

文章编号: 1001-1412(1999) 04-0001-07

# 成矿过程中流体的作用 及其主要研究方法

徐光平, 翟建平, 胡 凯

(南京大学 地球科学系, 南京大学 成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

**摘 要:** 流体在成矿过程中扮演着十分重要的角色, 它是成矿物质得以活化、迁移、富集的主要介质, 同时流体的运移还能扩展有利的成矿空间。同位素地球化学方法仍然是成矿流体研究的主要手段, 实验地球化学、元素地球化学以及现代岩石学和矿物学研究方法在探讨流体的起源、演化等方面已发挥越来越重要的作用。每种方法均有其局限性, 在实际工作中强调多种研究方法的结合十分必要。

**关键词:** 成矿流体; 活化; 不混溶; 水-岩反应; 研究方法

中图分类号: P594<sup>+</sup>.1

文献标识码: A

## 1 成矿过程中流体的作用

成矿流体具有多种来源, 目前普遍地认为大气降水(或称雨水、天水)、建造水(或称地层水、原生水、同生水)、变质水和岩浆水这四种水是成矿流体的主要来源。它们彼此可以相互混合和转化, 并具有一定的成因联系。

成矿过程中流体作用的表现形式是多种多样的, 没有流体作用, 几乎不可能形成任何有实际意义的矿床。因此, 成矿流体一直是矿床学家们所研究的重点和热点。

### 1.1 成矿物质的活化

越来越多的研究表明, 许多矿床围岩中的成矿元素含量常低于地壳丰度和区域背景含量, 但却能形成品位较高和规模较大的矿床。如在小秦岭金矿区, 成矿区内  $w(\text{Au})$  的背景含量为  $1.09 \times 10^{-9}$ , 与金矿床有成因联系的文峪岩体  $w(\text{Au})$  为  $1.02 \times 10^{-9}$ , 时代较老的小河岩体为  $w(\text{Au}) 0.74 \times 10^{-9}$ , 皆明显低于地壳  $w(\text{Au}) (3.5 \times 10^{-9})$ 、上地壳 ( $1.8 \times 10^{-9}$ ) 及区域背景含量, 但该区金矿床产出却较多, 而且地层中金的含量是随着混合岩化和花岗岩化程度的加强而

收稿日期: 1999-04-26; 修订日期: 1999-09-15

第一作者简介: 徐光平(1975-), 男, 硕士研究生, 矿床与地球化学研究。

减少的,这表明在多期多阶段改造型和同熔型花岗岩成岩作用过程中以及随后的碱交代等蚀变作用过程中,可使金从上地幔、下地壳、上地壳和各类岩石中发生大范围的活化转移<sup>[1]</sup>。成矿物质的活化是成矿过程中一个很重要的环节。

成矿物质的活化转移可以通过构造运动和水-岩反应来实现。构造运动为成矿物质的活化转移提供了能量和驱动力。成矿流体在其运移、演化过程中不断地与围岩发生反应(即水-岩反应),这些反应所引起的交代蚀变使得成矿物质得以活化转移,其实质即是清洁矿物替代载体矿物,使成矿元素进入到流体中去。

有关金成矿的模拟实验研究证实,通过水-岩反应(如蚀变、交代等)能使金的存在形式发生变化,使岩石中金浸出率增加。金在自然界的存在形式主要有两种,即在热液作用过程中易被活化进入溶液的活性金和在热液作用过程中难以进入溶液中的惰性金。水-岩反应使得岩石中活性金的比例增大,这样金就更容易转移进入成矿流体中<sup>[2]</sup>。

### 1.2 成矿物质的搬运

对成矿流体中成矿元素的存在形式、稳定性及溶解度的研究已经取得了大量的成果。研究表明,在形成金矿的成矿流体中,金主要以  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{HS}^-$  等的络合物形式迁移,由于金在热液中通常呈  $\text{Au}^+$ ,  $\text{Au}^+$  具有较大的半径、强极化能力及强的共价键倾向,因此  $\text{Au}^+$  络合物的稳定性随着配位体的离子半径和极性的增大而增大。如  $(\text{AuCl}_2)^-$  就比  $(\text{AuF}_2)^-$  稳定得多,而且流体中  $\text{Cl}^-$  含量一般较高,所以  $(\text{AuCl}_2)^-$  是金在热液中一种重要的搬运形式<sup>[3]</sup>。

成矿流体的运移有三种主要的途径:(1)孔隙渗透。如果流体以孔隙渗透的方式进行运移,则应符合达西定律:  $K = W\Phi^n$ , 其中  $K$  为渗透率,  $\Phi$  为孔隙度,  $W$ 、 $n$  为与流体压力梯度和粘度有关的常数。在地壳深部和较高的温压条件下,岩石的孔隙度很低,故这种方式难以形成大规模的流体活动。(2)沿断裂破碎带运移。断裂破碎带是流体活动重要的运行通道之一,深切的走滑断裂能为深部流体上升发挥作用,这是人们普遍接受的想法。(3)通过流体活动形成的水压破裂运移。所谓水压破裂机制是指因流体运移活动而使周围岩石产生破裂,并使这种破裂不断向浅部方向增殖(生长),从而作为成矿流体运移的通道。Spera(1987)<sup>[4]</sup>通过计算发现,一条垂向长 10 km 的裂隙,因流体动力发生破裂,在 2 天时间内即可形成,裂隙宽度为  $10^{-2}$  m,流体的驱动压力为  $2.6 \times 10^4$  Pa。由此可知,即使在一个没有深大断裂的地区,只要具有一定的驱动压力,成矿流体会在岩石圈中产生很多厘米级宽度的破裂并快速向浅部增殖,从而使成矿流体运移。郭涛等(1999)<sup>[5]</sup>对焦家金矿容矿构造裂隙特征分析后认为,焦家金矿的裂隙主要是经过多次流体驱动裂隙扩展而形成的。由于世界上许多地区不存在深大断裂,因此这种水力破裂机制就具有重要的意义。

流体的运移主要是通过重力驱动、热驱动、构造动力驱动和物理化学动力驱动等来实现的,其中前三种作用的广度和深度较大,物理化学驱动则相对较小,通常只是大规模流体运移的次要因素。

### 1.3 成矿物质的沉淀富集

成矿物质从各种流体中沉淀富集的机理一直是矿床学研究的重点之一,也是成矿流体地球化学研究的热点。导致成矿物质从成矿流体中沉淀的原因通常有五种,即温度或(和)压力的变化、水-岩反应(交代与蚀变等)、流体混合、流体的浓缩和液态不混溶。

### 1.3.1 温度或(和)压力变化引起成矿物质沉淀

虽然温度对矿物溶解度的影响情况比较复杂,但除少数外,绝大多数金属矿物特别是金属硫化物在高温下的溶解度比在低温下要大,所以随着温度的降低通常就会引起矿物的沉淀<sup>[6]</sup>。若流体中成矿物质的浓度较高,而且流体的温度能够在局部的范围或短的距离内有较大程度的下降,则较易导致成矿物质沉淀富集。自然条件下往往很复杂,仅由单纯的温度变化而导致成矿物质沉淀富集并不多见,在大多数情况下,需要与其它因素叠加才能形成有实际意义的矿床。

一般来说,压力变化会引起溶质密度的变化从而影响金属的溶解度,但其影响的绝对值较小;而由压力控制的一种等焓效应——沸腾作用,则已被证明是导致成矿物质沉淀的重要原因之一<sup>[7]</sup>。

### 1.3.2 水-岩反应引起的成矿物质沉淀

成矿流体在运移过程中不断地同其所流经的围岩发生水-岩反应,水-岩反应主要通过以下三种方式使成矿物质发生沉淀富集。

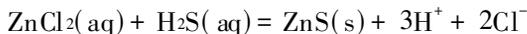
#### 1.3.2.1 流体的 pH 值变化

pH 值的变化对成矿物质的溶解度有较大的影响,因此,当流体与矿物发生反应消耗或释放  $H^+$  时,流体的 pH 值就会改变从而导致成矿物质沉淀。例如钾长石的绢云母化或云英岩化会消耗流体中的  $H^+$  :

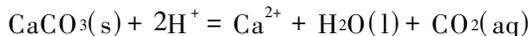


也致常常可见到金属矿物与绢云母化、云英岩化相伴生。

在许多热液矿床中,碳酸盐围岩的溶解(被交代)与硫化物的沉淀之间有密切的时空联系。Barnes 和 Gould(1992)<sup>[8]</sup>用实验研究了弱酸性流体与碳酸盐发生中和反应导致硫化物沉淀的过程,指出从饱和  $H_2S$  的流体中沉淀金属硫化物时会释放出  $H^+$ , 如:



而碳酸盐的溶解则需要消耗  $H^+$  :



两者的结合即导致硫化物对碳酸盐的交代。

铀的溶解度在碱性介质中比在酸性介质中约大两个数量级,因而碱性含铀热液在 pH 值逐渐降低的酸化过程中,铀可能达到过饱和而沉淀出来。

#### 1.3.2.2 氧化-还原反应

流体与围岩之间的反应常导致流体氧化状态的改变,这也是导致流体中成矿物质沉淀的一种重要原因。特别是对于一些变价金属如 Fe, Cu, U, V 等,流体氧化态的改变导致其价态的变化,进而改变其溶解度而析出沉淀。例如,当富含成矿元素的流体流经某些富含还原硫的地层时,很容易在那里形成金属硫化物沉淀下来,其实质就是流体与岩石之间发生了氧化-还原反应。

#### 1.3.2.3 吸附作用

某些成矿物质可以被其它矿物表面吸附而从流体中沉淀出来。近几年来由于矿物-流体界面地球化学研究的深入,成矿物质的吸附沉淀也开始受到重视。实验表明,某些成矿组分即使在流体不饱和的情况下,如果遇到一个良好的吸附表面,也会导致其从流体中析出沉淀。

### 1.3.3 流体的混合引起矿物质的沉淀

流体混合作用是流体与流体之间的反应,其反应速度比流体与固体间的反应快得多,导致流体中成矿物质赋存状态发生变化的效果也显著得多。因此,不同流体的混合在成矿物质沉淀中的重要作用越来越为人们所认识。流体混合作用主要通过以下方式引起成矿物质的沉淀<sup>[9-11]</sup>。

1.3.3.1 降温冷却 在流体混合过程中通常会使得流体的温度发生变化,而大部分络合物在流体中的溶解度是温度的函数,即络合物的稳定性与温度密切相关,所以温度变化必然会导致一些成矿物质沉淀。

1.3.3.2 稀释效应 一种盐度相对较低的流体与另一种盐度高的流体混合,使流体的配位基浓度降低,驱动化学反应向络合物分析的方向进行,因此可导致成矿物质沉淀。由于在降低配位基浓度的同时,也会降低成矿物质的浓度,所以对于象  $\text{FeCl}^0$  这样的配位基与金属具有 1:1 的络合物,稀释通常不会产生沉淀效果,但对于具有更高配位数的络合物,稀释的沉淀效果就很明显。

1.3.3.3 化学反应及 pH 和 Eh 值的改变 当不同性质的流体混合时,常常会发生化学反应,改变原来流体的 pH 和 Eh 值、 $f_{\text{O}_2}$  等参数,从而引起成矿物质的沉淀。

应该指出,上述流体的三种混合作用通常并不是能够将其截然分开的,在绝大多数情况下三种混合作用是叠加在一起的。

#### 1.3.4 液态不混溶引起成矿物质的沉淀

压力诱发的流体不混溶作用可导致成矿作用的发生。在成矿作用发生期间出现的流体不混溶作用会导致流体中包括  $\text{H}_2\text{S}$  在内的挥发性组分进入富  $\text{CO}_2$  的不混溶相中<sup>[12]</sup>,如果这两种不混溶流体共生并保持平衡,挥发组分的分离就必然导致流体的 pH 值升高,其结果将与因  $\text{H}_2\text{S}$  的分离引起的 pH 降低相抵消。然而,如果富  $\text{CO}_2$  的流体从成矿流体中完全分离,即两种不混溶流体不再保持平衡,那么就会导致金等成矿物质的沉淀,因为成矿流体中金等成矿物质主要以金属- $(\text{HS})^-$  的络合物的形式搬运的,所以这种液态不混溶现象在含  $\text{H}_2\text{S}$  的成矿流体中尤其明显(如太行山地区的金矿)<sup>[13]</sup>。世界各地几乎所有的石英脉型金矿均与金属硫化物伴生,这种现象也可能与成矿流体的液态不混溶作用有关,即由于类似的机制使金属-硫化物络合物不稳定而导致金属硫化物沉淀<sup>[14]</sup>。

#### 1.3.5 流体的浓缩作用引起成矿物质的沉淀

成矿流体的浓缩作用是指成矿流体在其运移、循环过程中,由于物理化学条件的变化和水-岩反应等造成自由水的逸失,体系中水量减少,致使剩余流体浓缩的地质作用。这一作用的直接结果是使残余(剩余)流体中成矿物质的浓度增高,促使金属络合物达到饱和,从而产生沉淀<sup>[15]</sup>。

### 1.4 成矿空间的形成

较好的成矿空间有利于成矿流体的活化、运移和富集,而流体的运移又能通过水压破裂等机制形成金属成矿所必须的空间。统计数据也表明,大多数金属矿床的形成在空间分布上都明显地受构造(断裂带、剪切带等)控制,而这些构造的形成也与成矿流体的运动有明显的关系。

当成矿流体在地壳的某一部位上富集时,就会增加该部位岩石的构造变形强度;流体还会使围岩发生水解弱化、压力溶解等,并在岩石中形成许多裂隙,随着水-岩反应的不进行,裂

隙规模会越来越大,随着流体的运移,裂隙越来越多。流体中的成矿物质如没有这些‘运移通道’就很难产生沉淀富集。

## 2 成矿流体的主要研究方法

### 2.1 同位素地球化学方法

由于水是成矿流体的主体,因此流体的来源在很大程度上取决于水的来源。不同成因类型的水具有其特征的同位素组成( $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值),根据所研究的水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值,通常就可以确定流体的成因类型和来源。流体水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  研究和测定解决了许多成矿流体的成因。

(1) 测定矿物流体包裹体的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值,或测定含氧矿物的  $\delta^{18}O$  和矿物形成温度,然后根据同位素平衡方程计算出矿物形成时流体的  $\delta^{18}O$  值。

(2) 根据岩石的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值和流体的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值来确定水-岩反应后成矿流体的同位素组成。不同来源的水其同位素组成差异明显,即使它们与同一种岩石在相同条件下进行水-岩反应,所形成的热液同位素组成也有一定的差异。依据物质平衡方程<sup>[16]</sup>:

$$W \cdot \delta_{H_2O} + R \cdot \delta_{\text{岩石}} = W \cdot \delta'_{H_2O} + R \cdot \delta'_{\text{岩石}} \quad (1)$$

令  $\Delta = \delta'_{\text{岩石}} - \delta_{H_2O}$ , 则可得:

$$\delta'_{H_2O} = \frac{\delta_{\text{岩石}} - \Delta + (W/R) \cdot \delta_{H_2O}}{1 + (W/R)} \quad (2)$$

式中  $i, f$  分别代表初始值和终值;  $W/R$  为水/岩比值(原子单位);  $\Delta$  值只与温度有关,对花岗岩而言,通常近似取:

$$\Delta D = 10^3 \ln \alpha_{\text{黑云母}-H_2O} = -21.3 \times 10^6 t^{-2} - 2.8$$

$$\Delta^{18}O = 10^3 \ln \alpha_{\text{岩石}-H_2O} = 2.68 \times 10^6 t^{-2} - 3.53$$

这样,将不同来源水和各种岩石的初始  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值以及相应的温度( $t$ )和  $W/R$  值代入公式(2)计算,就可求得水/岩反应后热液的同位素组成。

(3) 根据矿化蚀变岩石的  $\delta^{18}O$  值的变化确定成矿流体的类型。蚀变岩的  $\delta^{18}O$  的变化是流体与岩石发生氧同位素交换的结果。由于大气降水的  $\delta^{18}O$  值较低,因而通常在大气水矿化蚀变中心形成低的  $\delta^{18}O$  值,而岩浆水矿化蚀变则与此相反。

除了氢、氧同位素外,常用的同位素地球化学研究方法还有硫、碳、铅、锶等。成矿热液从其形成时开始直至其中携带的成矿物质大部分沉淀为止,其本身的同位素组成也会受其他因素的影响而发生变化,包括不同来源的流体发生混合、与围岩之间发生同位素交换、成矿流体化学成分的变化、矿物的沉淀和交代等,因此,要准确判断成矿流体的成因还需要结合其他研究方法。

### 2.2 实验地球化学方法

#### 2.2.1 流体的热力学和化学动力学性质

通常流体成分的模型可概括为:  $H_2O-CO_2-H_2S-H_2$ (或  $O_2$ )-氯化物盐类-二氧化硅,通过对流体体系的  $p-V-T-x$  相平衡的研究来获取流体的热力学性质和参数,从理论上建立流体体系

的热力学模型。流体的化学动力学特征则包括扩散系数、淋滤效应和热传导等。

### 2.2.2 流体-岩石相互作用

流体-岩石相互作用的研究一般是从矿物溶解作用的动力学实验开始,通过确定具体矿物-水反应的速率变化规律,以此基础建立水-岩相互作用的动力学模型。

### 2.2.3 流体与岩石的物理-化学性质

流体对岩石变形影响有两个方面:力学效应和化学效应,如含有0.1%~0.2%流体的花岗岩比干花岗岩流变强度低,并具有较低的应力指数( $n$ )和活化能( $Q$ )<sup>[17]</sup>;流体对变形和变质作用也有重要的影响<sup>[18]</sup>。

### 2.2.4 流体包裹体特征

成矿流体在地球化学作用中,每一活动阶段都会在矿物中留下一定的流体包裹体,因而流体包裹体研究是了解各类地质作用过程中流体成分和性质以及成矿温压条件变化的重要途径之一。

2.2.4.1 确定矿床形成时的温度和压力 通过观察和辨认流体包裹体在加热和冷冻过程中所发生的决定于流体成分的各种相变(固相、液相和气相之间的转变)过程,准确测量相转变时的温度,参考已知流体体系相图,可获得流体捕获时的  $p$ - $V$ - $T$ - $x$  估算值。常用的有均一法、爆裂法和冷冻法。测定矿物中不同成矿阶段包裹体的均一化温度,可以了解在成矿过程中温度的变化。

2.2.4.2 测定成矿流体的成分 测定流体的成分是流体包裹体研究的最重要内容之一,不同来源的流体成分相差很大,如岩浆热液应是富钾、钠和贫钙,大气降水转化而成的地热水或热卤水常常具有富钙( $Ca > Na > K$ )或钙含量较高( $Na > Ca > K$ )的特征<sup>[19]</sup>。通过对流体包裹体的同位素组成(如  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 、 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{34}S$ 、 $Rb-Sr$ 、 $Sm-Nd$  等)分析,可以了解成矿流体的来源,推断流体的形成和演化特征,确定流体包裹体的形成时代进而推断成矿年龄。

## 2.3 元素地球化学方法

元素地球化学方法主要通过分析矿脉及围岩的元素含量变化特征,揭示初始流体中成矿物质的来源以及流体与围岩作用过程中的元素地球化学效应;根据流体-岩石作用过程中的元素含量平衡,确定流体活动过程中的质量传输规模,厘定流体的活动路径与矿化路径,为最终确定找矿提供依据。

如 Mountain 等(1996)<sup>[20]</sup>对 Flame Lake 地区的金矿床研究显示,成矿流体与围岩相互作用形成的蚀变带呈晕圈状分布,通过对石英闪长岩蚀变晕进行质量平衡计算后发现, $Zr$ 、 $Ti$ 、 $LREE$ 、 $U$ 、 $Th$  和少量的  $Nb$  在蚀变过程中保持稳定; $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $MgO$  和  $K_2O$  被带入流体中,而  $CaO$ 、 $CO_2$ 、 $S$  和  $Na_2O$  则部分进入蚀变的围岩中。又如,在我国湖南  $W-Sb-Au$  矿床中,成矿流体从早阶段到晚阶段的演化为:阳离子  $Na^+ > K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Ca^{2+}$ ,  $K^+ > Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ;阴离子  $Cl^- > SO_4^{2-} > F^- > SO_4^{2-} > Cl^- > F^-$ <sup>[21]</sup>。这些均为进一步找矿提供了依据。

## 2.4 岩石及矿物学方法

由于成矿流体在运移、演化过程中不断地与围岩发生反应,反应造成的交代和蚀变提供了其运移的踪迹,所以通过对蚀变岩石和矿物的研究,可以了解成矿流体的变化特征。如矽卡岩型矿床具有非常典型的交代矿物组合,而且这些矿物显示出良好的时间和空间分带性,所以在

研究砂卡岩矿床的成矿流体时,其蚀变矿物的研究一直受到重视。

不同的温压条件和环境下会形成特征的矿物,将成因矿物学和岩石地球化学的研究方法应用到矿床成因的研究中去,能更好地了解成矿流体中成矿元素的迁移、富集、演化与沉淀富集规律。

有必要强调的是,目前人们对成矿流体作用的一些认识还是比较肤浅的,尚有许多未知领域等待着人们去探索。随着科学技术的不断进步,各种新的测试技术和研究方法层出不穷,但各种方法均有其明显的局限性,因此在实际工作中必须尽可能地将多种方法结合起来,以便获得符合客观事实的结论。

### 参考文献:

- [1] 胡受奚,王鹤年,王德滋,等.中国东部金矿地质学及地球化学[M].北京:科学出版社,1998.
- [2] 王驹.碳硅泥岩型金(铀)矿床成矿富集地球化学[M].北京:原子能出版社,1994.
- [3] Suhevskaya T M and Borisov M V. Fluid-rock interaction and cassiterite deposition[A], in: Khoraka & Maest. Water-Rock interaction[C]. Balkema, Rotterdam, 1992. 1625-1627.
- [4] Spera F J. Dynamics of trans lithospheric migration of metasomatic fluid and alkaline magma[A]. In: Menzies, M A, et al. Mantle metasomatism[C]. 1987. 1-20.
- [5] 郭涛,邓军,吕古贤. 焦家金矿床容矿裂隙特征及流体运移机制[J]. 地质找矿论丛, 1999, 14(2): 16-22.
- [6] Brimhall G H and Crerar D A. Ore fluids: magmatic to supergene[A]. In: Carmichael S E and Eugster H P. Thermodynamic modeling of geological materials: Minerals, fluids and melts[C]. Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America, 1987, 17: 235-322.
- [7] Spycher N F and Reed M H. Evolution of a Broadlands-type epithermal ore fluid along alternative PT paths[J]. Econ. Geol., 1989, 84: 328-359.
- [8] Barnes H L and Gould W W. Hydrothermal replacement of carbonates by sulfides[A]. in: Kharaka and Maest. Water-Rock Interaction[C]. Balkema, Rotterdam, 1992. 1565-1567.
- [9] 华仁民. 流体在金属矿床形成过程中的作用和意义——水岩反应研究进展系列评述(3)[J]. 南京大学学报(地球科学), 1993, 5(3): 351-359.
- [10] 华仁民. 成矿过程中由流体混合而导致金属沉淀的研究[J]. 地球科学进展, 1994, 9(4): 15-21.
- [11] 张德会. 关于成矿流体地球化学研究的几个问题[J]. 地质地球化学, 1997, 25(3): 49-55.
- [12] Naden J, Shepherd T J. The role of methane and carbon dioxide in gold deposition[J]. Nature, 1989, 342: 793-795.
- [13] 朱永峰. 液态不混溶作用: 成矿机制之一[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18(1): 6-9.
- [14] Craw D, Teagle D A H, Belocky R. Fluid immiscibility in later-Alpine gold-bearing veins, Eastern and Northwestern European Alps[J]. Mineral Deposits, 1993, 28: 28-36.
- [15] 林文蔚,殷秀兰. 成矿流体的浓缩作用及浓缩方式研究[J]. 地球科学, 1998, (2): 158-165.
- [16] Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies of problem of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Econ. Geol., 1974, 69(6): 843-883.
- [17] Tullis J. The brittle-ductile transition in feldspar aggregates: An experimental study, Faulting mechanism and transport properties of rocks[M]. New York: Academic press. 1992.
- [18] Hodges K V. Possible thermal buffering by crustal anatexis in collisional orogens: thermobarometric evidence from the Nepsles Himalaya[J]. Geology, 1998, 16: 707-710.

The manganese ore is mainly composed of  $\text{MnO}_2$  (60%), then  $\text{SiO}_2$  (10–20%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . According to mineral composition, there are two types of ore, one type dominated by rhodochrosite, then hematite, quartz, ferrihydrite, calcite, chalcedony, etc; the other dominated by braunite, then montmorillonite, mica, pyrolusite, psilomelane, is usually excellent Mn Ore with low phosphorous content, its utilization has important significance to metallurgical industry. The contents of As and Zn are high among trace elements, and REE is low.

**Key words:** Motuosarla; iron ore; manganese ore; composition.

(上接第 7 页)

- [19] 季克俭, 王立本. 热液源研究的重要进展和“三源”交代热液成矿学说[J]. 地学前缘, 1994, 1(4): 126–132.
- [20] Mountain B W and William-Jones A E. Mass transfer and the path of metasomatic reactions in mesothermal gold deposits: an example from Flambeau Lake, Ontario[J]. Economic Geology, 1996, 91(2): 302–321. 133(6): 509–558.
- [21] 李兆麟. 地质作用中的流体形成演化及成矿作用[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 237–244.

## THE ROLES OF FLUID IN THE FORMATION OF ORE DEPOSITS AND THE MAIN STUDY METHODS

XU Guang-ping, ZHAI Jian-ping, HU Kai

(Department of Earth Sciences, State Key Lab of Mineral Deposits, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Fluid plays an important role in the forming process of ore deposits, and it is also a fundamental medium for the mobilization, transportation and enrichment of ore-forming elements, which are very critical for the formation of ore deposits. Furthermore, many beneficial ore-forming spaces are produced during the transportation of fluid. Taking ore-forming fluid as the main thread, this paper introduces the latest development of the studies on the roles of the ore-forming fluid in the forming process of ore deposits and reviews the main study methods. The isotopic geochemistry method is still a very useful one in the study of the ore-forming fluid, and the methods of experimental geochemistry, elemental geochemistry and petrology & mineralogy are also becoming more and more important. However, each method has its own deficiency, and it is necessary to combine these methods together in the practical research.

**Key words:** ore-forming fluids; mobilization; immiscibility; water-rock interaction; study methods