

# 安庆夕卡岩型铁铜矿床流体包裹体研究

杨光树<sup>1,2</sup>, 温汉捷<sup>1\*</sup>, 胡瑞忠<sup>1</sup>, 秦朝建<sup>1</sup>, 于文修<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 对安庆夕卡岩型铁铜矿床中各成矿阶段的夕卡岩矿物、石英和方解石中流体包裹体的岩相学、显微测温及显微激光拉曼光谱分析等的研究表明, 成矿流体可能为源自深部的岩浆热液, 具高温、高盐度和富 CH<sub>4</sub> 等还原性挥发分的特征。流体包裹体的均一温度和盐度在夕卡岩期表现为高温(400~570℃)和高盐度(40%~46% NaCl)特征, 代表了夕卡岩形成及铁矿化时的流体活动情况; 在石英硫化物期表现出中低温(124~396℃), 盐度变化较大(6%~38% NaCl)的特征, 代表了铜矿化时的流体活动情况。从成矿早期到晚期, 流体包裹体的均一温度和盐度都不断降低, 且在铜的主成矿阶段曾发生过流体沸腾作用和混合作用。岩浆水在流体成矿过程中占主导地位。

**关键词:** 夕卡岩; 铁铜矿床; 流体包裹体; 成矿机制; 安庆; 安徽省

中图分类号: P59; P61 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2008)01-0027-10

## Fluid inclusions of Anqing skarn-type Fe-Cu deposit, Anhui Province

YANG Guang-shu<sup>1,2</sup>, WEN Han-jie<sup>1\*</sup>, HU Rui-zhong<sup>1</sup>, QIN Chao-jian<sup>1</sup> and YU Wen-xiu<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Fluid inclusion study of Anqing skarn-type Fe-Cu deposit shows that the ore-forming fluid belongs to NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O solution system, and the primary ore-forming fluid is methane-rich magmatic hydrothermal fluid characterized by high temperature and high salinity. The fluid inclusions of the skarn-stage have high homogeneous temperatures (400–570 °C) and high salinities (40%–46% NaCl), indicating the fluid activities during skarn formation and Fe mineralization process. The fluid inclusions of the quartz-sulfide stage have moderate–low homogeneous temperatures (124–396 °C), and large variation of salinities (6%–38% NaCl), indicating the fluid activities of Cu mineralization process. The homogeneous temperature and salinity of the fluid inclusions dropped from early to late ore-forming stages, and the boiling and mixing of fluids occurred in the main mineralizing stage of Cu. The magmatic water is dominant in the ore-forming process.

**Key words:** skarn; Fe-Cu deposit; fluid inclusion; metallogenic mechanism; Anqing; Anhui Province

## 0 引言

长期以来, 由于夕卡岩矿床重要的工业意义、特殊的矿物组合以及成矿环境和过程的复杂多样性, 对它的研究长盛不衰, 成果丰硕<sup>[1-4]</sup>。近 20 多年来, 在成矿地质环境与物理化学条件、矿床多成因、成矿流体、同位素及实验模拟等方面的研究都有较大进展, 尤其在流(熔)体包裹体和实验模拟研究等方面

取得了许多新认识, 为探索夕卡岩矿床的形成提供了更多直接有力的证据<sup>[5-7]</sup>。安庆夕卡岩型铁铜矿床(以下简称安庆铜矿)位于安庆市月山镇, 是长江中下游地区铜-金-铁成矿带的重要组成部分, 20 世纪 80 年代以来, 先后有人提出夕卡岩矿浆贯入成矿<sup>[8-11]</sup>、接触交代矿床<sup>[12-14]</sup>和块状硫化物矿床<sup>[15]</sup>等观点。基于此, 本研究拟通过对与矿化密切相关的夕卡岩和闪长岩体(透辉石化)中的石榴子石、透辉石、石英、方解石等矿物中的流体包裹体研究, 重点

收稿日期(Received): 2007-06-05; 改回日期(Revised): 2007-07-12; 接受日期(Accepted): 2007-09-11

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-102)

作者简介: 杨光树(1980-), 男, 博士研究生, 矿床地球化学专业。

\* 通讯作者(Corresponding author): WEN Han-jie, E-mail: wenhanjie@vip.gyg.ac.cn, Tel: +86-851-5891723

讨论安庆铁铜矿床成矿流体的来源、特征、演化规律及其成矿机制。

### 1 矿区地质背景

安庆铜矿位于月山镇东北 2 km 处,为月山矿田的重要组成部分。构造位置上属于扬子地块北缘沿江断裂带中段,月山岩体东枝北侧前缘地带,百子山背斜向北倾伏端与月山 - 总铺近东西向隐伏断裂交汇处。

矿区主要出露三叠系地层,主要赋矿地层为下三叠统南陵湖组 (T<sub>1n</sub>) 和中三叠统月山组 (T<sub>2y</sub>) 经由灰岩、白云岩热变质形成的大理岩和白云大理岩。矿床构造复杂,龟形山背斜、马鞍山背斜及 NW 向的 F<sub>1</sub> 断层为主要的控矿构造 (图 1)。月山岩体与铁铜成矿作用密切相关 [13], 主要由闪长岩、石英二长闪长岩和石英闪长岩等组成, 岩体 SiO<sub>2</sub> 含量平均为 59.2%, Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O 平均含量大于 8.0%, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 比值平均为 1.5。具有富硅富碱特征,与 I 型花岗岩特征相似 [16]。岩体 Rb-Sr 同位素年龄在 143 ~ 147 Ma

之间 [17], 角闪石 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄为 136 Ma [18], 为燕山早期中酸性侵入岩。产于闪长岩体与大理岩的接触带内的主矿体, 长约 1200 m, 平均厚 28 m, 延深 270 ~ 630 m, 埋深 -280 ~ -580 m, 被 NW 向产出的 F<sub>1</sub> 断层分成东西两块, 导致围岩 (大理岩) 呈舌状插入到闪长岩岩体中, 在剖面上呈 S 形弯曲, 形成了由马头山 - 西马鞍山 - 东马鞍山分布的大型夕卡岩含铜磁铁矿体。

矿化夕卡岩与围岩在空间上呈截然接触关系, 界限十分清楚。外接触带发育较窄的石榴石夕卡岩及大量磁铁矿体, 石榴子石结晶较好, 局部有富集现象, 内带发育很宽的透辉石夕卡岩, 与经典的夕卡岩分带模式相反。夕卡岩矿物主要为钙铁系列, 以红褐色钙铁榴石、绿色次透辉石为主。矿物的空间分布与夕卡岩分带特征相同, 外接触带主要为磁铁矿及少量石榴石夕卡岩型铁铜矿石, 向内带逐渐过渡为透辉石夕卡岩型铜矿石, 硫化物含量增加, 磁铁矿及石榴子石减少, 即矿化在外带以铁铜矿化为主, 中心带以铜矿化为主, 内带矿化弱, 有少量铜 (金) 矿化。结合野外地质调查、镜下夕卡岩矿物共生组合

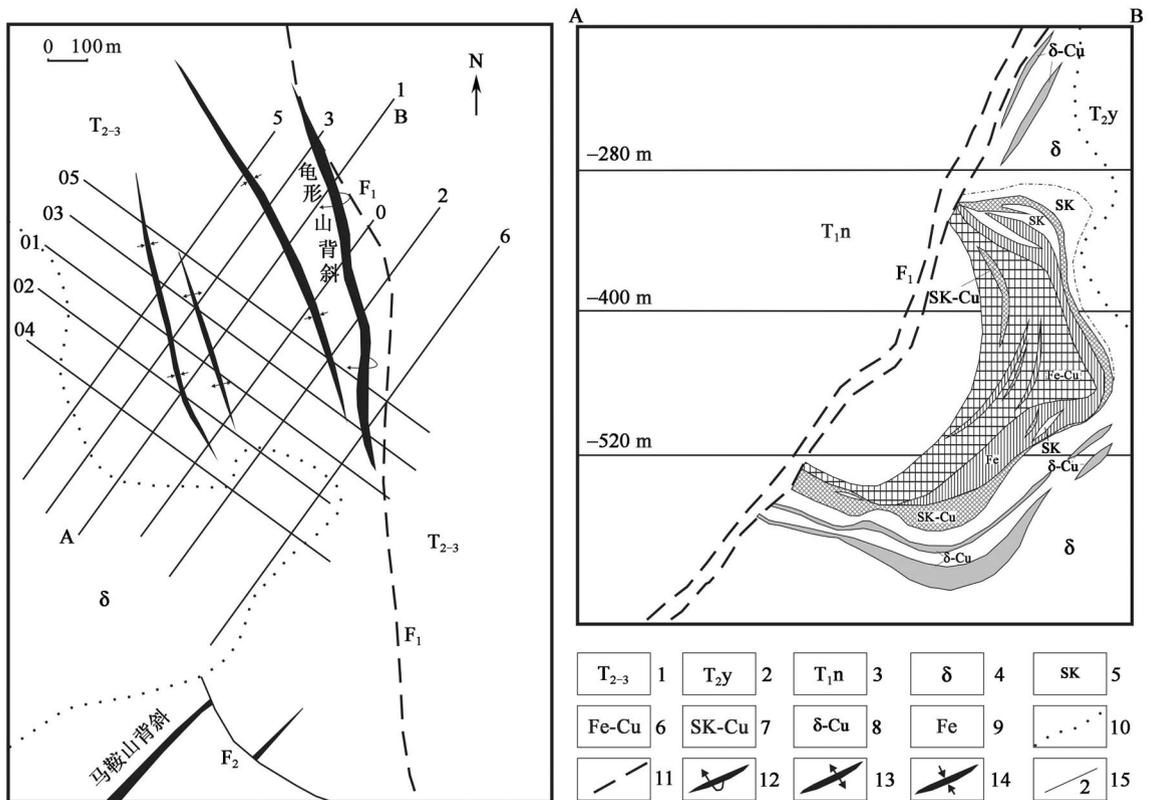


图 1 安庆铁铜矿地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the Anqing Fe-Cu deposit

1. 中上三叠统; 2. 中三叠统月山组; 3. 中三叠统扁担山组; 4. 闪长岩; 5. 夕卡岩; 6. Fe-Cu 矿体; 7. 夕卡岩型铜矿体; 8. 闪长岩型铜矿体; 9. 磁铁矿矿体; 10. 地质界线; 11. 断层; 12. 倒转背斜; 13. 背斜轴; 14. 向斜轴; 15. 勘探线及编号。

及穿插关系和前人研究<sup>[11,13]</sup>,我们认为,该矿床的成岩-成矿作用主要有两期:夕卡岩-磁铁矿期和石英-硫化物期。

(1)夕卡岩-磁铁矿期,为夕卡岩的成岩期和铁矿床的成矿期。可分为三个阶段:早期夕卡岩阶段、磁铁矿阶段和晚期夕卡岩阶段。早期夕卡岩阶段为矿床主要的夕卡岩造岩阶段,在接触交代和热液蚀变作用下,形成了石榴子石、(次)透辉石、方柱石等主要的夕卡岩矿物以及少量磁铁矿。石榴子石常为褐色,自形一半自形晶,颗粒较大,部分达 3 cm 以上;镜下观察到其常具有环带结构,熔蚀包含透辉石,有时见到其本身被周围磁铁矿熔蚀交代,具熔蚀港湾及熔蚀边,可见其形成早于磁铁矿而晚于透辉石。透辉石分布较广,夕卡岩带至蚀变闪长岩带均有发育,浅绿色粒状、束状,在外带常被石榴子石、磁铁矿等交代,形成颜色较深的次透辉石。磁铁矿阶段形成了该矿床中铁矿的主矿体,致密块状、浸染状磁铁矿形成于接触面附近,镜下见到磁铁矿呈不规则状充填于石榴子石晶隙中,又常被黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿等交代。晚期夕卡岩阶段主要为一系列呈脉状产出的石榴子石、次透辉石及少量磁铁矿,充填、穿切较早形成的夕卡岩和磁铁矿体,其中又常充填有硫化物及碳酸盐细脉。

(2)石英-硫化物期,包括石英-硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段。石英-硫化物阶段为铜矿的主成矿阶段,形成了铜的硫化物矿床,主要蚀变类型有绿泥石化、绿帘石化、硅化和碳酸盐化等。石英-碳酸盐阶段,伴随着少量的金矿化,该阶段形成的碳酸盐主要以细脉状充填于早期形成的夕卡岩型铜矿体及磁铁矿裂隙中,主要蚀变类型为硅化、碳酸盐化、绿泥石化和绢云母化等。

## 2 流体包裹体研究

### 2.1 流体包裹体类型和组合

研究样品分别采自安庆铜矿-520 m 中段 1 号线及-400 m、-510 m、-580 m 中段的部分钻孔。为了解成矿流体的演化规律,我们重点挑选了-520 m 中段 1 号线从岩体(闪长岩)到外接触带的部分透辉石化闪长岩、含铜夕卡岩及石英碳酸盐脉磨制了包裹体薄片 100 余片,对石榴子石、透辉石、石英和方解石中的流体包裹体进行了镜下岩相学研究。

按常温下包裹体中各相态成分、比例及组合关系,将所观察到的流体包裹体分为含子晶多相包裹体(I型)、气液包裹体(II型)和纯液体包裹体(III型)三类,其中 I 型包裹体据其产状及形态又可分为(多)大子晶型(Ia)和单(小)子晶型(Ib),如图 2a 和图 2b 所示;II 型包裹体据其产状、颜色又可分为 IIa 和 IIb 型,如图 2c 和图 2d 所示。所观察到的流体包裹体均属盐水体系,未发现富 CO<sub>2</sub> 包裹体。

I 型包裹体主要发育于石榴子石、透辉石和石英中。Ia 型包裹体为原生包裹体,大小 8~20 μm,多为不规则状,孤立产出,气相平均约占包裹体体积的 25%,一般有一个大立方体状石盐子晶,部分包裹体中还含有一个小钾盐子晶;Ib 型包裹体主要发育于石英中,大小 6~14 μm,形态不规则,或单独产出,或与 II 型包裹体伴生,气泡小,气相体积分数为 5%~10%,只含一个小立方体状石盐子晶;IIa 型包裹体多产于石英硫化物及石英碳酸盐的石英晶体中,一般在 6~20 μm 之间,椭圆或近四边形,气泡较大,气相体积分数为 20%~40%,包裹体颜色发黑;IIb 型主要发育于石英硫化物及石英碳酸盐中的石英和方解石晶体中,一般不超过 10 μm,气泡小,气液比小于 15%,III 型和 III 型包裹体常成群分布于后期脉状产出的石英、方解石中,或线性展布于它们的愈合裂隙中,多为后期捕获的次生包裹体。

结合各类包裹体特征及产出关系,Ia 型包裹体主要形成于夕卡岩期及石英硫化物早期,石榴子石、透辉石中的原生三相包裹体特征反映出初始成矿流体的高盐度特征。Ib 及部分 IIa 型包裹体形成于夕卡岩成岩末期及石英硫化物早期,II 型、III 型包裹体主要形成于石英硫化物中晚期。

### 2.2 流体包裹体的均一温度和盐度

在对各类包裹体特征进行了详细观察记录的基础上,择其典型者进行了显微测温分析。测温仪器为中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室流体包裹体实验室的英国产 Linkam THMSG 600 型冷热台,测温范围为-196~+600 °C,测量精度在-100~25 °C 范围内为±0.1 °C,25~400 °C 范围内为±0.5 °C,400 °C 以上为±1 °C。对 I 型包裹体测定了均一温度( $t_h$ )和子矿物消失温度( $t_m$ );对 II 型包裹体测定了冰点温度( $t_m$ )和均一温度( $t_h$ )。I 型包裹体的盐度由于子矿物熔化温度获得<sup>[19]</sup>,对同时含有石盐和钾盐的几个包裹体分别测试了氯化钠和氯化钾子晶的熔化温度,其中氯化钾

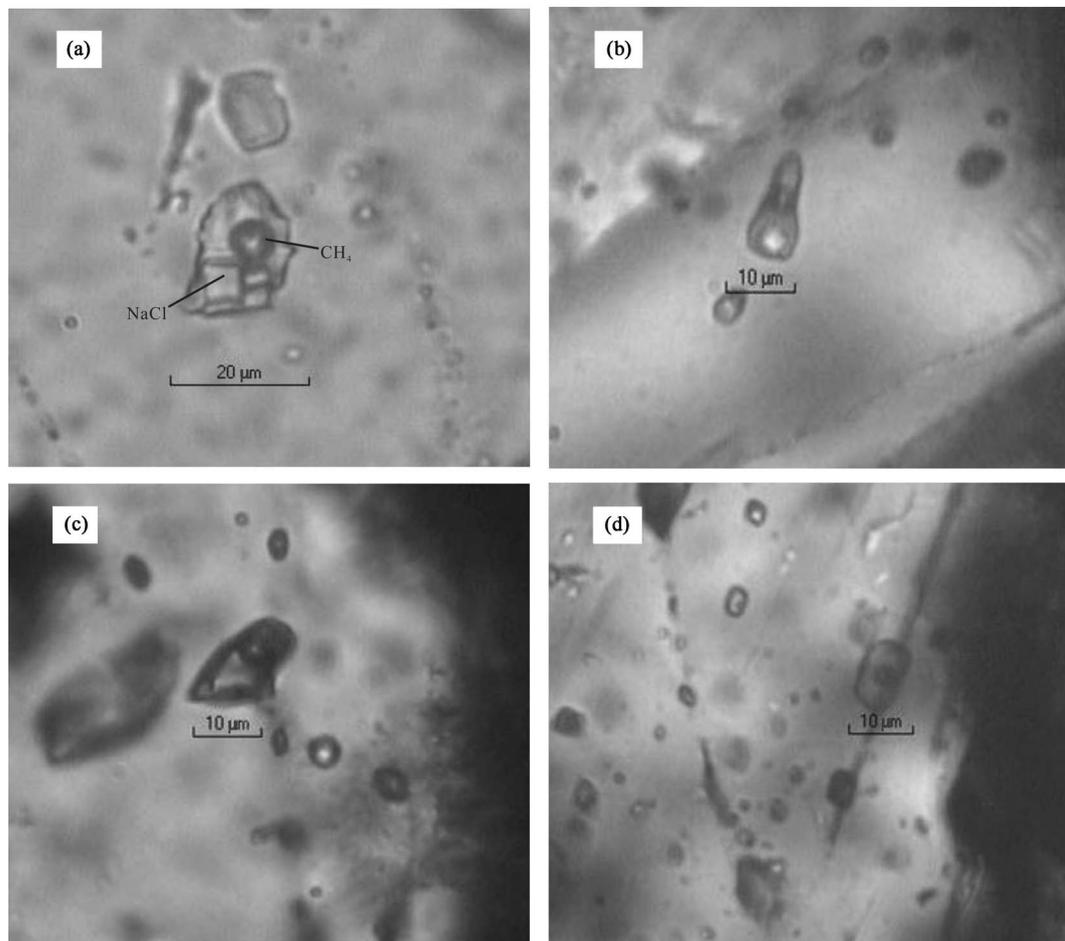


图 2 流体包裹体显微照片

Fig. 2 Micro-photos of fluid inclusions in Anqing skarn-type Fe-Cu deposit

(a) 透辉石中 Ia 型包裹体; (b) 石英中 Ib 型包裹体; (c) 石英中 IIa 型包裹体; (d) 方解石中 IIb 型包裹体。

子晶熔化温度平均为 180 °C, 不超过 200 °C。II 型包裹体的盐度 (S) 通过 H<sub>2</sub>O-NaCl 体系盐度 - 冰点公式<sup>[20]</sup>获得:

$$S = 0.00 + 1.78 t_m - 0.0442 t_m^2 + 0.000557 t_m^3$$

式中: S 为盐度 (% NaCl); t<sub>m</sub> 为冰点温度 (°C)。

测温结果见表 1 和图 3。由测温结果可见, 安庆铜矿流体包裹体均一温度主要分布于高温段的 450 ~ 570 °C 之间和中低温段的 130 ~ 300 °C 之间, 均一温度峰值在 260 °C 左右。大部分高温流体包裹体为原生包裹体, 多为夕卡岩期被捕获的, 代表了早期成矿流体的活动情况。王训诚等<sup>[8]</sup>用爆裂法测得磁铁矿及铁铜矿体的形成温度在 415 ~ 569 °C 之间, 与我们的测试结果相近。因此, 高温流体包裹体基本可以反映出该矿床磁铁矿体和夕卡岩的形成温度。中低温流体包裹体是在成矿中、晚期(石英硫化物中、晚阶段和石英碳酸盐阶段)被捕获的, 对应的均一温度在 124 ~ 396 °C 之间, 盐度在 6% ~ 38% NaCl 之间, 相对于早期成矿流体, 流体的温度和盐

度都明显降低, 且变化范围较大。据前人研究, 安庆铜矿铜的矿化主要集中在石英硫化物阶段, 部分发

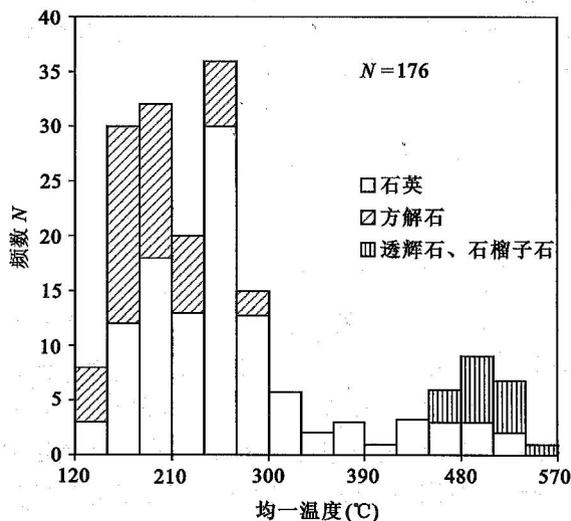


图 3 安庆夕卡岩型铁铜矿床流体包裹体均一温度直方图  
Fig. 3 Histogram of homogenization temperatures of fluid inclusions in Anqing skarn-type Fe-Cu deposit

表 1 安庆夕卡岩型铁铜矿床流体包裹体显微测温结果

Table 1 Micro-thermoprobng results of fluid inclusions from the Anqing skarn-type Fe-Cu deposit

样品号	寄主矿物	类型	大小( $\mu\text{m}$ )	均一温度( $^{\circ}\text{C}$ )	子晶熔化温度( $^{\circ}\text{C}$ )	冰点( $^{\circ}\text{C}$ )	盐度(% NaCl)
1f-7 含铜夕卡岩	透辉石、石榴子石	Ia	6~20	489~525	180~375		41.0~45.0
	充填石英	Ia	12~17	466~513	175~365		40.0~44.0
	石英、硫化物	IIa	8~15	222~378		-16.5~-19.5	20.0~22.0
1f-8 含铜夕卡岩	透辉石	Ia	5~12	515~556	197~390		42.0~46.0
	石英	Ia	6~16	470~532	184~360		31.0~43.0
	石英、硫化物	IIa	8~18	201~365		-17.5~-20.4	20.6~22.7
	石英、方解石脉	IIa	8~20	170~293		-10.7~-16.0	14.7~19.5
	石英、方解石脉	IIIb	6~12	124~189		-7.7~-14.3	11.3~18.0
1f-14 含铜闪长岩 (透辉石化)	石英	Ib	12	218	170		30.5
	石英	IIa	10~15	208~351		-15.0~-20.0	18.6~22.4
	方解石脉	IIa	9~12	183~238		-12.0~-14.5	16.0~18.2
	方解石脉	IIIb	7~10	133~180		-4.3~-12.5	6.9~16.4
CK20-14 夕卡岩	充填石英	Ia	8~12	396~522	306~365		38.9~44.0
	石英、硫化物	IIa	8~14	237~341		-14.8~-21.0	18.5~23.0
	方解石	IIa	10~12	175~240		-9.5~-15.5	13.4~18.7
	方解石	IIIb	5~10	131~219		-4.7~-11.0	7.5~15.0
CK20-48 含铜闪长岩 (透辉石化)	石英	Ib	8~10	247~352	177~195		30.7~31.5
	石英	IIa	9~13	234~260		-12.5~-16.0	16.7~19.5
	石英	IIIb	6~10	155~232		-4.5~-9.3	7.2~13.2
	方解石	IIa	9~12	179~236		-10.5~-12.0	14.5~16.0
	方解石	IIIb	6~9	128~194		-3.7~-8.5	6.0~12.3
CK4-27 含铜夕卡岩	透辉石	Ia	6~10	426~518	355~385		43.0~46.0
	石英脉	IIa	8~13	187~236		-7.5~-14.3	11.1~18.0
	石英脉	IIIb	5~10	134~180		-4.0~-11.5	6.5~15.5
CK4-49 夕卡岩	石英、硫化物	Ib	8~12	228~251	169~186		30.5~31.4
	石英、硫化物	IIa	7~13	192~258		-5.0~-15.5	8.0~19.0
	石英、硫化物	IIIb	7~10	149~214		-4.5~-12.5	7.2~16.4
	方解石脉	IIa	8~10	168~200		-7.5~-9.0	11.1~12.9
	方解石脉	IIIb	6~9	145~183		-5.0~-8.0	7.9~11.7
CK1-20 闪长岩	石英	IIa	8~12	196~263		-13.3~-17.0	17.2~20.2
	石英、方解石脉	IIa	9~12	170~226		-9.0~-14.5	12.9~18.2
	石英、方解石脉	IIIb	5~8	157~200		-4.5~-10.0	7.2~14.0

生于晚期夕卡岩阶段<sup>[14]</sup>。因此,中低温流体包裹体代表了铜的主成矿阶段及成矿晚期流体的活动情况。

将测温结果投影到包裹体均一温度-盐度关系图(图4)上可发现,早期成矿流体包裹体类型主要为Ia型,均一温度范围为435~556 $^{\circ}\text{C}$ ,盐度为40%~46% NaCl,可见初期成矿流体具有高温高盐度特征;从夕卡岩末期到石英硫化物早期(石英硫化物阶段)流体包裹体类型主要为Ib型及部分IIa型,均一温度范围为218~396 $^{\circ}\text{C}$ ,盐度为17%~31% NaCl,在夕卡期向石英硫化物期过渡过程中,流体的

温度和盐度均大幅降低,可能是流体上升时自身温度降低以及大气降水混入所致。石英硫化物中晚阶段流体包裹体类型主要为IIa型、部分IIIb型及少量Ib型,均一温度范围为183~292 $^{\circ}\text{C}$ ,盐度为8%~30% NaCl,显示了石英硫化物阶段成矿流体温度和盐度继续降低,大气降水参与比例加大。石英碳酸盐阶段流体包裹体类型主要为IIIb型、III型和部分IIa型,均一温度范围为124~234 $^{\circ}\text{C}$ ,盐度为6%~23% NaCl,碳酸盐细脉中流体包裹体的均一温度和盐度都很低,一般不超过160 $^{\circ}\text{C}$ 和10% NaCl,表明在成矿晚期有大量大气降水介入,成矿流体被大大

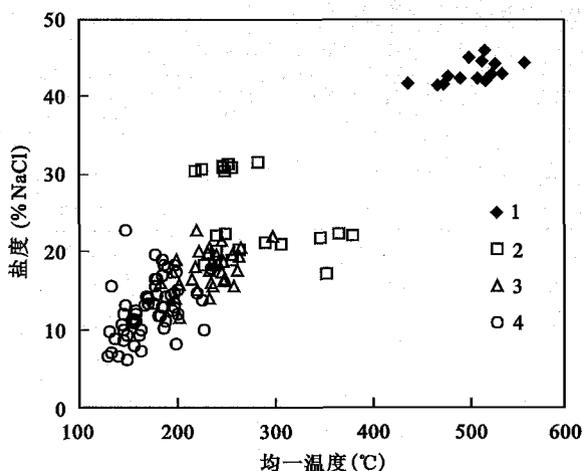


图4 流体包裹体盐度-均一温度关系图

Fig. 4 Homogenization temperatures and salinity of fluid inclusions from Anqing skarn-type Fe-Cu deposit

1. 夕卡岩阶段; 2. 晚期夕卡岩阶段-早期石英硫化物阶段;
3. 石英硫化物中晚阶段; 4. 石英碳酸岩阶段。

稀释,成矿趋于结束。

在石英硫化物阶段,常在一个石英颗粒内发现有I型包裹体和II型包裹体伴生的现象,许多不同盐度伴生产出包裹体具有相近均一温度值,说明在铜的主矿化阶段发生了广泛的流体不混溶(沸腾)作用<sup>[21-23]</sup>。结合包裹岩相学特征和测温结果,流体沸腾作用的温度范围在230~300℃之间,峰值出现在250℃左右,前人资料也显示,安庆铜矿和铜牛井热液脉型铜(金)、铝矿床成矿过程中都发生过流体沸腾作用<sup>[14,24]</sup>。流体沸腾作用对安庆铜矿中硫化物矿床(铜矿床)的形成具有十分重要的意义。对比前人研究结果,在整个成矿过程中,从早期到晚期,成矿流体温度和盐度降低,其中从磁铁矿形成到铜的主要矿化阶段温度降低很明显。从深部到浅部,同一成矿阶段的流体温度逐渐降低,表明成矿流体源于深部。

### 2.3 流体包裹体的显微激光拉曼探针成分

显微激光拉曼光谱是一种最有效的单个包裹体非破坏性测定方法<sup>[25-26]</sup>,由各类流体包裹体的拉曼光谱峰值扫描分析,可获得不同流体的组成与性质,研究其来源及源区信息。测试工作在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室的显微激光拉曼光谱实验室进行,实验仪器为英国Renishaw公司生产的inVia Reflex型共焦显微激光拉曼光谱仪,激光波长514.5 nm,激光功率20 mW,激光光点直径 $\leq 1 \mu\text{m}$ ,扫描范围100~4500  $\text{cm}^{-1}$ ,

分辨率1~2  $\text{cm}^{-1}$ 。

对各类包裹体气泡、液相、部分子晶以及包裹体寄主矿物进行了激光拉曼光谱峰值扫描,各类寄主矿物显示出尖锐鲜明的特征峰值,液相成分主要为 $\text{H}_2\text{O}$ ,部分Ia型包裹体中还含少量 $\text{CH}_4$ ,气相成分以 $\text{CH}_4$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 为主,早、晚期成分差异较大,夕卡岩期流体包裹体(Ia型)气相富含 $\text{CH}_4$ (图5a);石英硫化物期流体包裹体(Ib和II型)气相成分少部分为 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ 组合(图5b和图5c),多数则以 $\text{H}_2\text{O}$ 为主(图5d)。综合岩相学特征、激光拉曼光谱分析及前人研究,流体包裹体中的 $\text{CH}_4$ 主要发育于原生Ia型包裹体内,这种包裹体是在深部岩浆上升后,经历同化混染(AFC)等作用形成的,可见 $\text{CH}_4$ 极有可能为深部岩浆带来的。石英硫化物阶段中晚期流体包裹体中很少有 $\text{CH}_4$ ,表明其在成矿的过程中不断挥发逸出,至成矿晚期的石英碳酸盐阶段,流体包裹体成分基本上是水,表明成矿晚期有大量大气降水的混入。

### 2.4 流体包裹体的密度和压力

刘斌<sup>[27-28]</sup>根据实验数据推导了 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系不同盐度流体包裹体的密度式:

$$\rho = A + B \times t + C \times t^2,$$

式中: $\rho$ 为流体密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $t$ 为均一温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $A$ 、 $B$ 和 $C$ 为无量纲参数,不同盐度流体对应不同值。

通过上式计算得到成矿流体密度在0.80~1.07  $\text{g}/\text{cm}^3$ 之间,大部分流体密度介于0.90~1.00  $\text{g}/\text{cm}^3$ 之间,与前人研究<sup>[29]</sup>认为的大多数岩浆热液流体密度( $< 1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ )相当,说明在整个成矿过程中,岩浆热液流体起着主导作用。

一般来说,从均匀流体中捕获的包裹体,其均一温度和压力仅能代表流体的温度和压力下限<sup>[30]</sup>,需要进行压力校正;而当流体发生沸腾作用时,流体内压与外压相等,此时捕获的包裹体,其均一温度和压力即可代表流体的温度和压力,无需温度和压力校正。由等容式<sup>[31-32]</sup>进行压力估算,获得流体包裹体形成压力范围在64~80 MPa之间。在铜的主成矿阶段(石英硫化物阶段),石英颗粒中产有沸腾包裹体,平均均一温度为250℃左右,平均盐度约为20% NaCl,由等容式计算得到其形成压力约为73 MPa;当时流体主要受静岩压力作用,按静岩压力 $p = \rho_{\text{岩石}} \times g \times H$ ( $\rho$ 为岩石平均密度(2.7  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), $g$ 为重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ ), $H$ 为上覆岩石厚度(m),即成矿深度),可估算出其形成深度约为2.7 km。

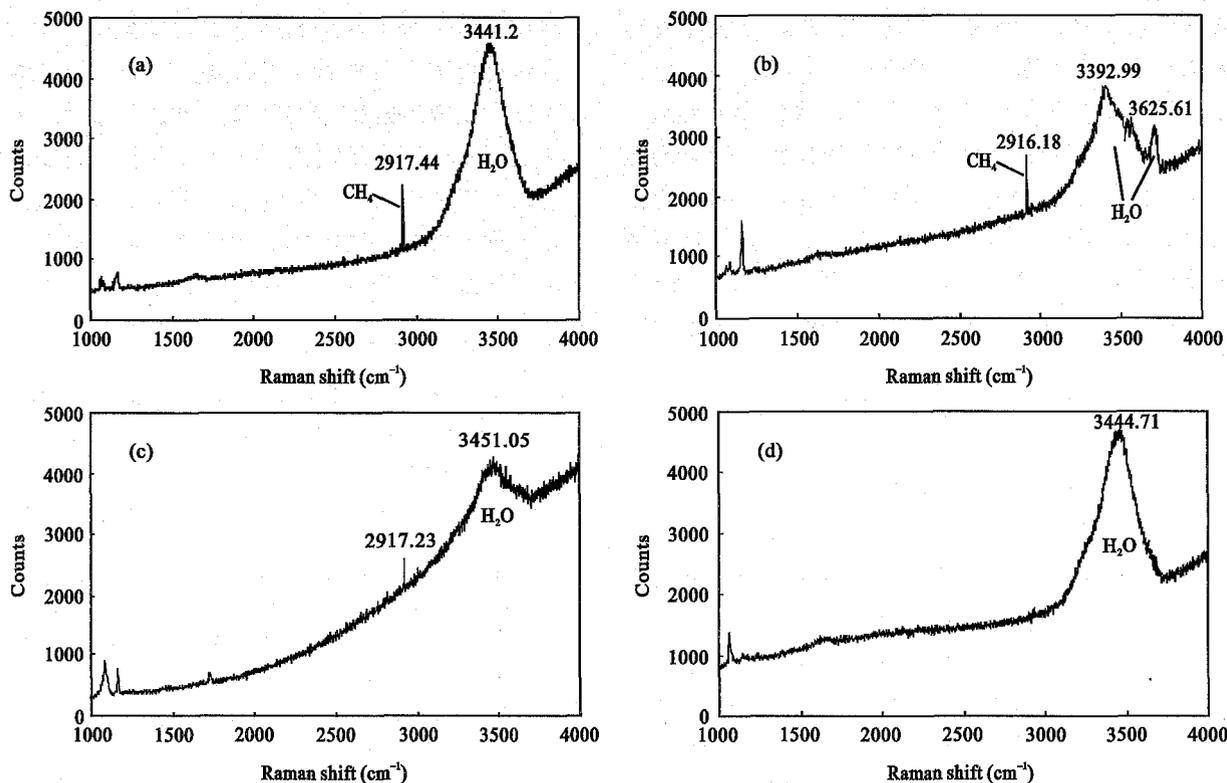


图 5 安庆铜矿部分流体包裹体的激光拉曼光谱图

Fig. 5 Laser Raman spectra of the fluid inclusions in Anqing skarn-type Fe-Cu deposit

(a) 透辉石中 Ia 型包裹体; (b) 石英中 Ib 型包裹体; (c) 石英中 IIa 型包裹体; (d) 方解石中 IIb 型包裹体。

### 3 流体演化和成矿机制

前人曾对该地区做过大量氢氧同位素研究<sup>[11, 33-36]</sup>,并取得了较一致的认识。将前人数据投影到图 6 上可发现,夕卡岩期  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}(\text{H}_2\text{O})$  值分别为  $7.55\text{‰} \sim 12.40\text{‰}$  和  $-68\text{‰} \sim -78\text{‰}$ , 基本处于初始岩浆水组成范围内,在夕卡岩末期有少量大气降水混入<sup>[35]</sup>。石英硫化物期  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}(\text{H}_2\text{O})$  值为  $3.14\text{‰} \sim 6.91\text{‰}$  和  $-65\text{‰} \sim -78\text{‰}$ , 大气降水比例随成矿作用的进行不断增加。在成矿晚期,大气降水大量混入,所占比例大于 30% 时,成矿作用结束<sup>[33]</sup>。同位素测定的结果与我们的流体包裹体测试结果十分吻合。

综合流体包裹体研究和前人工作<sup>[13, 38]</sup>认为,月山闪长质岩浆是由上地幔源区物质发生不同程度部分熔融形成的富 Sr、富 LREE 的碱性玄武质岩浆在上升过程中,经历了结晶分异作用和与地壳物质的同化混染作用形成的,初始岩浆具有富铁、富碱的特征;在闪长岩体形成过程中,岩浆发生了较彻底的熔-流作用<sup>[13]</sup>,有较多成矿元素进入到了分离出的

流体中,形成了最初富  $\text{CH}_4$  的高温高盐度成矿流体。实验研究证明<sup>[39-41]</sup>,流体中的铁、铜等金属元素在高温下 ( $> 300\text{ }^\circ\text{C}$ ) 主要以氯的络合物形式存在和迁移,常见的络合物类型有  $\text{Na}_2(\text{Fe}_2\text{Cl}_6)$ 、 $\text{CuCl}$ 、 $\text{CuCl}_2$  和  $\text{CuClOH}$  等。在成矿流体运移过程中,不断

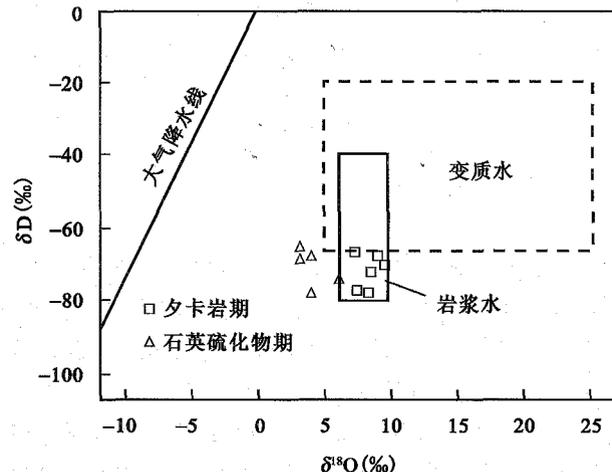
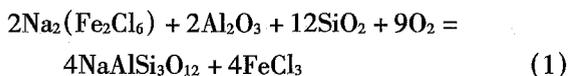


图 6 安庆夕卡岩型铁铜矿床成矿流体氢氧同位素组成

Fig. 6 Hydrogen and oxygen isotopic compositions of ore-forming fluid in Anqing skarn-type Fe-Cu deposit

底图据 Taylor<sup>[37]</sup>,数据分别引自郭吉保等<sup>[11]</sup>、周涛发等<sup>[33]</sup>和肖新建等<sup>[36]</sup>。

与围岩发生复杂的水-岩反应,透辉石、石榴子石等矿物首先结晶出来,形成了早期夕卡岩;同时,流体中除进一步富集了以络合物形式进入的成矿元素外还带进了硫等部分来自地层的载体元素,体系的温度  $t$ 、氧逸度  $f_{O_2}$  及 pH 值不断发生变化,到一定程度,成矿流体体系的化学平衡被打破,铁优先从流体中分离出来,以磁铁矿的形式在接触带上有利的构造位置大量沉淀,形成了铁的主要矿床。其过程可大致表示为:



接触带上的碳酸盐中和了生成的盐酸,使得反应不断朝着磁铁矿生成的方向进行。

随着成岩-成矿作用的进行与演化,在冷却作用、大气降水及燕山期复杂构造活动的影响下,成矿流体的盐度和温度、压力降低,在石英硫化物阶段发生了广泛沸腾作用,  $\text{CH}_4$  等挥发分从成矿流体中分离逸出,致使铜以硫化物的形式大量从流体中沉淀出来,叠加于早期形成的夕卡岩和磁铁矿体上,或以石英-硫化物脉等形成充填于构造裂隙中,形成了金属硫化物矿床。其主要反应为:



模拟实验研究<sup>[42]</sup>也表明,流体沸腾作用能促使  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  等气体从流体中逸出,改变流体的 pH 值,破坏原体系的化学平衡,导致金属矿物的大量沉淀。可见,沸腾作用可能是导致该矿床中铜以硫化物的形式沉淀成矿的主要因素。这与长江中下游地区几个典型夕卡岩型或斑岩型铜矿床的形成机制具有一致性。

## 4 结 论

(1) 安庆夕卡岩型铁铜矿床成矿早期主要发育富  $\text{CH}_4$  的含子晶多相包裹体,中晚期主要发育气液两相包裹体,所测定的包裹体均属  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  体系,未见富  $\text{CO}_2$  的包裹体。

(2) 流体包裹体均一温度主要分布于高温段 ( $450 \sim 560\text{ }^\circ\text{C}$ ) 和中低温段 ( $130 \sim 260\text{ }^\circ\text{C}$ ), 盐度变化较大,在  $6\% \sim 46\%$   $\text{NaCl}$  之间;在整个成矿过程中,流体的温度和盐度不断降低,平均温度在  $250\text{ }^\circ\text{C}$  时,发生了广泛的流体沸腾作用。

(3) 矿床流体包裹和氢氧同位素研究表明,成

矿流体为一种由深部岩浆上升后发生熔-流作用形成的类似于岩浆性质,具有高盐度及富含  $\text{CH}_4$  等还原性挥发分特征的岩浆热液,与围岩的水-岩作用导致了磁铁矿大量沉淀,沸腾作用及大气降水混入引起的流体中  $\text{Cl}^-$  浓度(盐度)变化导致了金属硫化物大量沉淀,最终形成了安庆夕卡岩型铁铜矿床。岩浆热液在整个成矿过程中起着主导作用。

## 参考文献(References):

- [1] Einaudi M T, Burt D M. Introduction: Terminology, classification and composition of skarn deposits [J]. *Econ Geol*, 1982, 77(4): 745-760.
- [2] 赵斌. 中国主要夕卡岩及夕卡岩型矿床[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-342.  
Zhao Bin. Main Skarns and Skarn Deposits in China [M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-342 (in Chinese with English abstract).
- [3] 赵斌, 李院生, 赵劲松. 岩浆成因夕卡岩的包裹体证据[J]. *地球化学*, 1995, 24(2): 198-200.  
Zhao Bin, Li Yuan-sheng, Zhao Jin-song. The evidence from inclusions for magma-genetic skarn [J]. *Geochimica*, 1995, 24(2): 198-200 (in Chinese with English abstract).
- [4] 赵一鸣, 林文蔚, 毕承恩, 李大新, 蒋崇俊. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1-354.  
Zhao Yi-ming, Lin Wen-wei, Bi Cheng-si, Li Da-xin, Jiang Chong-jun. Skarn Deposits of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 1-354 (in Chinese with English abstract).
- [5] 赵一鸣. 夕卡岩矿床研究的某些重要新进展[J]. *矿床地质*, 2002, 21(2): 113-120, 136.  
Zhao Yi-ming. Some new important advances in study of skarn deposit [J]. *Mineral Deposit*, 2002, 21(2): 113-120, 136 (in Chinese with English abstract).
- [6] 黄华盛. 矽卡岩矿床的研究现状[J]. *地学前缘*, 1994, 1(3/4): 105-111.  
Huang Hua-sheng. Advances in skarn deposits [J]. *Earth Sci Front*, 1994, 1(3/4): 105-111 (in Chinese with English abstract).
- [7] 赵劲松, 丘学林, 赵斌, 涂湘林, 虞珏, 芦铁山. 大冶-武山矿化夕卡岩的稀土元素地球化学研究[J]. *地球化学*, 2007, 36(4): 400-412.  
Zhao Jin-song, Qiu Xue-lin, Zhao Bin, Tu Xiang-lin, Yu Jue, Lu Tie-shan. REE geochemistry of mineralized skarns from Daye to Wushan region, China [J]. *Geochimica*, 2007, 36(4): 400-412 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王训诚, 周育才. 安徽省安庆铜铁矿床地质特征及成因探讨[J]. *地质与勘探*, 1995, 31(3): 16-23, 9.  
Wang Xun-cheng, Zhou Yu-cai. Geological characteristics and origin of Anqing Cu-Fe deposit, Anhui [J]. *Geol Prospect*, 1995, 31(3): 16-23, 9 (in Chinese with English abstract).
- [9] 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社,

- 1998: 1-351.
- Tang Yong-cheng, Wu Yan-chang, Chu Guo-zheng, Xing Feng-ming, Wang Yong-min, Cao Fen-yang, Chang Yin-fo. *Geology of Copper-Gold Polymetallic Deposits in the Along-Changjiang Area of Anhui Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-351 (in Chinese with English abstract).
- [10] 吴言昌, 常印佛. 关于岩浆砂卡岩问题[J]. 地学前缘, 1998, 5(4): 291-301.
- Wu Yan-chang, Chang Yin-fo. On the magmatic skarn [J]. *Earth Sci Front*, 1998, 5(4): 291-301 (in Chinese with English abstract).
- [11] 郭吉保, 钱雅倩, 黄耀生. 安庆夕卡岩矿床的氧同位素交换动力学[J]. 火山地质与矿产, 2000, 21(1): 23-29.
- Guo Ji-bao, Qian Ya-qian, Huang Yao-sheng. Oxygen isotope kinetics of skarn deposit in Anqing [J]. *Volcanol Mineral Resour*, 2000, 21(1): 23-29 (in Chinese with English abstract).
- [12] Pan Y M, Dong P. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: Intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits [J]. *Ore Geol Rev*, 1999, 15(4): 177-242.
- [13] 周涛发, 岳书仓. 安徽月山地区成岩成矿作用关系研究 [J]. 火山地质与矿产, 1995, 16(2): 55-66.
- Zhou Tao-fa, Yue Shu-cang. Studies on relationships between petrogenesis and copper mineralization in Yueshan district, Anhui Province [J]. *Volcanol Mineral Resour*, 1995, 16(2): 55-66 (in Chinese with English abstract).
- [14] Zhou Taofa, Yuan Feng, Yue Shucang, Liu Xiaodong, Zhang Xin, Fan Yu. Geochemistry and evolution of ore-forming fluids of the Yueshan Cu-Au skarn- and vein-type deposits, Anhui Province, South China [J]. *Ore Geol Rev*, 2007, 31(1-4): 279-303.
- [15] Xu G, Zhou J. The Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Tongling mineral district, China: Synorogenic remobilization of a stratiform sulphide deposit [J]. *Ore Geol Rev*, 2001, 18(1/2): 77-94.
- [16] 陈江峰, 周泰禧, 李学明, Foland K A, 黄承义, 卢伟. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩的源区锶、钕同位素制约 [J]. 地球化学, 1993, 22(3): 261-268.
- Chen Jiang-feng, Zhou Tai-xi, Li Xue-ming, Foland K A, Huang Cheng-yi, Lu Wei. Sr and Nd isotopic constraints on source regions of the intermediate and acid intrusions from southern Anhui Province [J]. *Geochimica*, 1993, 22(3): 261-268 (in Chinese with English abstract).
- [17] 周涛发, 岳书仓, 袁峰, 刘晓东, 赵勇. 安徽月山岩体地球化学特征及成因机理分析 [J]. 高校地质学报, 2001, 7(1): 70-80.
- Zhou Tao-fa, Yue Shu-cang, Yuan Feng, Liu Xiao-dong, Zhao Yong. A discussion on petrological characteristics and genesis of Yueshan intrusion, Anhui Province [J]. *Geol J Univ*, 1995, 7(1): 70-80 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陈江峰, 李学明, 周泰禧, Foland K A. 安徽月山岩体的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄及与其有关的成矿时代估计 [J]. 现代地质, 1991, 5(1): 91-99.
- Chen Jiang-feng, Li Xue-ming, Zhou Tai-xi, Foland K A.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating for the Yueshan diorite, Anhui Province and the estimated formation time of the associated ore deposit [J]. *Geoscience*, 1991, 5(1): 91-99 (in Chinese with English abstract).
- [19] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 208-210.
- Lu Huan-zhang, Fan Hong-rui, Ni Pei, Ou Guang-xi, Shen Kun, Zhang Wen-huai. *Fluid Inclusions* [M]. Beijing: Science Press, 2004: 208-210 (in Chinese).
- [20] Bodnar R J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  solutions [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1993, 57(3): 683-684.
- [21] Meinert L D, Hefton K K, Mayes D, Tasiran I. Geology zonation and fluid evolution of the Big Gossan Cu-Au skarn deposit, Ertsberg district, Jaya [J]. *Econ Geol*, 1997, 92(5): 509-534.
- [22] Lu H Z, Liu Y M, Wang C L, Xu Y Z, Li H Q. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China [J]. *Econ Geol*, 2003, 98(5): 955-974.
- [23] 张德会. 流体的沸腾和混合在热液成矿中的意义 [J]. 地球科学进展, 1997, 12(6): 546-552.
- Zhang De-hui. Some new advances in ore-forming fluid geochemistry on boiling and mixing of fluids during the processes of hydrothermal deposits [J]. *Adv Earth Sci*, 1997, 12(6): 546-552 (in Chinese with English abstract).
- [24] 顾连兴, 陈培荣, 倪培, 徐兆文, 肖新建, 邱检生, 张遵忠, 张光辉. 长江中、下游燕山期热液铜-金矿床成矿流体 [J]. 南京大学学报(自然科学), 2002, 38(3): 392-407.
- Gu Lian-xing, Chen Pei-rong, Ni Pei, Xu Zhao-wen, Xiao Xin-jian, Qiu Jian-sheng, Zhang Zun-zhong, Zhang Guang-hui. Comparative research on ore-forming fluids for the main types of hydrothermal copper-gold deposits in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River [J]. *J Nanjing Univ (Nat Sci)*, 2002, 38(3): 392-407 (in Chinese with English abstract).
- [25] Burke E A J. Raman microspectrometry of fluid inclusions [J]. *Lithos*, 2001, 55(1-4): 139-158.
- [26] Yamamoto J, Kagi H, Kaneoka I, Lai Y, Prikhod'ko V S, Arai S. Fossil pressures of fluid inclusions in mantle xenoliths exhibiting rheology of mantle minerals: Implications for the geobarometry of mantle minerals using micro-Raman spectroscopy [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198(3/4): 511-519.
- [27] 刘斌, 段光贤.  $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$  溶液包裹体的密度式和等容式及其应用 [J]. 矿物学报, 1987, 7(4): 345-352.
- Liu Bin, Duan Guang-xian. The density and isochoric formulae for  $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$  fluid inclusions (salinity  $\leq 25\text{wt}\%$ ) and their applications [J]. *Acta Mineral Sinica*, 1987, 7(4): 345-352 (in Chinese with English abstract).
- [28] 刘斌. 中高盐度  $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$  包裹体的密度式和等容式及其应用 [J]. 地质论评, 2001, 47(6): 617-622.
- Liu Bin. Density and isochoric formulae for  $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$  inclusions with medium and high salinity and their application [J]. *Geol Rev*, 2001, 47(6): 617-622 (in Chinese with English abstract).
- [29] Roedder E. Fluid-inclusion evidence on the genesis of ores in

- sedimentary and volcanic rocks [M] // Wolf K H. Handbook of Strata-bound and Stratiform Ore Deposits: I. Principles and General Studies: Vol. 2, Geochemical Studies. New York: Elsevier, 1976: 67 - 110.
- [30] Roedder E, Bodnar R J. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1980, 8: 263 - 301.
- [31] Zhang Y G, Frantz J D. Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O using synthetic fluid inclusions [J]. *Chem Geol*, 1987, 64(3/4): 335 - 351.
- [32] Bodnar R J, Vityk M O. Interpretation of micro thermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions [M] // de Vivo B, Frezotti M L. *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications*. Blacksberg: Virginia Tech, 1994, 117 - 130.
- [33] 周涛发, 岳书仓. 月山地区铜成矿作用同位素地球化学研究[J]. *矿床地质*, 1996, 15(4): 341 - 350.  
Zhou Tao-fa, Yue Shu-cang. Isotope geochemistry of copper mineralization in Yueshan, Anhui [J]. *Mineral Deposit*, 1996, 15(4): 341 - 350 (in Chinese with English abstract).
- [34] Zhou Taofa, Yuan Feng, Yue Shucang, Zhao Yong. Two series of copper-gold deposits in the middle and lower reaches of the Yangtze River area and the hydrogen, oxygen, sulfur and lead isotopes of their ore-forming hydothermal systems [J]. *Sci China (D)*, 2000, 43(suppl): 208 - 218.
- [35] 周涛发, 岳书仓, 袁峰. 安徽月山矿田铜、金矿床氢氧同位素地球化学及成矿流体输运 - 化学反应成矿动力学 [J]. *安徽地质*, 2001, 11(2): 131 - 139.  
Zhou Tao-fa, Yue Shu-cang, Yuan Feng. H, O isotope geochemistry and transport-reaction dynamic processes of ore-forming fluid for Cu, Au deposits in the Yueshan orefield, Anhui Province [J]. *Geol Anhui*, 2001, 11(2): 131 - 139 (in Chinese with English abstract).
- [36] 肖新建, 倪培, 顾连兴, 李子颖. 铜陵 - 安庆地区若干热液矿床成矿流体研究[J]. *地质找矿论丛*, 2003, 18(3): 155 - 162.  
Xiao Xin-jian, Ni Pei, Gu Lian-xing, Li Zi-ying. Studies on the fluid features of various types of hydrothermal deposits in Tongling-Anqing region, Anhui province [J]. *Contrib Geol Mineral Resour Res*, 2003, 18(3): 155 - 162 (in Chinese with English abstract).
- [37] Taylor H P Jr. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits [C] // Barnes H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (2nd ed). New York: Wiley, 1979: 236 - 277.
- [38] 束学福. 安庆夕卡岩型铁铜矿床地质地球化学特征及铁质来源研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(3): 219 - 224.  
Shu Xue-fu. Geology and geochemistry of Anqing skarn-type Fe-Cu deposit and origin of iron materials [J]. *Bull Mineral Petrol Geochim*, 2004, 23(3): 219 - 224 (in Chinese with English abstract).
- [39] Hemley J J, Cygan G L, Fein J B, Robinson G R, d'Angelo W M. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems: I, Iron-copper-zinc-lead sulfides solubility reactions [J]. *Econ Geol*, 1992, 87(1): 1 - 22.
- [40] Bai T B, van Groos A F K. The distribution of Na, K, Rb, Sr, Al, Ge, Cu, W, Mo, La, and Ce between granitic melts and coexisting aqueous fluids [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(7/8): 1117 - 1131.
- [41] 周涛发, 刘晓东, 袁峰, 赵勇, 岳书仓. 安徽月山矿田成矿流体中铜金的迁移形式和沉淀的物理化学条件[J]. *岩石学报*, 2000, 16(4): 551 - 558.  
Zhou Tao-fa, Liu Xiao-dong, Yuan Feng, Zhao Yong, Yue Shu-cang. Migrating forms and depositional physicochemical conditions of copper, gold in hydrothermal solutions of Yueshan orefield, Anhui Province [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2000, 16(4): 551 - 558 (in Chinese with English abstract).
- [42] Drummond S E, Ohmoto H. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems [J]. *Econ Geol*, 1985, 80(1): 126 - 147.