

# 华南黑色岩系铂多金属矿成矿流体地球化学及其矿床成因意义<sup>\*</sup>

王 敏, 孙晓明, 马名扬  
(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

**摘 要:** 较系统的流体包裹体观测显示: 华南黑色岩系铂多金属矿中存在两种不同体系的流体包裹体, 一为具中低盐度、NaCl-H<sub>2</sub>O 体系者 ( 型); 二为具中高盐度、CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O 体系者 ( 型); 其中后者为该矿床中首次确定; 存在 2 个不同期次的成矿流体, 其中铂多金属矿层和其下伏磷块岩中碳酸盐石英网脉的流体包裹体特征基本一致, 可能代表主成矿期流体, 其均一温度峰值为 170 左右, 而盐度具双峰式特征, 峰值分别为 27% ~ 31% 和 4% ~ 6%; 矿层之上碳酸盐石英脉中流体包裹体可能代表了晚期成矿流体, 其均一温度多为 130 ~ 170 左右, 盐度峰值在 12% ~ 14%; 在早寒武世, 接受了巨厚沉积的扬子克拉通南缘加里东冒地槽中的盆地热卤水受挤压而顺层侧向迁移, 从地层中汲取 Ni、Mo、V 和 PGE 等成矿元素, 形成中高盐度的 CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O 体系成矿热液, 沿断裂上升并与 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系海水混合, 形成黑色岩系中的铂多金属矿床 (点)。

**关键词:** 流体包裹体; 惰性气体同位素; 盆地热卤水; 黑色岩系铂多金属矿; 华南

**中图分类号:** P592;P618 .51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 05-0098-05

我国华南扬子准地台的寒武系黑色页岩中富含 Ni、Mo、V、Cu、U、Ba、REE 和铂族元素 (PGE), 其中多处的 Ni-Mo-PGE 已形成了矿化体<sup>[1-5]</sup>——新型铂族金属矿床 (点)<sup>[3]</sup>, 其中以张家界和遵义两地的最为典型。长期以来在黑色页岩的区域矿床地质、岩石学、元素地球化学、成矿年龄等方面进行了较系统的研究, 但矿床成因和 PGE 来源问题仍存在争议, 最有代表性成因模式包括:

“正常海水沉积成因模式”<sup>[4,5]</sup>; “海底喷流热水沉积成因模式”<sup>[1,2,6,7]</sup>; “多阶段成因模式”<sup>[6,8]</sup>。前人对华南黑色岩系中铂多金属矿的流体包裹体进行了初步研究: Grauch 等<sup>[9]</sup> 研究得出矿层和围岩中所含流体包裹体的均一温度为 109 ~ 172 , 盐度 (NaCl) 为 12% ~ 14%; 李胜荣等<sup>[10]</sup> 的测定显示石英-方解石脉中流体包裹体的均一温度为 113 ~ 230 ; Lott 等<sup>[7]</sup> 对含铂多金属矿的硫化物层及其围岩中所含流体包裹体进行显微测温, 发现其均一温度最高达 266 , 盐度达 21.6%, 并推论成矿过程中可能曾经历沸腾作用, 其成矿流体可能主要由热卤水和前寒武纪变质水加海水混合而成。

本文系统测定了各类主要矿石流体包裹体的均一温度和冰点温度, 结合惰性气体同位素数据, 讨

论成矿流体的体系和组成, 并初步提出矿化模式。

## 1 矿床地质概况

富 Ni-Mo-PGE 黑色页岩矿层一般平行整合于下伏岩层上, 厚度在大部分地区为 20 ~ 30cm, 偶而达到 50 ~ 80cm。该矿层主要由粘土矿物、长石、石英、碳酸盐矿物、有机质、胶状硫钼矿和黄铁矿组成。石英和碳酸盐矿物为流体包裹体主要寄主矿物。石英颗粒细小, 最大者粒径 50 μm, 多呈它形; 碳酸盐矿物粒度变化大, 微晶和微晶集合体共存。

在湖南张家界大坪矿区观察到富 Ni-Mo-PGE 黑色页岩矿层下伏寒武系磷块岩中存在众多宽仅数微米、垂直切割地层的碳酸盐石英网脉, 可能代表了 PGE 多金属矿成矿流体的通道。在遵义黄家湾矿区的一些矿层上部的黑色页岩中夹近水平面分布的碳酸盐石英脉体, 可能代表晚期热液事件。

## 2 流体包裹体岩相学特征和显微测温

### 2.1 样品和测试方法

选择贵州黄家湾和湖南大坪矿区黑色岩系中铂多金属矿层及其围岩分别磨制了 0.1 ~ 0.3mm 厚度

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2004-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40173025, 49928201); 国家教育部跨世纪优秀人才培养计划基金资助项目; 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室开放课题资助项目 (OGL-20030); 教育部国家重点实验室访问学者基金资助项目

作者简介: 王敏 (1978 年生), 女, 博士研究生; 通讯联系人: 孙晓明; E-mail: eessxm@zsu . edu. cn

的双面抛光片。

显微测温在英国 Linkam-THMSG60型冷热台上进行。测温前用纯 CO<sub>2</sub> 包裹体（熔点为 -56 .6 ） 、纯水（熔点为 0 ） 和重铬酸钾（熔点为 398 ） 对冷热台进行了温度校正。仪器精度为 ± 0.1 ，升降温速率一般 20 /min，相转变点附近升降温速率控制在 5 /min。

2.2 流体包裹体特征及类型

按流体包裹体中物相种类并结合显微测温，可在本区样品中区分出 2 大类型包裹体： 低盐度 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系包裹体，简称为 a 型包裹体。根据相态又可分为纯液相水溶液包裹体（L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>） -

- a 型包裹体和气液两相水溶液包裹体（L<sub>H<sub>2</sub>O</sub> + V）
- b 型包裹体； 中 - 高盐度 CaCl<sub>2</sub> -NaCl-H<sub>2</sub>O 体系包裹体，简称为 b 型包裹体。根据相态又可分为纯液相水溶液包裹体 L<sub>CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O</sub> - a 型包裹体，气液两相水溶液包裹体（L<sub>CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O</sub> + V） - b 型包裹体（图 1）。

在冷热台上对不同样品中的流体包裹体的初溶温度（*t<sub>eu</sub>*）、冰最后溶化温度（即冰点，*t<sub>m</sub>*）和 气 - 液均一温度（*t<sub>h</sub>*） 分别进行了详细测定，得到了 170 组盐度、均一温度数据，见表 1 和图 2、图 3。 b 型包裹体的密度、盐度及均一压力值直接用 Flnacor 软件中有关 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系的公式计算得出。 b 型包裹体的盐度计算先在 CaCl<sub>2</sub> -NaCl-H<sub>2</sub>O 体系相图（图 1） 上根据其 *t<sub>eu</sub>* 和 *t<sub>m</sub>* 得到 NaCl/ CaCl<sub>2</sub> 摩尔比，然后采用 Bakker 的 Bulk 软件中有关 CaCl<sub>2</sub> -NaCl-H<sub>2</sub>O 体系公式计算出密度、盐度及压力值。

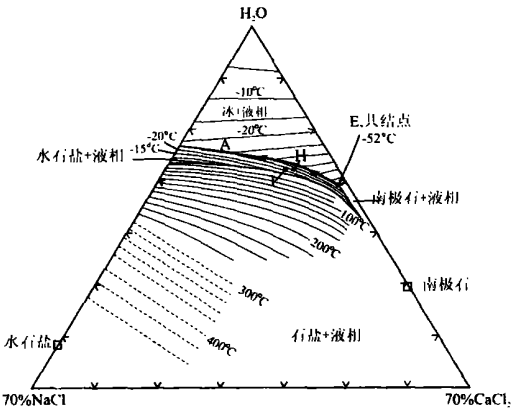


图 1 流体包裹体 CaCl<sub>2</sub> -NaCl-H<sub>2</sub>O 体系相图<sup>[10]</sup>

Fig 1 PhasediagramofCaCl<sub>2</sub> -NaCl-H<sub>2</sub>O systeminfluidinclusion

2.2.1 铂多金属矿层 铂多金属矿层中所含流体包裹体数量较少，多呈孤立或小群出现及似线性排列的原生和假次生包裹体。除个别大小达 10 μm 外，一般都小于 5 μm，大多为 2~3 μm。本文所测包裹体主要为 b 型和 b 型，前者气相比比例为 10% 左右，后者为 15% ~ 20%，少数可达 30% 。

显微测温表明， b 型包裹体的冻结温度在 -45 ~ -57 范围内，初溶温度在 -21 左右（即 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系的共结温度）， *t<sub>m</sub>* 在 -0 .5 ~ -13 .9 之间变化； b 型包裹体的冻结温度通常在 -68 ~ -83 之间，在随后的缓慢回温到 -55 ~ -52 出现初溶现象，液相部分开始解冻，气泡微动，由此推测这些包裹体的低共溶温度 -52 （即 CaCl<sub>2</sub> -NaCl-H<sub>2</sub>O 体系的低共溶温度，见图 1 中 E 点）。在继续缓慢回温的过程中，液相组分沿分开

表 1 黑色岩系铂多金属矿及相关矿脉中所含流体包裹体特征及相关参数

Tab 1 CharacteristicsandcorrespondingparametersoffluidinclusionsinPGEpolymetallicoresandrelatedrocks

样品名称	主矿物	包裹体类型	气相体积比 %	均一温度 %	均一温度 峰值/ 峰值/	总盐度 %	总盐度峰值 %	流体密度 (g cm <sup>-3</sup> )	流体压力 MPa
矿层上页岩 <sup>1)</sup>	石英	原生,假次生	-	92 ~ 150	110 ~ 120	5.6 ~ 17	15 ~ 16	-	-
		次生	-	78 ~ 189	180 ~ 190	0.4 ~ 18.7	-	-	-
铂多金属矿层	石英	b, 原生,假次生	15 ~ 20	121.1 ~ 269.6	170 ~ 180	19.3 ~ 31.4	30 ~ 31	0.887 ~ 1.031	0.2 ~ 5.5
		b, 原生,假次生	10	106.9 ~ 286.4	170 ~ 180	0.8 ~ 17.9	4 ~ 6	0.730 ~ 1.013	0.4 ~ 6.7
铂多金属矿层	碳酸盐	b, 原生,假次生	15 ~ 30	142 ~ 260	170 ~ 180	22.1 ~ 28.2	27 ~ 28	0.931 ~ 1.035	0.4 ~ 4.7
		b, 原生,假次生	5 ~ 10	139.2 ~ 268.2	170 ~ 180	2.1 ~ 15.5	4 ~ 6	0.783 ~ 1.026	0.5 ~ 4.9
磷块岩中碳酸盐石英网脉	石英	b, 原生,假次生	10 ~ 30	120.1 ~ 256.8	150 ~ 170	11.4 ~ 30.6	27 ~ 28	0.988 ~ 1.068	0.2 ~ 4.5
		b, 原生,假次生	10 ~ 35	130.2 ~ 247.8	150 ~ 170	4.2 ~ 21.8	4 ~ 6	0.870 ~ 1.053	0.3 ~ 2.1
晚期碳酸盐石英脉	石英	b, 原生,假次生	10 ~ 40	100.3 ~ 300.3	150 ~ 170/ 240 ~ 250	0.3 ~ 19.5	12 ~ 16	0.867 ~ 1.052	0.2 ~ 8.2
白云石 <sup>1)</sup>	石英	原生,假次生	-	87 ~ 266	140 ~ 145	0.4 ~ 21	5 ~ 6	-	-
		次生	-	97 ~ 232	-	8.0 ~ 21.6	-	-	-

1) 引自文献[7]

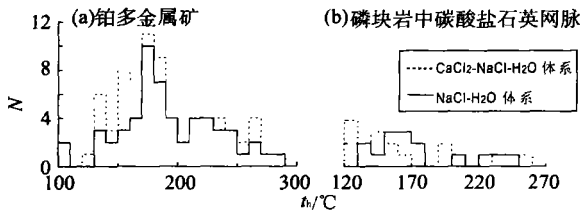


图2 流体包裹体均一温度分布直方图

Fig. 2 Histograms for homogenization temperatures of fluid inclusions

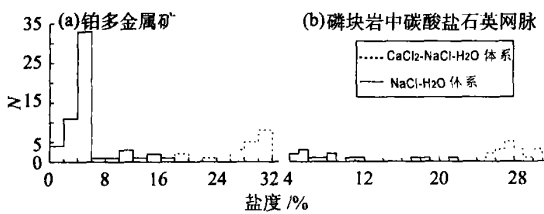


图3 流体包裹体的盐度分布直方图

Fig. 3 Histograms for salinities in fluid inclusions

冰和水石盐区的共结线 EA 运移;当温度升到  $-34.3 \sim -24$ , 包裹体中的冰晶逐渐溶解。继续回温, 包裹体中水石盐 ( $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 在  $-27.5 \sim -14.1$  完全溶化。液相成分点离开共结线沿着指向  $\text{NaCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$  边界线上的水石盐组成点移动, 直到与水石盐溶化温度的等温线相交。这些交点代表了包裹体液相组成。对于在回温时冰晶、水石盐分别在  $-34.3$ 、 $-27.5$  溶解的包裹体来说, 其组成相当于含 8%  $\text{NaCl}$ 、22%  $\text{CaCl}_2$  和 70%  $\text{H}_2\text{O}$  (见图 1 中 H 点), 即总盐度为 30% (盐度换算成相当于  $\text{NaCl}$  的盐度, 下同)。

b 型和 b 型包裹体的均一温度  $t_h$  范围较为一致, 前者为  $135.2 \sim 286.4$ , 后者为  $121.1 \sim 269.6$ 。计算可知, 流体密度为  $0.730 \sim 1.031 \text{ g/cm}^3$ , 均一时压力变化范围较大, 为  $0.2 \sim 6.6 \text{ MPa}$ , 但多数者为  $1 \sim 2 \text{ MPa}$ 。

2.2.2 磷块岩中碳酸盐石英网脉 该类样品中所含流体包裹体数量较多, 包括孤立或小群出现的原生包裹体及似线性排列的假次生包裹体, 还有沿裂隙面分布的次生包裹体。大小一般为  $2 \sim 3 \mu\text{m}$ , 较矿层中相对小。包裹体类型包括 a、b 和 a 和 b 型, 其中 b 型包裹体气相比例约为 10% ~ 15%, b 型为 10% ~ 30%, 部分富气相, 气相比例可达 50%。本次所测包裹体为赋存在石英中的原生或假次生成因的 b、b 型包裹体。

显微测温表明, b 型包裹体的冻结温度在  $-45 \sim -57$  范围内, 初溶温度在  $-21$  左右,  $t_m$  在

$-2.6 \sim -22.3$  之间变化;大部分 b 型包裹体在  $-58 \sim -62$  的范围冻结, 在缓慢回温到  $-52$  左右液相开始解冻, 气泡微动。在继续缓慢回温的过程中, 冰晶在  $-33.4 \sim -22.1$  溶解。继续回温, 包裹体中水石盐 ( $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 在  $-22.3 \sim -13.4$  完全溶化。对于在回温时冰晶、水石盐分别在  $-33.4$ 、 $-16.3$  溶解的包裹体来说, 其组成相当于含 10.5%  $\text{NaCl}$ 、20%  $\text{CaCl}_2$  和 69.5%  $\text{H}_2\text{O}$  (见图 1 中 I 点), 即总盐度为 30.5%。

b 和 b 型包裹体的均一温度  $t_h$  范围较为一致, 前者的范围是  $130.2 \sim 247.8$ , 后者为  $120.1 \sim 256.8$  (表 1)。

2.2.3 晚期碳酸盐石英脉 矿层之上的晚期碳酸盐石英脉所含流体包裹体数量多, 原生包裹体呈孤立或小群出现, 次生包裹体沿裂隙分布。包裹体大小变化较大, 最大可达  $15 \mu\text{m}$ , 一般  $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 。包裹体类型为纯液相 a 型和气液两相 b 型, 其气相比例变化较大, 为 10% ~ 40%。本文所测的包裹体多为石英中 b 型原生者。

显微测温表明, 大部分包裹体的初溶温度 ( $t_{eu}$ ) 高于  $-21$ , 说明它们是含  $\text{NaCl}$  为主的水溶液包裹体。部分  $t_{eu}$  为  $-24.5$  左右, 略低于  $\text{NaCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$  体系的共结温度, 说明这些包裹体的液相可能含少量除  $\text{Na}^+$  以外的其他离子 (如  $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等)。多数包裹体的冰点高于  $-5$ , 相应的盐度为 0% ~ 8%; 少数包裹体的冰点可低至  $-14 \sim -16$ , 具有相对较高的盐度, 为 18% ~ 19%。包裹体的均一温度 ( $t_h$ ) 变化于  $100.3 \sim 300.3$  之间, 密度介于  $0.867 \sim 1.052 \text{ g/cm}^3$ , 均一时压力变化较大, 为  $0.2 \sim 8 \text{ MPa}$  (表 1)。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 均一温度和压力

图 2 可见, 铂多金属矿层所含流体包裹体均一温度的变化范围为  $106.9 \sim 286.4$ , 其峰值范围为  $160 \sim 170$ ; 均一时压力变化范围较大, 为  $0.2 \sim 6.6 \text{ MPa}$ , 平均值为  $1.5 \text{ MPa}$ 。而其下磷块岩中碳酸盐石英脉所含流体包裹体的均一温度在  $120.1 \sim 256.8$  范围内变化, 其峰值为  $170$  左右; 均一时压力变化范围介于  $0.2 \sim 4.5 \text{ MPa}$ , 平均值约  $1 \text{ MPa}$ 。说明两者流体包裹体的均一温度范围大致吻合, 应代表主成矿期的流体温度。

矿层之上晚期碳酸盐石英脉所含流体包裹体的均一温度主要出现于  $130 \sim 170$ , 略低于磷块岩脉体中流体包裹体均一温度峰值。另外在  $240 \sim 250$

区段也出现部分数据,表明部分流体包裹体可能受到了后期构造影响。包裹体的均一压力变化较大,为0.2~8MPa,平均值为1.7MPa。包裹体所含流体的均一温度和压力应代表成矿晚期流体的温度和压力。

### 3.2 盐度和密度

图3所见,铂多金属矿层所含流体包裹体的盐度在0.8%~33.4%范围内变化,呈较明显的双峰特征:分别在30%~32%和4%~6%出现峰值;流体密度变化于0.730~1.035g/cm<sup>3</sup>;磷块岩中碳酸盐石英脉体中所含流体包裹体盐度介于4.2%~30.6%,亦出现较明显的双峰特征,盐度峰值分别为27%~28%和4%~6%;流体密度变化于0.870~1.068g/cm<sup>3</sup>。上述数据表明铂多金属矿层和其下伏磷块岩中碳酸盐石英网脉中流体包裹体的盐度和密度变化范围较为一致,可能代表了主成矿期流体的盐度和密度。

矿层之上晚期碳酸盐石英脉所含流体包裹体的盐度在0.3%~19.5%之间变化,峰值为12%~14%,明显低于上述二者,且不具双峰式特征。流体密度变化于0.867~1.052g/cm<sup>3</sup>。

### 3.3 流体混合作用

Lott等<sup>[7]</sup>曾在矿层中观察到富气相和富液相包裹体的共生,认为其成矿过程中曾发生过沸腾作用,作者此次研究并未发现此种现象,但在对铂多金属矿石英中等流体包裹体的详细观察中,发现该成矿流体可能曾发生过混合作用,反映在包裹体的气液比例变化非常大(5%~40%);在很小的范围内纯液相和气液两相包裹体共存(图4a),同时含有高盐度的CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O体系和低盐度NaCl-H<sub>2</sub>O体系的包裹体毗邻(图4b)。此种现象表明华南地区黑色岩系铂多金属矿的形成过程中,可能发生过高盐度的热卤水和低盐度流体混合作用。前文所述主成矿期流体盐度的双峰特征可能即是两种不同流体混合的反映。

### 3.4 He-Ar 同位素体系

作者等<sup>[12]</sup>利用高真空惰性气体同位素质谱仪对铂多金属矿黄铁矿中流体包裹体的He-Ar同位素体系进行了系统测定,发现其<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He组成均较低,为0.43×10<sup>-8</sup>~26.39×10<sup>-8</sup>,R/R<sub>a</sub>为0.003~0.189(此R为样品的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He实测值,R<sub>a</sub>为大气<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比值,一般取1.4×10<sup>-6</sup>),而<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar为258~287,接近大气饱和水。惰性气体同位素示踪研究显示其成矿流体为盆地热卤水和大气饱和水(海水)混合组成,而基本不含地幔流体或深源岩浆水<sup>[12]</sup>。

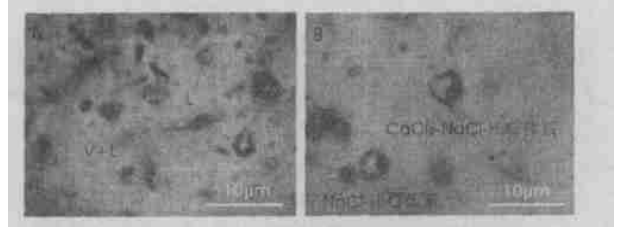


图4 铂多金属矿流体包裹体中纯液相和气液二相共存(a)和高盐度CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O体系和低盐度NaCl-H<sub>2</sub>O体系共存(b)现象

Fig 4 Coexisting fluid inclusions of pure liquid and liquid-gas phases (a) and CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O system with a high-medium salinity and NaCl-H<sub>2</sub>O system with a medium to low salinity (b) in the PGE-polymetallic ores of Lower Cambrian black rock series of South China

### 3.5 流体的来源和演化

流体包裹体的测定为华南下寒武统黑色岩系铂多金属矿的成因提供了新的线索:沉积盆地的演化及其伴生的盆地热卤水可能在黑色岩系Ni-Mo-PGE矿的成矿过程中起到重要的作用。在晚元古宙到早寒武世,位于华南克拉通南缘的加里东冒地槽接受了巨厚的细粒碎屑岩和碳酸盐岩等沉积物,其中盆地热卤水在不断增厚的上覆沉积物挤压下,顺地层侧向迁移,并从地层中吸取Ni、Mo、V和PGE等成矿元素,形成中高盐度的CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O体系成矿热卤水。这些盆地热卤水沿断裂上升,与相对低盐度的正常海水混合。流体混合作用导致成矿流体物理化学条件的改变,并进而导致其中Ni、Mo、V和PGE等成矿元素沉淀,最后在早寒武世((541.3±16)Ma)<sup>[3]</sup>形成黑色岩系铂多金属矿。在该矿层下伏磷块岩中常见的近乎垂直切割地层的碳酸盐石英网脉可能代表了盆地热卤水上升的通道。在铂多金属矿形成之后,由于后期构造作用的影响,在矿层之上局部形成了后期碳酸盐石英脉。

**致谢:**本文流体包裹体测试过程中,得到山东地质科学实验研究院沈昆高级工程师和中山大学地球科学系翟博博士的指导及王生伟和熊德信等同学的帮助,谨表谢忱!

### 参考文献:

- [1] COVENEYRMJR, CHENNS. Ni-Mo-PGE-Au-rich ores in Chinese black shales and speculation on possible analogues in the United States [J]. Mineralium Deposita, 1991, 26: 83-88.
- [2] COVENEYRMJR, MUROWCHICKJB, GRAUCHRI, et al. Field relations, origins and resource implications for platinumiferous molybdenum-nickel ores in black shales of South China [J]. Exploration and Mining Geology, 1992, 1 (1): 21-

- 28.
- [3] 毛景文, 张光第, 杜安道, 等. 遵义黄家湾镍钼铂族元素矿床地质、地球化学和 Re-Os 同位素年龄测定 - 兼论华南寒武系底部黑色页岩多金属成矿作用[J]. 地质学报, 2001, 75 (2) : 234-243.
- [4] FANDelian. Polyelements in the Lower Cambrian black shales series in Southern China; in The Significance of Trace Metals in Solving Petrogenetic Problems and Controversies. Augustithis, S. S. Ed, Athens [C], 1983: 447-474.
- [5] 张爱云, 伍大茂, 郭丽娜, 等. 海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 48-53.
- [6] 李胜荣, 高振敏. 湘黔寒武系底部黑色岩系贵金属元素来源示踪[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30 (2) : 169-174.
- [7] LOTTDA, COVENEYRMJR, MUROWCHICKJB, et al. Sedimentary exhalative nickel-molybdenum ores in South China[J]. Economic Geology, 1999, 94: 1051-1066.
- [8] 张光第, 李九玲, 熊群尧, 等. 贵州遵义黑色页岩铂族金属富集特点及富集模式[J]. 矿床地质, 2002, 21 (4) : 377-385.
- [9] GRAUCHRI, MUROWCHICKJB, COVENEYRMJR, et al. Extreme concentration of Mo, Ni, PGE, and Au in anoxic marine basins, China and Canada, in Pagal M, Leroy J, eds. Source, transport, and deposition of metals: Rotterdam AABalkema [C]. 1991: 531-534.
- [10] 李胜荣, 高振敏. 湘黔地区下寒武统黑色岩系热演化条件[J]. 地质地球化学, 1996, 4: 30-34.
- [11] 沈昆, 张泽明, Vanden Kerkhof AM, 等. 南苏鲁超高压榴辉岩中罕见的原生高密度盐水溶液包裹体[J]. 科学通报, 2003, 48 (10) : 1076-1081.
- [12] 孙晓明, 王敏, 薛婷, 等. 华南下寒武统黑色岩系铂多金属矿中黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素体系及其矿床成因意义[J]. 高校地质学报, 2003, 9 (4) : 661-666.

## Geochemistry of Ore-forming Fluid and Its Metallogenic Significance of PGE-polymetallic Deposits in Lower Cambrian Black Rock Series, Southern China

WANG Min, SUN Xiao-ming, MA Ming-Yang

(Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Systematic studies on fluid inclusions in PGE-polymetallic deposits in Lower Cambrian black rock series in Southern China were performed, and the results suggest: There exist two types of fluid inclusions. Type I is of NaCl-H<sub>2</sub>O system with a medium to low salinity. Type II is of CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O system with a high-medium salinity. The fluid inclusion of type I are first discovered in this kind of deposit. Two periods of ore-forming fluids can be recognized. Characteristics of fluid inclusions in PGE-polymetallic ores and carbonate-quartz stockworks in the underlay phosphorites are basically identical, which may represent the ore-forming fluid of main metallogenic stage. The peak value of  $t_h$  in those fluid inclusions is about 170 °C, while their salinities possess bimodal distribution with two peak values of 27% ~ 31% and 4% ~ 6%. On the contrary, fluid inclusions in the carbonate-quartz veins in the hanging wall may represent the ore-forming fluid of the post-metallogenic stage. The  $t_h$  and its peak value of salinities of the fluid are mostly from 130 to 170 °C and 12% ~ 14% respectively. In the Early Cambrian, the basinal hot brine trapped in the Caledonian basins, which were distributed along the southern margin of the Yangtze Craton and accumulated giant thick sediments, was expelled and migrated laterally along strata because of the pressure generated by overlying sediments. The basinal hot brine absorbed Ni, Mo, V, PGE from the around rocks and transformed into ore-bearing hydrothermal fluid with CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O system and medium-high salinity, then ascended along faults and mixed with seawater of NaCl-H<sub>2</sub>O system, and finally formed PGE-polymetallic deposits or spots in the black rock series.

**Keywords:** fluid inclusion; noble gas isotopes; basinal hot brine; PGE-polymetallic deposits in black rock series; Southern China