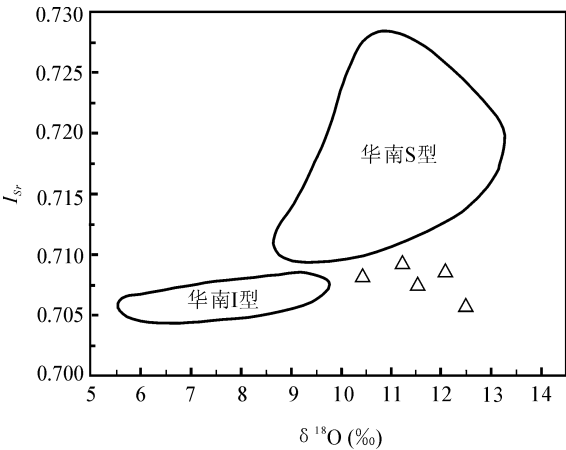


图 4 冬瓜山铜矿主矿化期流体包裹体 $I_{\text{Sr}}-\text{O}$ 同位素图解(据凌洪飞等,1998 修改)

Fig. 4 $I_{\text{Sr}}-\text{O}$ isotope diagram of the ore-forming fluids of the Dongguashan copper deposit (after Ling et al., 1998)

4 矿石同位素研究

4.1 硫同位素

表 3 为冬瓜山层状铜矿床各种矿石中硫同位素分析结果,石英闪长岩中石英—黄铁矿网脉状矿石的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+4.89\text{‰} \sim +4.08\text{‰}$,矿体中石英—黄铁矿—黄铜矿脉状矿石的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+6.92\text{‰} \sim +5.97\text{‰}$;含铜磁黄铁矿块状矿石和含铜矽卡岩块状矿石中的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 $+5.69\text{‰} \sim +4.79\text{‰}$ 、 $+5.40\text{‰} \sim +4.91\text{‰}$;硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值则介于 $+20.05\text{‰} \sim +14.80\text{‰}$ 之间(刘裕庆等,1984),各种矿石中主要矿石矿物硫同位素统计显示, $\delta^{34}\text{S}$ 介于 $+7.00\text{‰} \sim +3.90\text{‰}$ 之间[黄铜矿和磁黄铁矿数据主要来自刘裕庆等(1984)]。由直方图(图 5)可知,各类矿石中主要矿石矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围不大,但与含矿围岩黄龙组中结核状黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值($-0.6\text{‰} \sim -28.3\text{‰}$,321 地质队^②)和沉积硬石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 值完全不同,而与长江中、下游地区马山、武山、铜官山等块状硫化物矿床硫化物的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $-1\text{‰} \sim 5.5\text{‰}$ (顾连兴等,1986;李文达等,1997)十分相近,表明各种矿石中硫不是来源于地层,可能与海底喷流作用(陆建军等,2003)以及后期的岩浆热液叠加改造作用有关。矿体中脉状矿石硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值稍高于两种层状矿石硫化物,可能与石英—黄铁矿—黄铜矿脉形成时流体发生沸腾作用有关,因为热液矿物的硫同位素组成是温度的函数(Ohmoto, 1972)。石英闪长岩中网脉状黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与冬瓜山石英闪长斑岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 全岩值 $+4.0\text{‰}$ 十分相近(刘裕庆等,1984),表明成矿期岩浆热液矿化的硫主要来自

表 3 冬瓜山铜矿各种矿石硫同位素组成
Table 3 Sulfur isotopic compositions of different ores of the Dongguashan copper deposit

序号	样号	产状	样品	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)
1	S10-1	石英—黄铁矿—黄铜矿脉	黄铁矿	6.92
2	S11	石英—黄铁矿—黄铜矿脉	黄铁矿	5.97
3	S49-4	含铜磁黄铁矿	磁黄铁矿	4.79
4	S48-16	含铜磁黄铁矿	磁黄铁矿	5.69
5	S48-13	石英闪长岩中网脉	黄铁矿	4.89
6	S49-7	石英闪长岩中网脉	黄铁矿	4.08
7	S54-4	含铜矽卡岩	黄铁矿	4.91
8	S54-5	含铜矽卡岩	黄铁矿	5.40

注:中国地质调查局同位素地球化学研究开放实验室(宜昌)测试。

深部岩浆。

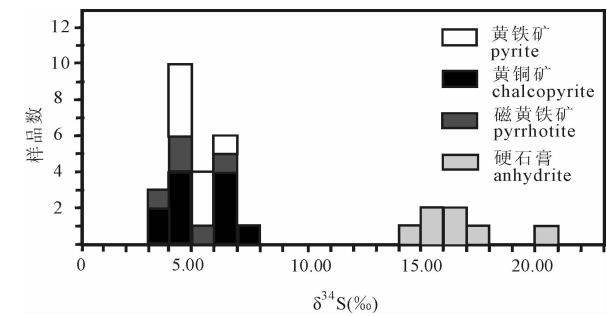


图 5 冬瓜山铜矿各种矿石硫同位素直方图

Fig. 5 Sulfur isotopic histogram diagram of different ores of the Dongguashan copper deposit
磁黄铁矿、黄铜矿、硬石膏数据来自刘裕庆等(1984)
The data of pyrrhotite, chalcopyrite and anhydrite are from Liu Yuqing et al. (1984)

4.2 铅同位素

Griffiths 等(1985)认为铅同位素组成可作为地壳演化信息及古陆壳活动的证据, Zartman 等(1981, 1988)提出可用“铅构造模式”探索壳源和幔源之间铅同位素关系, 而且还能为成岩成矿物质来源获得较为有意义的信息(马振东, 1986)。唐永成等(1998)研究了铜陵地区中酸性岩石中 6 个钾长石的 Pb 同位素组成, 其中²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 17.94‰ ~ 18.42‰, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.47‰ ~ 15.60‰, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 38.09‰ ~ 38.46‰, 表明铜陵地区中酸性侵入岩的物质主要来源于上地幔, 由富集地幔底侵并部分熔融扬子下地壳物质(图 6)。

冬瓜山铜矿床层状矿体中石英—黄铁矿—黄铜

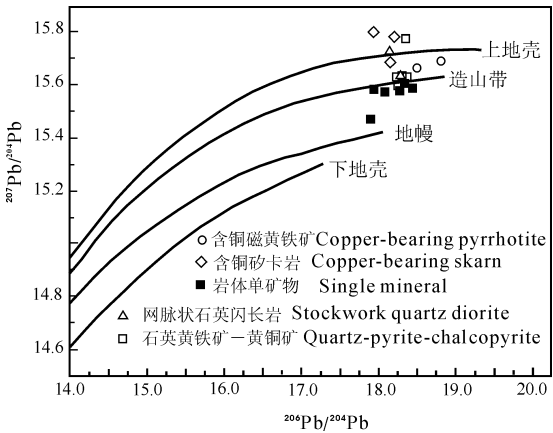


图 6 冬瓜山铜矿各种矿石铅同位素构造模式图
(据 Zartman et al., 1988); 岩体单矿物
来自唐永成等, 1998

Fig. 6 Plumbotectonics model diagram of lead isotopic of different ores of the Dongguashan copper deposit (based on Zartman et al., 1988; the data of single mineral of the intrusion are from Tang Yongcheng et al., 1988

矿脉状矿石的硫化物 Pb 同位素组成²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18.24‰ ~ 18.36‰, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.60‰ ~ 15.63‰, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 38.54‰ ~ 38.98‰, 与岩体单矿物 Pb 同位素组成相近, 表明成矿期流体中相当一部分铅来自于岩浆; 层状含铜磁黄铁矿体中磁黄铁矿 Pb 同位素组成²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18.49‰ ~ 18.80‰, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.66‰ ~ 15.70‰, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 38.42‰ ~ 38.55‰, 含铜矽卡岩中硫化物 Pb 同位素组成²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18.15‰ ~ 18.20‰, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.68‰ ~ 15.78‰, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 38.56‰ ~

表 4 冬瓜山层状铜矿各种矿石中硫化物铅同位素组成

Table 4 Lead isotopic compositions of different ores of Dongguashan copper deposit

序号	样号	产状	样品	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb
1	S9	石英—黄铁矿—黄铜矿脉	硫化物	18.3027 ± 8	15.6341 ± 9	38.5754 ± 29
2	S10-1	石英—黄铁矿—黄铜矿脉	硫化物	18.3597 ± 6	15.6301 ± 6	38.5762 ± 15
3	S11	石英—黄铁矿—黄铜矿脉	硫化物	18.2396 ± 43	15.6328 ± 36	38.5347 ± 92
4	S13	石英—黄铁矿—黄铜矿脉	硫化物	18.3466 ± 33	15.7742 ± 32	38.9781 ± 95
5	S16	石英—黄铁矿—黄铜矿脉	硫化物	18.2593 ± 13	15.5962 ± 11	38.5928 ± 29
6	S17	石英—黄铁矿—黄铜矿脉	硫化物	18.3007 ± 7	15.6333 ± 6	38.5717 ± 16
7	S49-4	含铜磁黄铁矿	磁黄铁矿	18.4910 ± 19	15.6641 ± 15	38.4200 ± 40
8	S48-16	含铜磁黄铁矿	磁黄铁矿	18.7995 ± 17	15.6884 ± 15	38.5522 ± 40
9	S48-13	石英闪长岩中网脉	硫化物	18.1437 ± 32	15.7248 ± 39	38.6928 ± 129
10	S49-7	石英闪长岩中网脉	硫化物	18.2803 ± 28	15.6336 ± 24	38.3871 ± 60
11	S54-4	含铜矽卡岩	硫化物	18.2003 ± 13	15.7800 ± 11	38.8738 ± 28
12	S54-5	含铜矽卡岩	硫化物	18.1479 ± 18	15.6840 ± 15	38.5610 ± 39

注: 样品由内生金属矿床成矿机制国家重点实验室分析。1~6、8、9 采自铜陵冬瓜山铜矿—730 中段 48 线穿脉; 7、10 采自铜陵冬瓜山铜矿—730 中段 49 线穿脉; 11、12 采自铜陵冬瓜山铜矿—730 中段 54 线穿脉。

38.87‰,两者的Pb同位素组成相近,放射性成因铅含量较高,主要保留了上地壳的Pb同位素组成特征,这一特征与世界各地内陆盆地沉积物相一致;石英闪长岩中网脉状矿石硫化物Pb同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.14‰ \sim 18.28‰$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.63‰ \sim 15.73‰$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.55‰ \sim 38.69‰$,Pb同位素组成有一定变化范围,既有岩浆热液物质来源特征,又有上地壳物质来源特征。综合上述各种矿石硫化物Pb同位素组成,不难看出,成矿物质主要来自沉积地层或原有矿体,部分来自岩浆。接触交代成因的矿石中硫化物Pb同位素组成略低于层状矿石硫化物Pb同位素组成,这与王文斌等(1995)统计的长江中下游地区其它块状硫化物矿床硫化物Pb同位素组成特征相一致。

5 讨论

冬瓜山热液叠加改造型流体属于中偏弱酸性富含挥发分的水—盐体系(Xu et al., 2003; 黄顺生等, 2003),具有高温、高盐度热液铜矿床的成矿特征(Xu et al., 2003; 黄顺生等, 2003; Hedenquist and Richards, 1998; Marta et al., 2000),主要来自岩浆热液,晚期混入少量的大气降水和地层水;叠加改造型流体中的 CO_2 可能主要来自被岩浆同化的原始地层中海相沉积碳酸盐,在成矿过程中地壳物质参与比较多;叠加改造成矿时代约134Ma(Xu et al., 2005)。矿石硫具有海底喷流沉积和后期的岩浆热液叠加改造作用特征,矿石铅则以上地壳铅为主。

同位素地球化学研究表明:①冬瓜山铜矿床成矿物质可能主要来自沉积地层或原始矿胚层,燕山期岩浆活动形成的富氯热液流体可作为Cu的萃取剂(华明等, 2004; 周涛发等, 2000),使沉积地层或原始矿胚层中的成矿物质发生再活化作用(Mookherjee, 1976),造成成矿物质进一步富集。②流体在构造减压过程中发生了沸腾作用(Marta et al., 2000),生成了大量孔隙填充和交代成因的石英—硫化物脉,并伴随部分成矿物质沉淀成矿;成矿晚期流体与周围下渗的雨水或地层水相混合,生成一些含少量硫化物的石英脉。③岩浆携带的铜对原始矿胚层亦有叠加作用,促使原始矿胚层变富。④燕山期岩浆热液叠加作用致使了块状硫化物与脉型、矽卡岩型和斑岩型矿体在矿区尺度内共存(徐克勤等, 1978; Gu et al., 1993)。上述研究结果证明冬瓜山层状铜矿床的成矿过程经历了石炭世海底喷流沉积和燕山期岩浆热液叠加改两个成矿阶

段。

6 结论

冬瓜山铜矿床热液流体氢、氧、碳和锶同位素分析表明,富氯成矿热液流体主要来自岩浆,混有少量大气降水, CO_2 主要来自被岩浆同化的原始地层中海相沉积碳酸盐; I_{Sr} 具有地壳物质来源的特征。成矿流体沸腾作用、与地层水的混合及其矿胚层的地球化学障效应导致矿质沉淀,各类矿石的硫、铅同位素特征显示,硫具有海底喷流沉积和后期岩浆热液叠加作用的特征,铅则以上地壳铅为主,混有少量地幔铅。综上所述,冬瓜山层状铜矿床是沉积矿胚层经燕山期岩浆热液叠加改造而成矿,成矿经历了石炭世海底喷流沉积和燕山期岩浆热液叠加改两个成矿阶段。

注 释

① 见1992年安徽铜陵地质论文集。

② 安徽省地质矿产局321地质队. 安徽沿江重要成矿区铜及有关矿产勘查研究(上册)。

参 考 文 献 / References

- 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. 地质论评, 60(2):176~187.
- 顾连兴,陈培荣,倪培,徐兆文,肖新建,邱检生,张遵中,张光辉. 2002. 长江中下游燕山期热液铜—金矿床成矿流体. 南京大学学报(自然科学), 38(3):392~407.
- 华明,徐兆文,饶冰,陆现彩,黄顺生,朱士鹏. 2004. 黄铁矿— CuCl_2 盐溶液反应地球化学模拟试验及表面矿物学研究. 南京大学学报(自然科学版), 40(3):279~286.
- 黄顺生,徐兆文,倪培. 2003. 安徽铜陵冬瓜山热液叠加改造型铜矿床流体包裹体地球化学特征. 地质找矿论丛, 18:34~38.
- 李华芹,谢才富,常海亮. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学. 北京:地质出版社, 10~27.
- 李文达,王文斌,范洪源,董平,周涛发,谢华光. 1997. 长江中下游铜(金)矿床密集区形成条件和超大型矿床存在的可能性. 火山地质与矿产, 20(增刊):1~131.
- 凌洪飞,徐士进,沈渭洲,王汝成,林雨萍. 1998. 格宗、东谷岩体Nd、Sr、Pb、O同位素特征及其与扬子板块边缘其它晋宁期花岗岩对比. 岩石学报, 14(3):269~277.
- 刘建明,张宏福,孙景贵,叶杰. 2003. 山东幔源岩浆岩的碳—氧和锶—钕同位素地球化学研究. 中国科学(D辑), 33(10):921~930.
- 刘裕庆,刘兆廉,杨成兴. 1984. 铜陵地区冬瓜山铜矿的稳定同位素研究. 见:中国地质科学院矿床地质研究所所刊,第1号. 北京:地质出版社, 70~101.
- 陆建军,华仁民,徐兆文,高剑峰,李娟. 2003. 安徽铜陵冬瓜山铜金矿床两阶段成矿模式. 高校地质学报, 9(4):678~690.
- 马振东. 1986. 论铅同位素的地质指示作用. 地球科学, 11(4):437~443.
- 孙景贵,胡受奚,沈昆,姚凤良. 2001. 胶东金矿区矿田体系中基性—中基性脉岩的碳氧同位素地球化学研究. 岩石矿物学杂

- 志, 20(1): 47 ~ 56.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 210 ~ 230.
- 王文斌, 李文达, 谢华光, 周华平. 1995. 长江中下游铜铁多金属矿床铅同位素特征. 火山地质与矿产, 16(2): 67 ~ 77.
- 徐克勤, 朱金初. 1978. 中国东南部几个断裂拗陷带中沉积(或火山沉积) - 热液叠加类铁铜矿床的探讨. 福建地质, (4): 1 ~ 68.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金方, 周宗柱. 1992. 长江中下游铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社, 1992.
- 周涛发, 岳书仓, 袁峰. 2000. 长江中下游两个系列铜、金矿床及其成矿流体系统的氢、氧、硫、铅同位素研究. 中国科学, 30(增刊): 122 ~ 128.
- 孟宪民. 1963. 矿床分类与找矿方向. 见: 矿床学论文集, 矿床分类与成矿作用. 北京: 科学出版社, 1 ~ 18.
- 李文达. 1989. 论扬子型铜矿床及其成因. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 10(2): 1 ~ 14.
- 常印佛, 刘学圭. 1983. 关于层控式夕卡岩型矿床——以安徽省内下扬子拗陷中一些矿床为例. 矿床地质, 2(1): 11 ~ 20.
- 储国正, 李东旭. 1992. 顺层滑动构造对安徽省狮子山矿田“多层楼”矿床的控制. 现代地质, 6(4): 504 ~ 513.
- 肖新建, 顾连兴, 倪培. 2002. 安徽铜陵狮子山铜金矿床流体多次沸腾及其与成矿的关系. 中国科学(D), 32(3): 199 ~ 206.
- 曾普胜, 裴荣富, 侯增谦, 蒙义峰, 杨竹森, 田世洪, 徐文艺, 王训诚. 2005. 安徽铜陵矿集区冬瓜山矿床: 一个叠加改造型铜矿. 地质学报, 79(1): 106 ~ 113.
- Burrows D R, Wood P C, Spooner E T C. 1986. Carbon isotope evidence for a magmatic origin for Archean gold—quartz vein ore deposits. *Nature*, 321: 851 ~ 854.
- Cartigny P, Harris J W, Javoy M. 1998. Eclogitic diamond formation at Jwanent; no room for a recycled component. *Science*, 280: 1421 ~ 1424.
- Clayton J R, O'Neil M T. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. *J. Geophys. Res.*, 77: 3057 ~ 3067.
- Griffiths J B, Peucat J J, Sheppard S and Vidal Ph. 1985. Petrogenesis of Hercynian Leucogranites from the southern American Massif. Contribution of REE and isotope (Cs, Nd, Pb and O) geochemical data to the study of source rock characteristics and ages, 235 ~ 250.
- Gu Lianxing, Hu Wenxuan, He Jinxiang and 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*, 5(8): 83 ~ 96.
- Hedenquist J and Richards J. 1998. The influence of geochemical techniques on the development of genetic mode for porphyry copper deposits. *Reviews in Economic Geology*, 10: 235 ~ 256.
- Jia Yiefei, Li Xia, Kerrich R. 2001. Stable isotope (O, H, S, C, and N) systematics of quartz vein systems in the turbidite-hosted Central and North Deborah gold deposits of the Bendigo gold field, Central Victoria, Australia: Constraints on the origin of ore-forming fluids. *Economic Geology*, 96: 705 ~ 721.
- Marta B F, Lawrence D M and Teresita F M. 2000. Skarns related to porphyry-style mineralization at Caicayén Hill, Neuquén, Argentina: Composition and evolution of hydrothermal fluids. *Economic Geology*, 95(6): 1197 ~ 1214.
- Mookherjee A. 1976. Ores and metamorphism: temporal and genetic relationship. In: Wolf K H, ed. *Handbook of Stratabound and Strati-form Ore Deposits*. Amsterdam: Elsevier, 4: 203 ~ 260.
- Ohmoto H and Goldhaber M B. 1997. Sulfur and carbon isotopes. in: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York: John Wiley and Sons, 509 ~ 567.
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon. in: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York: John Wiley and Sons, 435 ~ 486.
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 67: 551 ~ 579.
- Ray J S, Ramesh R, Pande K, Trivedi J R, Shukla P N, Patel P P. 2000. Isotope and rare element chemistry of carbonatite—alkaline complexes of Deccan volcanic province: implication to magmatic and alteration processes. *J. Asian Earth Sciences*, 18: 177 ~ 194.
- Taylor H P. 1979. Oxygen isotope relationships. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (2nd edition)*. New York: John Wiley and Sons, 236 ~ 277.
- Xu Zhaowen, Lu Xiancai, Ling Hongfei, Lu Jianjun, Jiang Shaoyong, Nie Guiping, Huang Shunsheng, Hua Ming. 2005. Metallogenetic mechanism and timing of late superimposing fluid mineralization in the Dongguashan stratified copper deposit, Anhui Province. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 79(3): 405 ~ 413.
- Xu Zhaowen, Lu Xiancai, Huang Shunsheng, Ni Pei, Hua Ming and Lu Jianjun. 2003. Characteristics and evolution of ore-forming fluid in Dongguashan copper deposit, Anhui Province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(Supp.): A542.
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics—the model. *Tectonophysics*, 75: 135 ~ 162.
- Zartman R E, Haines S M. 1988. The Plumbotectonics model for Pb isotopic systematic among major terrestrial reservoirs—a case for bi-directional transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 1327 ~ 1339.

Isotope Geochemistry and Mineralization in the Dongguashan Diplogenetic Stratified Copper Deposit, Tongling Area

XU Zhaowen¹⁾, LU Xiancai¹⁾, GAO Geng¹⁾, FANG Changquan¹⁾, WANG Yunjian¹⁾,
YANG Xiaonan¹⁾, JIANG Shaoyong¹⁾, CHEN Bangguo²⁾

1) The State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093;
2) Dongguashan Copper Mine of Tongdu Co., Ltd., Anhui, Tongling, 244031

Abstract

The region of the middle—lower reach of the Yangtze River is an important mining district of copper, gold and other elements where a series of sedimentary – hydrothermal diplogenetic stratabound copper mineral deposits. Taking the Dongguashan deposit as a study case, this study investigates the mineralizing material origin and metallogenic mechanism of these sedimentary – hydrothermal diplogenetic stratabound copper deposits based on the analysis of isotope geochemistry. The hydrogen and oxygen isotope composition of the fluid inclusions in vein quartz of different stages shows that the ore – forming fluids are mainly originated from magmatic fluid with a minor mixture of meteoric water. $\delta^{13}\text{C}$ of the inclusions shows that CO_2 was derived from the carbonate assimilated by magma. I_{Sr} proves that ore – forming materials mainly originated from the crust, and $\delta^{34}\text{S}$ data indicates that the sulfur is from submarine exhalation sedimentation and exhibits characteristics of hydrothermal superimposing. In addition, the similarity in lead isotopic compositions of different ores indicates that the ore – forming material was mainly derived from the upper crust, and partly originated from the magma. By integrating the isotopic dating data and the geological setting, it is proposed that the mineralizing processes of Dongguashan copper deposit could be divided into two stages. In the first stage, stratiform sedimentary deposit or protore layer formed in later Devonian to later Carboniferous period. In the second stage, the pre – existing protore was diplogenetically alternated by the hydrothermal fluids mainly derived from the Yanshanian magmatic activities.

Key words: Isotope geochemistry; metallogenic mechanism; stratabound copper deposit; Tongling

2005 年度与地质学有关主要期刊总被引频次表

①	期刊名称	总被引频次	①	期刊名称	总被引频次	①	期刊名称	总被引频次
1	科学通报	5828	151	第四纪研究	1233	369	岩石矿物学杂志	684
29	地理学报	2628	171	地质科学	1124	371	现代地质	680
33	中国科学 D	2574	171	海洋学报	1124	373	新疆石油地质	674
34	岩石力学与工程学报	2521	178	岩土力学	1108	413	长安大学学报自然科学版	638
39	石油勘探与开发	2297	201	地质通报	1036	415	大庆石油地质与开发	637
45	岩土工程学报	2189	234	石油实验地质	944	417	地质与勘探	633
58	地球物理学报	1972	245	矿床地质	917	419	古生物学报	632
72	岩石学报	1831	260	东北大学学报	882	430	石油物探	620
75	地学前缘	1741	267	地球学报	868	434	海洋地质与第四纪地质	614
97	地质学报	1600	293	自然科学进展	808	437	地震地质	610
99	地球科学进展	1585	295	中国石油大学学报	802	441	高校地质学报	608
103	地质论评	1548	305	同济大学学报	789	459	青岛海洋大学学报	590
121	沉积学报	1447	310	地震学报	783	461	北京大学学报自然科学版	589
130	地球化学	1399	322	中山大学学报	758	465	矿物学报	587
131	地球科学	1390	339	石油地球物理勘探	724	490	工程地质学报	567
141	冰川冻土	1314	342	地球物理学进展	720	493	吉林大学学报地球科学版	562
143	石油与天然气地质	1291	345	天然气地球科学	713	505	中国矿业大学学报	550
150	地理科学	1241	346	南京大学学报	711	545	水文地质工程地质	504

注:① 本栏数据为在中国科技期刊中的总排名。据:中国科学技术信息研究所. 2006. 中国科技期刊引证报告(2006 年版, 核心版). 北京:科学技术文献出版社.

