

文章编号: 1000-4734(2005)03-0268-07

# 赣中变质岩带变质流体地球化学特征与流体来源

胡恭任<sup>1,2,3</sup>, 刘丛强<sup>1</sup>, 陈培荣<sup>3</sup>, 唐红峰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 华侨大学环境科学与工程系, 福建 泉州 362021;  
3. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

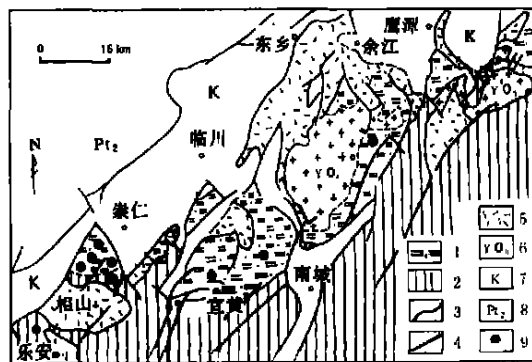
**摘要:** 对赣中变质岩带的变质岩、混合岩及其中的长英质脉体包裹体的化学成分和 C、H、O 同位素进行了研究。结果表明: 赣中变质岩带变质流体有多种来源, 流体成分复杂, 有互不混溶的流体水、CO<sub>2</sub>、有机物。水主要来源于古海水和大气降水, 少部分来源于深部岩浆水; 有机物来源于沉积岩成岩物质; CO<sub>2</sub> 多数来源于碳酸盐岩, 少数来源于有机质的氧化分解。这些流体受构造运动的驱动而活化迁移, 成为成矿物质的运移介质, 参与了本区岩石的变质改造, 是形成本区长英质变质分异脉体、混合岩、混合花岗岩及伟晶岩的重要流体来源。

**关键词:** 变质岩; 混合岩; 流体; 包裹体; C、H、O 同位素; 赣中变质岩带

中图分类号: P588.3; P599 文献标识码: A

**作者简介:** 胡恭任, 男, 1966 年生, 副研究员, 博士, 主要从事资源环境与同位素地球化学方面的教学与科研工作。

在武夷山以西, 赣中乐安—临川—金溪—鹰潭境内, 沿北东方向出露一条宽 20 多 km、长百余 km 的中深变质岩带(图 1), 这套岩系经历了多期复杂变形和角闪岩相变质, 长期以来缺乏专门的研究。近年来发表的有关专著都将此变质岩系归属于华南加里东变质岩带, 原岩归属于震旦系。作者近年来曾对赣中乐安相山变质岩基底的矿物岩石学及同位素年代学进行了研究, 并有一系列新的发现和认识<sup>[1-4]</sup>。由于该变质岩带位于扬子地块、华夏地块与华南加里东造山褶皱带的接合部位, 且构成相山铀矿田、盛源铀矿田、90 号铀矿床的火山岩基底, 因此研究该变质岩带的变质流体地球化学特征及流体来源, 对进一步认识该区的地壳演化和铀等金属成矿作用有重要意义。



1. 赣中变质岩带 2. 晚元古代地层 3. 地质界线 4. 断裂  
5. 中生代火山岩 6. 加里东期花岗岩 7. 白垩纪红层  
8. 扬子地块双桥山群 9. 取样位置

图 1 赣中变质岩带变质岩系分布示意图

Fig. 1. Sketch map showing the distribution of metamorphic rocks from the metamorphic belts in central Jiangxi province.

## 1 地质及岩相学

赣中变质岩带至少经历了晋宁期、加里东期复杂的变质变形作用, 表现为时间上的递进和空间上的迭加演化系列, 是一套以众多的不平衡结构和多相交生混存的矿物组合为特征。晋宁期变质作用出现的岩石类型主要为斜长角闪岩、斜长(云母)变粒岩、(十字)石榴云母(石英)片岩, 矿物

之间接触关系为粒状三联点。斜长角闪岩、(十字)石榴云母(石英)片岩的全岩-矿物 Rb-Sr 等时线年龄分别为  $(726.6 \pm 1.1) \text{Ma}$ 、 $(719 \pm 0.1) \text{Ma}$ <sup>[1]</sup>。加里东期变质作用为赣中地区主期变质作用, 叠加于晋宁期变质岩之上, 温度为变质作用的主要因素, 以递进变质为特征, 形成绿片岩相—高绿片岩相—角闪岩相的递进变质带, 局部地段岩石因强烈的变形超变质作用出现变质分异脉体, 形成混合岩化。其中的含石榴石、十字石、黑云母、白云母变质分异脉体, 混合岩, 混合岩化变粒岩组成

收稿日期: 2004-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(40272038); 科技部攀登计划预选项目(95-预-39); 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放基金

的全岩-矿物 Rb-Sr 等时线年龄为  $(403.1 \pm 6.4) \text{ Ma}^{[3]}$ 。本文主要对晋宁期变质的斜长角闪岩、斜长变粒岩、(十字)石榴云母石英片岩和加里东期变质形成的混合岩、混合岩化变粒岩及含石榴石、十字石、黑云母、白云母、堇青石变质分异石英脉

进行了流体包裹体特征, 成分, H、O、C 同位素研究。研究表明, 两期变质流体的包裹体类型, 特征, 成分及 H、O、C 同位素特征均有一定的差异, 表现出一定的演化规律。表 1 列出了研究样品的矿物组合。

表 1 赣中变质岩带一些变质岩石样品的矿物组合

Table 1. Mineral assemblages in some sample from the metamorphic belts in central Jiangxi province

样号	采样地点	岩性	Gt	Amph	Pl	Bi	Ms	Q	Cord	St	Stl
相 37	乐安相山	石榴云母石英片岩	+	-	(+)	+	+	+	-	-	-
相 45	乐安相山	十字石榴云母石英片岩	+	-	(+)	+	+	+	-	+	-
相 50	乐安相山	石榴云母石英片岩	+	-	(+)	+	+	+	-	-	-
相 56-6	乐安相山	云母石英片岩	-	-	(+)	+	+	+	-	-	-
相 56-5	乐安相山	斜长角闪岩	-	+	+	-	-	-	-	-	-
相 56-3	乐安相山	斜长角闪岩	-	+	+	-	-	-	-	-	-
南 1-1	临川茅排	石英脉	-	-	(+)	-	-	+	-	-	-
南 1-3	临川茅排	斜长变粒岩	(+)	-	+	+	+	+	-	-	-
相 11b	乐安相山	含 Cord, St 石英脉	(+)	-	(+)	+	+	+	+	+	-
相 970	乐安相山	含 Gt, Ms, Bi 石英脉	+	-	(+)	+	+	+	-	-	-
相 89	乐安相山	含 Gt, Ms, Bi 石英脉	+	-	(+)	+	+	+	-	-	-
宜 6	宜黄黎溪	含 Gt, Ms, Bi 石英脉	+	-	(+)	+	+	+	-	-	-
南 2-1	南城岳口	混合岩化变粒岩	(+)	-	+	+	+	+	-	-	(+)
南 2-2	南城岳口	混合岩	(+)	-	+	+	+	+	-	-	-
南 3	南城岳口	混合花岗岩	(+)	-	+	+	+	+	-	-	-
宜 65	宜黄黎溪	砂线斜长变粒岩	(+)	-	+	+	+	+	-	-	+
宜 60	宜黄黎溪	砂线二云片岩中的石英	(+)	-	+	+	+	+	-	-	+
宜 61	宜黄黎溪	黑云斜长变粒岩	(+)	-	+	+	+	+	-	-	(+)
宜 6	宜黄黎溪	石英脉	-	-	(+)	-	-	+	-	-	-
相 89	乐安相山	石英脉	-	-	(+)	-	-	+	-	-	-
相 971	乐安相山	石英脉	-	-	(+)	-	-	+	-	-	-
宜 63	宜黄黎溪	混合花岗岩	(+)	-	+	+	+	+	-	-	-

注: Gt 为石榴石, Bi 为黑云母, Ms 为白云母, St 为十字石, Cord 堇青石, Amph 为角闪石, Pl 为斜长石, Q 为石英, Stl 为砂线石; 相 37、相 56-5、相 56-4、相 11c、南 1-3 为晋宁期变质岩, 其余为加里东期变质岩; + 代表出现, - 代表不出现, (+) 代表微量。

## 2 包裹体的类型及其产出特征

根据显微镜下流体包裹体的特征、性质与分布可将其分为 4 类, 各类包裹体的特征见表 2。晋宁期变质岩主要是 A 类包裹体, 少量的 C 类包

裹体; 加里东期变质岩则主要是 B、C、D 类包裹体, 少量 A 类包裹体。伟晶岩中主要是 B 类、C 类和 D<sub>I</sub> 类包裹体, 偶见 A 类和 D<sub>II</sub> 类。表 3 概括了两期变质岩及伟晶岩包裹体的特征。

表 2 赣中变质岩带各类流体包裹体特征简表

Table 2. Characteristics of fluid inclusions of various types from the metamorphic belts in central Jiangxi province

类型	物理状态	形态	大小 / $\mu\text{m}$	气液比 / %	分布特征	均一温度状态	成分
A 类	单相气体 多相气体	负晶形、园角方形、椭圆形、六边形, 棕色, 透明度差	5~9	50~100	孤立分布、局部群体、无方向性	372~500 °C 均一成气相	富 CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub>
B 类	气液	负晶形、园形、椭圆形、棕色、透明性差	5~25	15~50	线状、条带状局部群体	250~370 °C 均一成液相	富 CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub>
C 类	气液 纯液相	园形、椭圆形不规则 状透明性好	5~50	0~20	线状、条带状沿愈合裂隙 分布, 并穿过 A、B 类包裹体	170~250 °C 均一成液相	贫 CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub>
D 类	D <sub>I</sub> 类: 纯 CO <sub>2</sub> D <sub>II</sub> 类: 多相 CO <sub>2</sub>	负晶形、园角形不规则状	6~30		孤立、局部群体	3.4~7.7 °C 均一 25~29 °C 均一	

表3 赣中变质岩带两期变质岩流体包裹体特征对比表

Table 3. Comparisons of the characteristics of fluid inclusions trapped at various metamorphic periods from the metamorphic belts in central Jiangxi province

变质期	产状及矿物组合特征	包裹体类型、丰度及特征
晋宁期 变质岩	斜长角闪岩、石榴云母 石英片岩、斜长变粒 岩、石榴角闪石英片岩	A类包裹体为主,少量C类。A类包裹体孤立分布于石英、角闪石、黑云母、斜长石中,无方向性,具矿物的负晶形,包裹体小,3~9 $\mu\text{m}$ ,有一层厚的棕色边缘,透明性差,在372~500 $^{\circ}\text{C}$ 均一成气相;C类包裹体呈线状沿显微愈合裂隙分布于石英中,个体小,4~8 $\mu\text{m}$ ,气液比15%~20%,200~275 $^{\circ}\text{C}$ 均一成液相
加里东期 变质岩	舒緩波状、肠状含黑云 母、白云母、十字石、堇 青石、黄铁矿长英质 脉、混合岩、混合岩化 变粒岩、混合花岗岩	B类、C类包裹体为主,D类次之,少量A类。C类包裹体呈线状、条带状沿愈合裂隙分布于石英脉中,个体大,10~50 $\mu\text{m}$ ,形态多样,透明性好,150~250 $^{\circ}\text{C}$ 均一成液相;A类包裹体孤立分布,边缘厚黑,个体小,370~410 $^{\circ}\text{C}$ 均一成气相;D <sub>I</sub> 类包裹体多呈一相(降温至0~6 $^{\circ}\text{C}$ 时出现剧烈跳动的气泡,变成两相,升温至3.4~7.7 $^{\circ}\text{C}$ 时气泡完全消失);D <sub>II</sub> 类呈两相(25~29 $^{\circ}\text{C}$ 完全均一)
伟晶岩	团块状、脉状	B类、C类包裹体为主,D <sub>I</sub> 类次之,丰度较石英脉中小,偶见A类和D <sub>II</sub> 类

### 3 包裹体显微测温

利用南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室英国产 Linkam THMS600 冷热台,选择有代表性的样品(富流体包裹体的石英碎片)进行包裹体相变观察和温度测定,石英碎片从两面抛光的包裹体中取下来。

包裹体相转变温度测定项目如下:CO<sub>2</sub>的熔化温度,即三相点温度( $T_m^{\text{CO}_2}$ )、冰点( $T_m^{\text{ice}}$ )、CO<sub>2</sub>水合物的熔化温度( $T_m^{\text{cla}}$ )、CO<sub>2</sub>的部分均一温度( $T_h^{\text{CO}_2}$ )和最后均一温度( $T_m$ )。上述测定内容因包裹体相态类型不同而异(表4)。相态观察和温度测定过程中,当冷却到-60 $^{\circ}\text{C}$ 或-110 $^{\circ}\text{C}$ 后停止冷冻,仪器自动回温,一直到读取 $T_m^{\text{ice}}$ 或 $T_m^{\text{cla}}$ 的数值为止,此时温度误差在0.2 $^{\circ}\text{C}$ 以内。对三相或两相CO<sub>2</sub>包裹体,观察CO<sub>2</sub>部分均一相变和测定的过程中,升温速率为2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,误差在2 $^{\circ}\text{C}$ 左右。对于 $T_m^{\text{ice}}$ 、 $T_m^{\text{cla}}$ 和 $T_h^{\text{CO}_2}$ 均利用实验室的冷热台温度校正曲线进行校正, $T_h^{\text{CO}_2}$ 利用标准的纯CO<sub>2</sub>包裹体三相点结果进行温度校正。

冷热台测定结果小结于表4,其中包裹体类型和流体体系在冷热台测定过程中由相转变温度进一步得以确定。因所有样品的不同类型包裹体有各自相近的行为,各种类型包裹体的特征可以归类描述。

#### 3.1 初熔温度和V<sub>CO<sub>2</sub>-LCO<sub>2</sub></sub>临界温度

初熔温度即三相点温度,为某种组分相同时存在的温度。某一种组分都有自己特定的三相

点温度,若有其它组分加入,三相点温度随之变化。因此可以通过测定该温度确定包裹体的主要成分。本区典型包裹体不多,低温下难以观察,测定数据少。D类包裹体降温后多于-100 $^{\circ}\text{C}$ 时冻结,初熔温度为-56~-56.6 $^{\circ}\text{C}$ ,表明包裹体中CO<sub>2</sub>基本为纯CO<sub>2</sub>(CO<sub>2</sub>三相点温度为56.6 $^{\circ}\text{C}$ )。

V<sub>CO<sub>2</sub>-LCO<sub>2</sub></sub>临界温度:共测得10件D类包裹体的V<sub>CO<sub>2</sub>-LCO<sub>2</sub></sub>临界温度(表4)。一相富CO<sub>2</sub>包裹体降温至0 $^{\circ}\text{C}$ 左右方出现气相,临界温度为3.4~7.7 $^{\circ}\text{C}$ ,CO<sub>2</sub>密度达0.898g/cm<sup>3</sup>;两相CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O包裹体临界温度为25~29 $^{\circ}\text{C}$ ,密度为0.703~0.630g/cm<sup>3</sup>。数据表明石英中CO<sub>2</sub>密度较高,成分较纯。

表4 石英中CO<sub>2</sub>包裹体的初熔温度和临界温度Table 4. Eutectic and critical temperatures of CO<sub>2</sub> inclusions in quartz

样号	$t_{\text{初熔}}/^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{临界}}/^{\circ}\text{C}$	$\rho(\text{CO}_2)/(\text{g}/\text{cm}^3)$
相970	-56.6	3.5	0.897
	-56.6	3.4	0.898
南1-1	-56.6	7.7	0.871
	-56.6	7.5	0.872
	-56.6	7.4	0.873
	-56.3	25	0.703
相11b	-56.3	25.1	0.703
	-56.3	28	0.653
	-56.3	29	0.63
	-56.3	29	0.63

### 3.2 冰点

共测定 H<sub>2</sub>O 包裹体的冰点 15 件, 其温度范围为 -0.8 ~ -3.25 °C (表 5)。依 NaCl-H<sub>2</sub>O 溶液冰点降原理, 参照 NaCl-H<sub>2</sub>O 低温相图<sup>[9]</sup> 获得晋宁期变质流体的盐度为 1.2% ~ 2.2% NaCl, 密度为 0.787 ~ 0.821 g/cm<sup>3</sup>, 平均为 1.55% NaCl, 0.797 g/cm<sup>3</sup>。加里东期变质流体的盐度为 1.55% ~ 5.3% NaCl, 平均为 4.0% NaCl, 密度为 0.844 ~ 0.892 g/cm<sup>3</sup>, 平均为 0.851 g/cm<sup>3</sup>。

### 3.3 均一温度

共测得均一温度 215 件, 温度范围 (150 ~ 534 °C), 均一温度直方图为多峰式, 峰值温度范围与对应的各类包裹体特征一致, 即 A 类包裹体在 372 ~ 534 °C 均一成气相, B 类包裹体在 260 ~ 350 °C 均一成液相, C 类包裹体在 150 ~ 250 °C 均一成液相。

## 4 变质岩流体成分和稳定同位素

### 4.1 变质岩流体气、液相成分

采用加热样品打开包裹体的方法, 用离子色谱、气相色谱等仪器分别进行液相和气相成分测

定, 液相成分见表 6, 气相成分见表 7。变质岩流体包裹体成分阴离子以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为主, 少量 Cl<sup>-</sup>、F<sup>-</sup>; 阳离子以 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 为主, 少量 Mg<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>, 即本区流体具 Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 性质。

表 5 石英中 H<sub>2</sub>O 包裹体的均一温度、冰点(盐度)和密度  
Table 5. Homogenization temperatures, ice points (salinities) and densities of H<sub>2</sub>O inclusions in quartz

样号	$t_{均} / ^\circ\text{C}$	$t_{冰点} / ^\circ\text{C}$	盐度 / %	$\rho / (\text{g} / \text{cm}^3)$
相 37	246	-0.7	1.2	0.811
	265	-1	1.7	0.797
	275	-1.3	2.2	0.779
相 56-5	272	-0.7	1.2	0.785
相 56-3	259	-0.9	1.6	0.803
南 2-1	250	-2.9	4.8	0.817
南 2-2	239	-1.9	3.2	0.831
	259	-3.2	5.3	0.830
	宜 6	249	-0.9	1.6
相 89	259	-2.4	4.0	0.817
	250	-3.2	5.3	0.844
	242	-2.2	3.7	0.829
相 970	262	-3.5	5.7	0.827
	245	-2.1	3.5	0.821
	251	-3.1	5.1	0.844
相 970	249	-2.4	4.0	0.817
	259	-3.1	5.1	0.803

表 6 石英中包裹体的液相成分 ( $\mu\text{g}/\text{g}$ ) 及相对离子数比值

Table 6. Liquid compositions of inclusions and related ion ratios in quartz

样号	$w_B / (\mu\text{g}/\text{g})$										原子数比				
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	F <sup>-</sup> /Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /Cl <sup>-</sup>
相 37	2.14	0.3	0.68	0.63	0.68	—	0.13	0.85	5.58	2.97	0.35	0.18	0.28	0.13	0.12
相 56-5	1.62	0.75	2.02	1.05	0.40	—	0.18	1.32	9.97	2.40	0.27	0.72	0.62	0.25	2.79
南 1-1	0.26	0.75	6.61	0.41	0.10	0.32	0.31	6.38	2.93	15.67	0.35	3.02	0.31	0.09	0.09
相 970	0.12	0.5	0.39	0.26	0.22	—	0.09	0.12	2.48	5.48	0.26	0.71	0.22	0.14	0.81
相 89	0.76	0.68	3.72	0.81	0.49	0.87	0.27	0.58	2.18	8.84	0.53	2.81	0.02	0.32	0.27
宜 6	1.19	1.82	4.2	0.38	0.06	0.17	0.37	1.76	1.85	14.85	0.88	2.03	0.31	0.39	0.21
伟晶岩	1.35	2.72		0.04			0.05	0.89	1.52		1.19		0.03	0.12	0.64

注: 样品由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室分析。

表 7 石英中包裹体的气相成分 ( $\mu\text{g}/\text{g}$ ) 及还原参数  $R$

Table 7. Gas compositions of inclusions and reduction parameter  $R$  in quartz

样号	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	X <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	X <sub>CO<sub>2</sub></sub>	X <sub>CO</sub>	X <sub>CH<sub>4</sub></sub>	还原参数 $R$
南 1-1	119.3	33.12	8.90	—	0.740	0.205	0.055	—	0.268
相 89	97.35	29.91	19.53	1.61	0.656	0.202	0.132	0.011	0.708
宜 6	100.2	28.14	14.38	—	0.702	0.197	0.101	—	0.513
相 970	99.45	29.06	16.59	1.21	0.680	0.199	0.113	0.008	0.608

注: 样品由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室分析; “—” 表示痕量。

包裹体中有相当的液相  $\text{CO}_2$  存在, 可知其在溶液中溶解度已达到饱和,  $\text{SO}_4^{2-}$  是地表水体中常见的阴离子, 说明变质流体有来自浅源的成分。包裹体中气相成分显示含  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  (表7), 以  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  居多, 含少量  $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  气体, 这与包裹体薄片观察结果相一致。以水溶液为主, 富  $\text{CO}_2$  及有机质包裹体。还原性气体的存在, 说明沉积物中的有机质分解产生的碳与氧或氧化物反应, 使流体体系呈还原态。

## 4.2 变质岩流体同位素特征

流体包裹体 C、H、O 同位素研究是了解变

质岩流体来源的重要手段之一。包裹体水氢同位素  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$  可直接测定, 而氧同位素  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  的确定是首先测定岩石中石英矿物的氧同位素值, 再根据石英-水氧同位素分馏系数与温度的关系式<sup>[6-7]</sup> 计算出包裹体水的氧同位素值。表8列出了变质岩 C、H、O 同位素的测定和计算结果。该结果与 Taylor 所确定的标准岩浆水 H、O 同位素值比较, 均表现为变质水的特点。

表8 包裹体 C、H、O 同位素组成

Table 8. Analysis of isotopes C, H and O in inclusions

样号	样品名称	$\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	计算温度/ $^{\circ}\text{C}$
相37	石榴云母石英片岩中的石英	13.41	7.99	-123.5	-9.44	350
相56-5	斜长角闪岩中的长英质	15.91	10.49	-92.2	-14.55	350
相56-3	斜长角闪岩中的长英质	12.10	6.68	-89.1	-12.65	350
相56-6	云母石英片岩中的石英	13.56	6.61	-95.0	-13.88	300
相56-9	斜长角闪岩中的长英质	13.94	8.52	-94.9	-11.66	350
宜65	砂线斜长变粒岩中的长英质	14.81	9.39	-96.2	-10.06	350
宜60	砂线二云片岩中的石英	15.02	9.60	-83.7	-9.86	350
宜61	黑云斜长变粒岩中的长英质	12.41	6.99	-86.5	-10.96	350
宜6	石英脉中的石英	13.57	4.63	-57.3	-6.88	250
相89	石英脉中的石英	14.89	8.90	-62.5	-5.65	330
相890	石英脉中的石英	15.30	8.35	-61.3	-5.35	300
相970	石英脉中的石英	15.40	9.35	-76.7	-5.01	328
相971	石英脉中的石英	14.55	8.71	-76.6	-5.51	335
南1-1	石英脉中的石英	12.81	5.86	-52.1	-4.70	300
宜63	混合花岗岩中的长英质	14.40	5.46	-64.7	-5.66	250
宜64	混合花岗岩中的长英质	14.45	5.51	-68.1	-6.60	250

注: 样品由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室分析。

## 5 变质流体的形成演化分析

本区岩石在中元古代[乐安相山、余江马荃及弋阳周潭斜长角闪岩的 Sm-Nd 等时线年龄值分别为  $(1113 \pm 49)\text{Ma}^{[2]}$ 、 $(1199 \pm 26)\text{Ma}^{[8]}$  和  $(1159 \pm 69)\text{Ma}^{[9]}$  即已形成, 其最早变质时间在新元古代[乐安相山斜长角闪岩、(十字)石榴云母片岩全岩的 Rb-Sr 等时线年龄分别为  $(726.7 \pm 1.1)\text{Ma}^{[1]}$  和  $(719.7 \pm 0.1)\text{Ma}^{[1]}$ ] 晋宁运动期, 该运动造成大面积区域变质岩, 奠定了本区岩石演化的基础, 以后经历的较大构造运动有加里东运动[由含十字石、石榴子石、黑云母、白云母长英质变质分异脉体, 混合岩化变粒岩、片麻状混合岩组成的 Rb-Sr 全岩矿物等时线年龄为  $(403.1 \pm 6.4)\text{Ma}^{[3]}$ 、白云母

K-Ar 年龄为  $(425.5 \pm 4.3)\text{Ma}$ ]、印支运动[缙云母石英千糜岩的 K-Ar 年龄为  $(148.1 \pm 1.5)\text{Ma}$ ] 和燕山运动。

区内各类岩石都含有云母类矿物, 特别是云母片岩类的存在, 说明该区域岩石相当富含挥发分, 因为云母(白云母、黑云母)中含较多挥发分  $\text{OH}^-$ 、 $\text{F}^-$ , 参与组成分子。本区变质岩是在沉积岩的基础上变质而成, 沉积物在堆积过程中已经结合、吸附及封闭了一些海水在岩石中。沉积物成岩过程中, 虽然排出了一部分海水, 但在岩石中仍有相当数量的水保留。当造山运动使岩石抬升出海面, 并产生褶皱构造变形, 其中可产生许多大大小小的裂隙, 成为雨水和地下水的贮存空间和运移通道, 岩石组分可通过流体搬运, 这些空隙间流

体水已具有一定的溶解、搬运能力。

早期地壳较薄热流值大, 后期的构造运动(加里东运动、印支运动、燕山运动)引起本区岩石温度升高, 存在于原岩中的水活动性增强, 对岩石中的组分进行更大规模的改造, 将矿物成分转移重组, 使岩石发生重结晶、变质结晶、变质分异, 岩石中的矿物颗粒明显增大, 并顺应区域应力方向排列, 形成片状及片麻状构造。溶液因溶解  $\text{CaCO}_3$  而呈弱碱性, 同时有机质部分可分解氧化产生  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$  和碳氢化合物,  $\text{CO}_2$  溶于水成为碳酸溶液, 两种作用可同时进行, 从脉石英包裹体分析结果看, 流体呈中偏碱性(去离子水 pH 值为 7.15)。流体的存在大大加速了物质的搬运速度, 变质岩的形成如果没有流体成分的参与, 其形成极其缓慢, 甚至不可能。

虽然本区域变质岩经历了从新元古代到中生代多期构造运动, 但温度并不太高, 为  $170 \sim 500$   $^{\circ}\text{C}$ , 流体仅溶解部分低温易溶矿物, 从岩石中获取含量较多的造岩元素, 带到裂隙中形成石英脉和长英质脉, 岩石成分在流体渗透和搬运下, 缓慢扩散、交代, 使岩石重结晶和变质结晶, 形成变质岩。在低温低压下, 其活动性不强, 表现为细粒变晶结构, 如变质砂岩、千枚岩, 在较高温度和压力下却相当强的溶解搬运能力, 表现为中粒变晶结构, 如各种中晶片岩、片麻岩。温度和压力是控制流体活动能力的两个重要因素, 温度决定流体的化学活动性, 压力决定流体的迁移方向, 二者共同决定流体的活动状态, 在不同的温度压力条件下, 流体表现出不同的性质。

当温度下降, 流体的活动性降低, 而新一期构造运动开始后, 温度上升, 流体的活动性又可以恢复。加里东运动对本区影响十分显著, 当温度进一步上升, 流体则溶解较多 Si、Al、K、Na

等物质, 其本身所含的组分也越来越丰富, 促使其它一些难溶矿物溶解, 从增温增压到降压冷却变质作用过程中, 在降压升温即热松弛阶段, 出现岩石部分熔融, 形成混合岩。由于流体中溶有大量碱质(K、Na), 在其运移过程中, 为平衡化学位, 则大量进入低化学位矿物, 对原矿物进行类质同象置换, 主要置换 Fe、Ca 等成分, 发生交代反应, 出现黑云母、斜长石的钠长石化(混合岩化变粒岩和混合岩见黑云母、斜长石被钠长石交代)。

当变质温度进一步升高(达  $500$   $^{\circ}\text{C}$ ), 流体活动能力增强, 溶解的组分更多, 其本身也越来越趋于溶浆化, 岩石重熔的比例加大, 所形成的熔体趋向于花岗岩浆, 其活动范围受制于固体岩石, 以重熔交代作用为主, 形成混合花岗岩浆, 其中的挥发分可降低岩浆粘度, 在一定的封闭条件下还可形成小规模产于混合岩和混合花岗岩中的简单伟晶岩, 如果构造出现低压区, 这些岩石部分熔融形成的熔体在应力的驱动下, 就从岩石中迁出, 形成大规模的岩浆侵入。同时, 流体在熔体中含量较多, 就可直接形成伟晶岩浆, 或在残余岩浆中富集, 间接变成伟晶岩浆。

## 6 结 论

赣中变质岩带变质岩流体有多种来源, 流体成分复杂, 有水溶液、 $\text{CO}_2$ 、有机物, 其中水主要来源于古海水和大气降水, 少部分来源于深部岩浆, 有机质来源于海相古生物,  $\text{CO}_2$  主要来源于碳酸盐岩, 其次为有机质。这些流体相互不混溶, 并随时空变化, 温度在  $170 \sim 534$   $^{\circ}\text{C}$  范围, 它们受构造运动的驱动而活跃起来, 参与本区岩石的变质改造, 是形成本区长英质变质分异脉体、混合岩、混合花岗岩及伟晶岩的重要流体来源。

## 参 考 文 献:

- [1] 胡恭任, 章邦桐, 王长华. 赣中相山新元古代变质岩的首次确定[J]. 中国区域地质, 1997, 16(2): 222—224.
- [2] 胡恭任, 章邦桐, 于瑞莲. 赣中变质岩带的 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年代研究[J]. 地质论评, 1999, 45(2): 129—134.
- [3] Hu Gongren, Zhang Bangong Yu Ruilian. Petrology, age and geochemistry of the proterozoic amphibolites from Xiangshan, central Jiangxi Province [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1999, 18(2): 139—149.
- [4] 胡恭任, 章邦桐, 王湘云. 赣中相山元古宙斜长角闪岩的矿物学、岩石学特征及同位素地球化学研究[J]. 地球化学, 1998, 27(3): 217—229.
- [5] 卢焕章. 包裹体地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 57—65.
- [6] Clyton R N, O'Neil J L, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation between quartz and water[J]. J Geophys Research, 1972, 77: 3057—3067.
- [7] Beaucaire C, Pitsch H, Toulhoat P et al. Regional fluid characterization and modeling of water-rock equilibria in the boom clay Formation and in ruppelian aquifer at Mol, Belgium[J]. Applied Geochemistry, 2000, 15: 667—686.
- [8] 余达淦, 艾桂根, 黄国夫. 江西周潭群同位素年龄特征及其地质意义[J]. 地球学报, 1999, 20(2): 195—200.
- [9] 邓国辉. 东乡瑶圩—余江马基地区斜长角闪岩特征及其地质意义[J]. 江西地质科技, 1997, 24(1): 20—24.

## GEOCHEMISTRY AND ORIGIN OF METAMORPHIC FLUIDS FROM THE METAMORPHIC BELTS IN CENTRAL JIANGXI PROVINCE

HU Gong-ren<sup>1, 2, 3</sup>, LIU Cong-qiang<sup>1</sup>, CHEN Pei-rong<sup>3</sup>, TANG Hong-feng<sup>1</sup>

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Department of Environmental Science and Engineering, Overseas University, Quanzhou 362021, China;

3. State Key Laboratory for Mineral deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The paper deals with the chemical composition and isotopes: carbon, hydrogen and oxygen of inclusions in metamorphites, migmatites and felsic veins from the metamorphic belts in central Jiangxi province. The results indicated that metamorphic fluids in them are characterized by multi-source and complex composition; immiscible water, carbon dioxide and organic matter, which cannot be mixed up with each other. The water mostly comes from ancient seawater and meteoric water, but a little from magma, while organic matter from ancient diagenic material. The majority of carbon dioxide comes from carbonate rocks while the minority from organic matter. All these fluids are driven to be active by tectogenesis. Then, they not only become the transporting medium of forming-ore material and take part in rebuilding the rocks, but also are the important source of migmatite, migma granite, felsic mineral and pegmatite fluid in the region.

**Key words:** metamorphite; migmatite; fluid; inclusion; C, H, O isotope; metamorphic belts in central Jiangxi province