

# 成矿流体演化与成矿物理化学

费红彩, 肖荣阁

(中国地质大学, 北京 100083)

**摘要:**成矿流体是富含挥发分( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 等)是具有较高含盐度的特殊地质流体。本文讨论了在流体演化过程中挥发分的来源,指出主要来自水岩作用、有机质分解及地幔去气和岩浆;碱金属及卤素同样具有多来源的性质,以海水、含盐系淋滤、建造水为主要来源,含盐系重熔可以形成富含碱金属的成矿流体。流体演化过程中氢氧同位素、硫同位素的分馏主要与温度、水岩比值或硫源丰度有关。一个重要的结论是,成矿流体的形成主要与地质作用有关,而流体来源是次要的。海底热水流体的地球化学特征以高 $^{34}\text{S}$ 值、中稀土富集及正锶异常为特征。本文总结了热水流体成矿物理化学条件,指出水热流体物相点:1) 1080 $^{\circ}\text{C}$ ,  $7.5 \times 10^8 \text{ Pa}$ 水溶液与硅酸盐熔浆分熔点;2) 水溶液的第二个临界点是气水溶液的超临界点(374.15 $^{\circ}\text{C}$ ,  $2.21 \times 10^7 \text{ Pa}$ );3) 水溶液的沸点(100 $^{\circ}\text{C}$ ,  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ );4) 水溶液的冰点(0 $^{\circ}\text{C}$ ,  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ );5)  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系的不混溶温度点(266 $^{\circ}\text{C}$ ,  $2.15 \times 10^8 \text{ Pa}$  [13])等是重要的成矿相变点。

**关键词:**成矿流体;水岩作用;氢氧同位素;成矿物理化学

**中图分类号:** P59 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2002)02-0139-06

不同来源流体类型在不同的地质环境中所经历的演化路径是不同的,因此其最终所形成的结果迥异:在动态过程的成矿作用中,对某一矿床成矿流体特征的研究只能是其某一时刻的特征,而不能代表其全部特征。因此对成矿流体演化过程的研究,而不应仅限于对成矿期流体本身的研究。

成矿流体中富含挥发分、卤素、碱金属元素与成矿元素,除了海水来源卤水带有一些卤素外,大部分是在水岩作用过程中,从岩石中获得的,或者是在流体演化过程中获得的,因此本文主要研究成矿流体中挥发分、卤素来源及同位素等地球化学演化。

## 1 成矿流体中卤素及碱金属来源

海水起源的成矿流体中卤素与碱金属元素来源比较好理解,因为海水本身富含卤素元素,如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{B}_2\text{O}_4^{2-}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Li}^+$ 等 [1]。在沉积物埋藏之后,由于离子过滤效应,残留孔隙水的盐度增大形成了高盐度的卤水。在海底地

热区或大洋裂谷区下部,海水与围岩发生水岩反应也可以形成相对高盐度的卤水。且在热水沉积物或硅质岩中沉积出地表盐湖中才能见到的硼酸盐矿物或石膏、硬石膏、重晶石等硫酸盐矿物等 [2~5]。但不足以达到氯化物饱和,并不能沉淀出氯化物矿物 [6]。同时在大洋裂谷区还可能有地幔来源碱金属元素的补充。

大气降水来源的成矿流体,卤素主要是从水岩作用过程中获得,干旱沉积物中经常有少量蒸发沉积盐类矿物或蒸发岩层,埋藏之后可被地下水淋滤溶解,形成具有较强渗透能力的卤水。这种高盐度的卤水作用于岩石,溶滤富碱金属的粘土矿物,尤其是当温度增高时能力更强。

建造水在整个成岩过程中,甚至在成岩之后都与沉积物处于动态平衡,在没有外来物源加入的封闭体系中,建造水成分取决于沉积物的物质组成。一般沉积盆地中热水流体类型由浅而深有规律地变化,由  $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$  型的浅层水开始,随深度增加,从

收稿日期: 2001-11-02 收到, 2001-12-29 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40073013); 国土资源部国际合作与科技司自由探索项目(2000440)

第一作者简介: 费红彩(1965—), 女, 在读博士研究生, 矿床学专业。

NaCl 型水到 CaCl<sub>2</sub> 型水,含盐度与埋藏深度呈线性增加。在海相盆地中由正常海水的含盐度 3.5 % 到 3 000 m 埋深以下可达 20 %,在含蒸发岩系盆地中卤水盐度可达 25 % 以上<sup>[7]</sup>。因此建造水是最有利于演化为成矿流体的天然水体。

现代或古生代的蒸发沉积由于完好的保存条件曾引起人们的广泛注意,并以蒸发沉积岩类型探讨沉积环境及与金属矿化的关系。但是在前古生代的中深变质岩系中,蒸发盐可能已全部变质改造形成富钾钠碱金属卤水或富钾钠碱性岩浆岩,富碱金属卤水与成矿关系极为密切,变质岩区金矿大部分与硅钾交代有关。蒸发沉积变质岩或蒸发沉积重熔碱性岩浆岩通常出现含硼矿物或含氯矿物,如电气石、方柱石、钙霞石、方钠石、斧石等。

## 2 成矿流体中挥发分来源

矿化剂中挥发分的作用非常重要。各种成矿作用,包括生物成矿作用都要通过某些挥发分来改变流体的物理化学性质,参与搬运矿质或成矿,甲烷与二氧化碳的作用尤为突出。它们与金属矿化的关系密切,高温 W-Sn 矿床、中低温热液矿床、卡林金矿、太古界脉状金矿、Ag、Pb、Zn、As、Sb、Cu 等多金属矿床、斑岩铜钼矿床、花岗岩型铀矿床,以及现代地热系统中都发现有大量 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 挥发气体存在。因此我国矿床学家通过对 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 成分的研究,发现许多矿床的矿化与碳酸盐化蚀变或铁白云石、菱铁矿有关。

不同地质环境中 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 可归纳为三种来源:

(1) 地幔去气及火山岩浆来源:大量幔源岩石,如金伯利岩、碳酸岩、钾镁煌斑岩及二辉橄榄岩、方辉橄榄岩中都有含无机 CO<sub>2</sub> 的流体包裹体,一些幔源构造活动区提供的无机气体都表明,地幔射气可以产生大量挥发性气体。

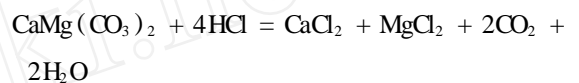
胡瑞忠<sup>[8]</sup>在研究花岗岩型铀矿床成因时指出幔源 CO<sub>2</sub> 的加入起到主要作用,戴金星<sup>[9,10]</sup>根据云南某些现代天然气碳同位素组成, D<sub>CH<sub>4</sub></sub> SMOW = -130.45 ‰, <sup>13</sup>C<sub>CH<sub>4</sub></sub> PDB = -19.9 ‰~ -29.29 ‰, <sup>13</sup>C<sub>CO<sub>2</sub></sub> PDB = -1.9 ‰~ -6.3 ‰及其地质背景,认为 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 属火山岩浆来源。据分析,某些与岩浆有关的热液矿床中有火山岩浆来源的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 挥发气

体组分。

深源碳酸盐是地幔 CO<sub>2</sub> 存在的主要形式,如橄榄石、辉石、云母蚀变形成的碳酸盐矿物,碳酸盐脉,超基性岩的基质胶结物,以及碳酸盐球粒等均是 CO<sub>2</sub> 气体的固结形式,其 <sup>13</sup>C 均为 -2 ‰~ -9 ‰,在地幔碳同位素范围之内。

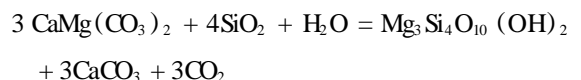
中酸性岩浆同样可以提供一些挥发分,它们是地壳重熔过程中聚集起来的挥发分,在岩浆期后热液成矿过程中起到重要作用。

(2) 水岩作用中产生挥发分:在沉积盆地深部,含盐卤水与泥质岩发生水岩作用可使碳酸盐发生脱气反应或压溶作用,释放出的 CO<sub>2</sub> 进入热水溶液。



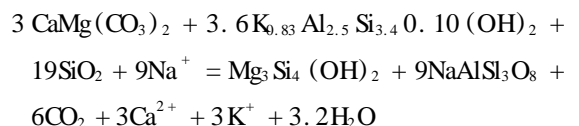
这个反应与围岩静压力有关,当围压降低、流体压力增加时,反应速度加快,加速碳酸盐溶解。

碳酸盐与硅岩在水溶液中的反应:



该反应随流体压力与温度增加反应加速。

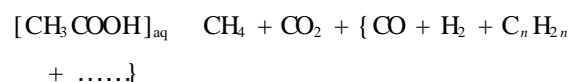
含盐卤水与泥质岩的水岩作用:NaCl 卤水与泥质岩的作用可以分解岩石中的白云石及粘土矿物,发生钠交代释放出 CO<sub>2</sub> 与某些碱(土)金属离子:



上述碳酸盐的脱气反应及水岩作用是某些盆地油田卤水与深变质建造水中挥发分的主要来源。

(3) 有机来源:沉积物埋藏之后,有机质分解是 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等的重要来源。目前所知有机质分解有如下几种途径:

有机质部分形成醋酸,在地热系统演化的各个阶段也都有相当含量的醋酸存在。醋酸的分解产物主要产生 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub><sup>[11]</sup>:



有机质成因 CH<sub>4</sub> 的形成:在淡水沉积物中醋酸发酵作用产生 CH<sub>3</sub>COOH → CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> 反应,在某些低硫酸盐的热泉藻席环境,CH<sub>4</sub> 可由 CO<sub>2</sub> 还原而成。

海相沉积物及咸化含盐环境中,生物成因 CH<sub>4</sub>

主要是由  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}^+$  还原作用形成的:  $\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4 + \text{O}_2$ ;  $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ 。

甲烷也可以由石墨或有机炭与水的作用直接形成:  $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CH}_4 + \text{O}_2$ 。

上述  $\text{CO}_2$  的来源与  $\text{CH}_4$  的来源是一致的,  $\text{CO}_2$ - $\text{CH}_4$  作为一个化学对而共存, 在不同的氧化还原条件下其相对含量是不同的, 在氧化条件下  $\text{CO}_2$  稳定, 在还原条件下生成  $\text{CH}_4$ 。油田卤水中甲烷是长链高分子碳氢化合物的最终裂解产物。

某些沉积岩建造的层控多金属矿床中, 油田水或变质建造水形成的成矿流体是非常重要的成矿流体, 在流体演化过程中溶解了水岩作用或有机质分解产生的挥发分, 包括淋滤溶解的含盐物质, 形成富含挥发分的卤水。

总之,  $\text{CO}_2$  与  $\text{CH}_4$  是成矿流体重要组分, 在流体中有 3 种状态: 一是高温高压条件下 ( $> 266$ ,  $2 \times 10^8$  Pa), 与水的均匀混溶<sup>[12]</sup>; 二是在混溶温度压力以下的不混溶体, 液相  $\text{CO}_2$  独立于  $\text{H}_2\text{O}$  相; 三是在超低温低压条件下 ( $< 31.1$ ), 从溶液中分离出来, 以气相存在。而一般情况下,  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  常是互相溶解的, 不易分离。

含  $\text{CO}_2$  与  $\text{CH}_4$  的流体包裹体中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  的均一温度也就是它们与水溶液的不混溶温度, 根据  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  二元相图,  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  不混溶的临界温度压力是  $266$ 、 $2 \times 10^8$  Pa, 不混溶温度随压力的变化而变化。不混溶作用与成矿密切相关, 因为  $\text{CO}_2$  与  $\text{H}_2\text{O}$  的混溶分离, 可以明显改变水溶液的 pH 值, 是一个重要的物理化学标志。

### 3 流体演化中同位素分馏

同位素在不同物质或不同物相间分布不均匀的现象叫同位素分馏, 分馏系数表示同位素分馏程度。同位素分馏涉及许多不同的物理化学过程, 一旦达到平衡状态, 只要体系的物理化学性质不变, 则同位素分布不改变。体系处于平衡状态时, 两种矿物或物相间的同位素分馏叫平衡分馏, 影响平衡分馏的主要因素是温度、原区元素丰度比等。

#### 3.1 温度

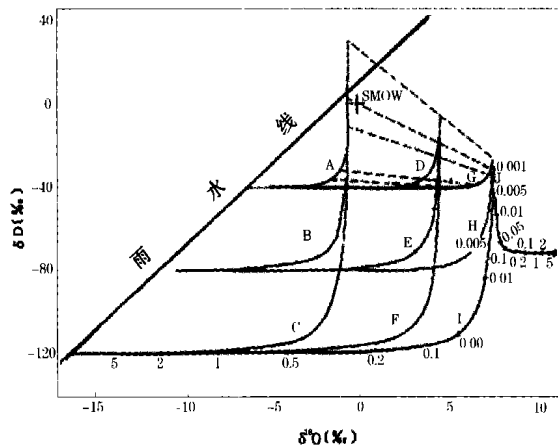
一般水相中富集  $^{16}\text{O}$ , 而矿物相中富集  $^{18}\text{O}$ , 随着水岩作用温度的变化, 水与矿物相的同位素组成将发生变化, 如白云母—水之间的氧同位素分馏曲线,

$t < 509$ ,  $> 1$  时, 矿物富  $^{18}\text{O}$ ;  $t > 509$ ,  $< 1$  时, 水相中富含  $^{18}\text{O}$ <sup>[13]</sup>。因此高温地质流体的水岩作用可以造成流体相中富重氧。

硫同位素具有类似的特征, 即在水岩作用过程中, 高温时水岩间的同位素分馏很快达到平衡, 使流体中的同位素组成接近于岩石同位素组成。

#### 3.2 水岩比值及原岩同位素丰度

成矿流体与热水沉积矿物中同位素值的变化与水岩比值、作用时间及相关相(矿物)的同位素丰度有关, 当有两个因素衡定时变化是唯一的。在水/岩值小时, 如小于 0.1 时, 在平衡反应中流体的同位素值快速接近于岩石的同位素值; 在大于 1 时, 平衡反应时流体的同位素值取决于流体来源。图 1 中  $^{18}\text{O}$  和 D 在水/岩比值大于 1 时,  $^{18}\text{O}$  随温度增加, 而 D 基本不变; 水/岩小于 0.1 时, D 升高而  $^{18}\text{O}$  保持不变<sup>[14]</sup>。水岩作用中, 视含氧矿物含量不同有不同的同位素变化, 含水矿物少时, 主要是  $^{18}\text{O}$  发生变化, 因为一般矿物都是含水硅酸盐矿物, 水岩作用中主要是氧同位素交换; 在水岩作用中, 总的趋势是随着温度增加、水岩比值减小, 水相中同位素值接近于岩石同位素值; 而岩石中同位素变化则相反, 随着温度增加和水岩比值增大, 岩石相中同位素值接近于水相同位素值。



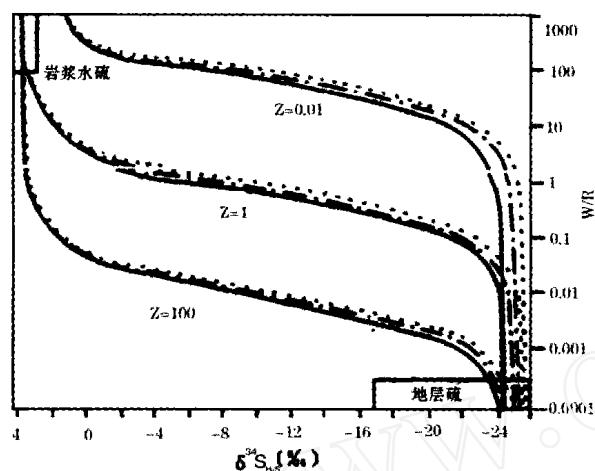
岩浆水:  $^{18}\text{O} = 11$  ‰, D = -70 ‰; 壳源花岗岩:  $^{18}\text{O} = 11$  ‰, D = -80 ‰; 雨水:  $^{18}\text{O} = -6.3$  ‰, D = -40 ‰; 雨水:  $^{18}\text{O} = -11.3$  ‰, D = -80 ‰; 雨水:  $^{18}\text{O} = -16.3$  ‰, D = -120 ‰; 水岩作用温度: 曲线 A、B、C 为 150; 曲线 D、E、F 为 250; 曲线 G、H、I、J 为 350

图 1 水岩作用过程中氢氧同位素演化图解

(据陈振胜和张理刚, 1992)

Fig. 1 Diagram of hydrogen and oxygen isotope evolution during water-rock reaction (From Chen Z. S and Zhang L. G, 1992)

水岩作用中硫同位素值变化与水岩比值变化及硫源丰度,即流体中硫同位素值与地层、及流体中硫的含量有关(图2)。流体中硫含量高,则在水岩作用中不易被同化,倾向于保持流体中原始硫同位素值;地层中硫丰度高,则易改造流体中的同位素组成,使流体中的硫同位素值接近于地层硫同位素值。



实线、虚线、点线分别代表 600、400、250 ;  $Z = S_{\text{岩浆水}} / S_{\text{地层}}$

图2 初始岩浆水与沉积物水岩作用中硫同位素值演化

Fig. 2 Evolution of sulphur isotopic values during reaction of initial magmatic solution and sedimentary rock (据周涛发<sup>[15]</sup>)

### 3.3 流体混合

在成矿作用中多数情况下不同来源水体的混合导致物理化学条件变化而成矿,如果不考虑水岩作用关系及沉积作用关系,仅就水体混合而言可以根据同位素组成计算两种混合水体的量,混合水体的同位素组成与原始水体的同位素组成符合杠杆作用原理。

假定原始水体 A 量比为 40%,  $^{34}S_A = 20\text{‰}$ , 水体 B 量比为 60%,  $^{34}S_B = 10\text{‰}$ , 则混合水体 C 的  $^{34}S_C = 14\text{‰}$ 。

但是自然界中单独的水体混合而不发生水岩作用是不存在的,通常混合水体仍然与岩石发生水岩作用,那么混合水体同位素组成与岩石同位素组成的连线即是水岩作用中同位素变化的方向。

一般成矿热水溶液中氢氧同位素经常呈分散状态,就是既有不同流体的混合也有水岩作用的结果。但在不同矿床类型中其作用强度是不同的,在低温热液矿床中水岩作用较弱,以流体混合为主。而高温热液矿床中以水岩作用为主,在高温岩浆作用下,流体的同位素组成更接近于岩浆流体的同位素组成。

## 4 水溶液物理化学

### 4.1 水溶液的物理化学相变点

水溶液作用是地球上特征的地质作用,而所有成矿作用都与水溶液的几个物相温度点变化有关,水溶液在几个临界点上所表现的特殊物理化学行为对成矿具有极为重要的制约作用。

(1)  $1\ 080\ ^\circ\text{C}$ 、 $7.5 \times 10^8\ \text{Pa}$  是水的一个高温高压临界点,此时水溶液无限混溶于硅酸岩浆中,而在临界点之下,水溶液则开始从硅酸岩熔浆中分熔出来成为富水的流体相。这也是岩浆的一次分异过程,有可能渗滤出初期富成矿物质的超临界流体相。

(2) 水溶液的第二个临界点是气水溶液的超临界点( $374.15\ ^\circ\text{C}$ 、 $2.21 \times 10^7\ \text{Pa}$ ),含矿物质的溶液临界点将升高。在此临界点之上,蒸汽体的密度与水体密度一致,成为超临界的气水混溶流体。在此临界点之下,蒸汽的密度明显低于流体密度,而从流体相中分离出来,形成独立的蒸汽相。

在这个临界点气水溶液的分离也伴随了水溶液 pH、Eh、盐度等物理化学性质的变化。气水溶液的这次临界分离作用是一次重要的高温成矿作用,由于气水分离交代导致物质的结晶沉淀。岩浆热液成矿作用及大洋裂谷热水“烟囱”成矿作用都是属于这种情况,是现代矿床学的热点。

(3) 地表或近地表条件下,水溶液的沸点将随压力变化,当水的蒸汽压大于围压时将发生沸腾。这个临界点的沸腾蒸发作用可以引起水溶液一系列物理化学条件的变化,导致矿物质结晶沉淀。

这个沸点温度到气水溶液的超临界点是一个连续变化的温度,因此两者有许多类似的性质。不同之处在于超临界点是一个溶液 pH、Eh 的突变点,超临界点之上的水溶液只有中性分子状态物质,而超临界点之下才出现极性的离子物质,故而导致 pH、Eh 的突变。而沸点是一个渐变点,如果有一个压力的突然变化导致沸点也成为一个突变点,则成为中低温溶液矿床最有利的成矿条件,如角砾状、脉状充填带或大陆热泉沉积成矿等是典型的沸点突变形成的成矿作用,而导致沸点突变的只能是构造条件,一般把这种作用叫做减压沸腾。喷流地表的热液沸腾常导致强烈的水热爆炸,形成热水沉积角砾岩,并伴随明显的矿化,浅源热液沸腾也常引起爆炸,形成爆炸角砾岩脉而矿化。

(4) 水溶液的冰点是另一个重要的临界点,由于

水由液态到固态的变化,使物质性质及溶解物浓度的变化。水的结冰作用可以明显浓缩溶液中溶解物的浓度,因此导致成矿。近年来冻土带胶状金矿床成因研究揭示了这一成矿规律,有人把这种成矿作用归结为冻结状态下的成矿作用值得商榷。这种成矿作用应该主要表现为冰点处的成矿作用。对它的研究还很少,目前还无法深入探讨。

#### 4.2 富含 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 流体的成矿物理化学

许多成矿流体中富含  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等挥发分,已为研究者所注意。它们在成矿中有两种作用。

一是碳酸络合物搬运金属的作用, $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$  溶液中黄铁矿、方铅矿、闪锌矿溶解实验中,在  $\text{CO}_2$  压力较高时,Fe、Pb、Zn 可以作为碳酸络合物  $\text{FeHCO}_3^+$ 、 $\text{PbCO}_3$ 、 $\text{ZnHCO}_3^+$  溶于溶液。当然也可以溶解其它金属矿物而形成络合物<sup>[16]</sup>。胡瑞忠<sup>[17]</sup>认为铀以  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 、 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  存在于热液中。因此,含  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  流体在金属元素的搬运、沉淀成矿作用中起到一定的作用。沉积盆地中有机酸络合物对金属的搬运也很重要,它在分解成  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  时可能造成卸载沉淀成矿。

二是含  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等挥发分流体的不混溶作用,在含  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  流体中当围压低于不混溶压力时,就出现不混溶,并有大量  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等溢出。 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  的流失可使成矿溶液浓缩、盐度与 pH 值升高、温度与 Eh 值降低,导致矿质结晶沉淀。由净岩压力到净水压力的变化可以导致流体的不混溶,一般出现在 4 km 深处。

由于含  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  挥发分流体多是在高温高压条件下形成的,这种流体喷发到地表时常导致强烈的水热爆炸,并伴随着明显的成矿作用,如新西兰现代地热系统中的爆炸成矿作用与我国云南腾冲地热区的矿化特征。

## 5 讨 论

成矿流体是一种特殊的地质流体,富含挥发分和较高的卤素组分。这些组分是流体在不同地质作用中获得的。因此,成矿流体的形成是成矿作用的一个重要组成部分。成矿流体的形成与特定的地质作用有关,成矿流体的演化是一动态平衡过程。随着物理化学条件的变化,成矿流体会形成新的平衡或成矿。尤其是在液态区间内温度压力 ( $0 \sim 1 \times 10^5 \text{ Pa} \sim 374.15 \sim 2.21 \times 10^7 \text{ Pa}$ ) 的变化决定了成矿的性质。在岩浆高温地质体作用下,可以形成接近于 374.15 的高温成矿流体;在一般地热增温条件

下,只能形成 100 左右的低温成矿流体;而在冰冻条件下,0 上下的冰水分别表现出特殊的成矿作用。

#### 参考文献:

- [1] 赵其渊. 海洋地球化学[M]. 北京:地质出版社,1989.
- [2] Usui A, Yuasa M, Yokoda S, et al. Submarine hydrothermal manganese deposits from the Ogasawara (bonin) arc, off the Japan Islands [J]. Mar. Geol., 1986, 73: 311 - 322.
- [3] Von Stackelberg U, Rad U. Back-arc hydrothermal activity in the Lau Basin (SONNE cruises SO35 and SO48) [J]. Stevenson, A J, Herzer R H, Balance P F. Geology and submarine resources of the Tonga-Lau Fiji region. SOPAC Technical Bulletin, 1994, 8: 307 - 318.
- [4] Rona P A, Scott S D. A Special issue on seafloor hydrothermal mineralization: New perspectives [J]. Econ. Geol., 1993, 88: 1935 - 1976.
- [5] Scheier D S, Baker E T, Johnson K T. Detection of hydrothermal plumes along the Southeast Indian Ridge near the Amsterdam-St. Paul plateau [J]. Geophys. Res., 1998, 25: 97 - 100.
- [6] 曲一华, 钱自强, 韩蔚田. 盐矿物鉴定手册[M]. 北京:地质出版社, 1979.
- [7] 王典敷, 汪仕忠. 盐湖石油地质[M]. 北京:石油工业出版社, 1998.
- [8] 胡瑞忠. 花岗岩型铀矿床:一种可能的成矿模式[J]. 科学通报, 1990, (7): 526 - 528.
- [9] 戴金星. 楚雄盆地中东部禄丰—楚雄一带的  $\text{CO}_2$  气及其成因 [J]. 地球化学, (1): 42 - 49.
- [10] 戴金星. 云南省腾冲县硫磺塘天然气的碳同位素组成特征和成因 [J]. 科学通报, 1988, 33(15): 1168 - 1170.
- [11] Palmer D A. Thermal decarboxylation of acetate, part 1, The kinetics and mechanism of reaction in aqueous solution [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1986, 50: 813 - 823.
- [12] 卢焕章, 李秉伦, 沈昆. 包裹体地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1990.
- [13] 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1988.
- [14] 周涛发. 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.
- [15] 周涛发. 安徽安庆铜矿床硫同位素地球化学 [J]. 地球科学, 1995, 20(6): 705 - 711.
- [16] 涂光炽, 等. 中国层控矿床地球化学[M]. 北京:科学出版社, 1984.
- [17] 胡瑞忠. 上升热液浸取成矿过程中铀的迁移沉积机制探讨 [J]. 地质论评, 1990, 36(4): 317 - 325.

## Ore-forming Fluid Evolution and Metallogenetic Physical Chemistry

FEI Hong-cai , XIAO Rong-ge

( China University of Geosciences , Beijing 100083 , China)

**Abstract :** The common ore-forming fluids are characteristic geological fluids , which are rich in volatile matter (VM) such as  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  , also contain high saline concentration. The sources of VM are discussed , which mainly comes from the water-rock process , organic matter decomposition , emanation from mantle and the magma during the course of fluids evolution. Alkali metals and halogen are also the polygenetic features. The important sources are seawater , leachwater in saliferous rock series and formation water. Also ore-forming fluid being rich in alkali metals can form through melting of saliferous rock series. Discussion on the fractionation of H-O isotopes and S-isotope in the course of fluid evolution shows that fluid fractionation is related to temperature , the ratio of water-rock or S-origin abundance. It is an important conclusion that the formation of ore-forming fluid is more related to geological action than the fluid origins. It is analyzed that the geological chemical characterization of the hydrothermal fluids from sea flood is of high  $^{34}\text{S}$  , abundant middle REE and positive abnormality of Eu. This paper gives the conclusion of the physical - chemical condition of hydrothermal fluids mineralization. It is believed that phase points of hydrothermal fluids are as follows  $1080^\circ\text{C}$  ,  $7.5 \times 10^8 \text{ Pa}$  , that is the separating-melting point between water solution and silicate rock melt ; Super critical point of the vapor-water solution , the second water critical point ( $374.15^\circ\text{C}$  ,  $2.21 \times 10^7 \text{ Pa}$ ) ; Boiling point of water solution ( $100^\circ\text{C}$  ,  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) ; Freezing point of water solution ( $0^\circ\text{C}$  ,  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) ; Immiscibility temperature point of  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  system ( $266^\circ\text{C}$  ,  $2.15 \times 10^8 \text{ Pa}$ ) .

**Key words :** ore-forming water-rock reaction ; H-O isotopes ; metallogenetic physical chemistry

简 讯 ·

### 《矿物岩石地球化学通报》入选 2001 年度“CA 千种表”

根据美国化学会出版的《Chemical Abstracts Service Source Index Quarterly No. 4》统计结果 ,2001 年度我国 (包括台湾地区在内) 共有 78 种科技期刊入选“CA 千种表” 。《矿物岩石地球化学通报》名列其中 ,在我国入选的 78 种期刊中排名 24 ,在“CA 千种表”中排名 547。

(厦门大学化学化工学院资料室 黄秀菁 供稿)