

# 661铀矿床流体包裹体特征 及成矿流体来源探讨

田建吉<sup>1,2</sup>, 胡瑞忠<sup>1</sup>, 苏文超<sup>1</sup>, 张国全<sup>1</sup>, 商朋强<sup>1</sup>, 齐有强<sup>1</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, 贵阳 550002;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

**摘要:** 本文利用显微测温学和激光喇曼光谱方法, 研究了 661 铀矿床与铀成矿作用有关的脉石矿物(萤石、石英和方解石)中的流体包裹体。结果表明, 成矿早期脉石矿物中的流体包裹体均一温度为 130~250℃, 盐度为 1.65%~3.44% (NaCl), 密度为 0.81~1.01 g/cm<sup>3</sup>; 成矿晚期流体包裹体的均一温度为 95~150℃, 盐度为 1.48%~1.64% (NaCl), 密度为 0.88~0.96 g/cm<sup>3</sup>。这些资料揭示出该矿床的成矿流体为中低温、低盐度、中等密度热液。激光喇曼光谱气相成分分析主要为 H<sub>2</sub>O, 未见其他气体成分。明显不同于岩浆热液矿床中的包裹体特征及其成矿流体的性质, 结合该矿床成矿地质特征、氧同位素及区域铀矿床成矿物化条件等资料, 进一步分析推断成矿流体的水可能主要来自大气降水。

**关键词:** 流体包裹体; 成矿流体; 661 铀矿床; 赣杭成矿带

中图分类号: P619.14 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2010)01-0017-07

## Characteristics of Fluid Inclusions and Discussion on the Origin of Ore-forming Fluid in the No. 661 Uranium Deposit, Zhejiang Province

TIAN Jian-ji<sup>1,2</sup>, HU Rui-zhong<sup>1</sup>, SU Wen-chao<sup>1</sup>, ZHANG Guo-quan<sup>1</sup>,  
SHANG Peng-qiang<sup>1</sup>, QI You-qiang<sup>1</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:** The No. 661 uranium deposit occurs in rhyolite of the Jiuliping Formation, the eastern part of Ganhang uranium belt, Zhejiang Province. The microthermometry and laser Raman spectroscopy analyses of fluid inclusions in fluorite, quartz and calcite associated with uranium mineralization were used to characterize chemical evolution of the ore fluids at the No. 661 uranium deposit. Two types of inclusions, liquid and liquid-vapor inclusions, were observed in these minerals. The homogenization temperatures of the liquid-vapor inclusions in these minerals from early stage to late stage range from 130 to 250℃ and 95 to 150℃, respectively. The calculated salinities and densities of fluids range from 1.65% to 3.44%, 1.48% to 1.64% (NaCl) equivalent and 0.81 to 1.01 g/cm<sup>3</sup>, 0.88 to 0.96 g/cm<sup>3</sup>, respectively. Laser Raman microspectrometry showed that gaseous compositions of the liquid-vapor inclusions are mainly composed of H<sub>2</sub>O. The fluid inclusion data indicated that the ore-forming fluid of the No. 661 uranium deposit could be characterized by moderate to low temperature, low salinity and moderate density. Combined with oxygen isotopic composition and physicochemical conditions in regional uranium deposits, we concluded that the fluid is of deep circulating meteoric origin.

**Key words:** fluid inclusion; ore-forming fluid; No. 661 uranium deposit; Gan-Hang uranium belt

收稿日期: 2009-09-08 收到, 2009-11-09 改回

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411408); 国家自然科学基金资助项目(40634020, 40672067)

第一作者简介: 田建吉(1981—), 男, 博士研究生, 从事矿床地球化学研究。E-mail: tianjj81@sina.com.cn.

通讯作者: 胡瑞忠(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事矿床学和地球化学研究。E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn.

成矿流体是热液矿床成因研究中的重要内容之一。流体包裹体是矿物形成过程中捕获的流体,是研究热液矿床成矿流体最直接的天然样品<sup>[1~3]</sup>。对热液矿物进行流体包裹体地球化学研究可以揭示成矿流体的性质、组成、物理化学条件状态及其演化,以及矿床成因等信息。前人对热液铀矿床的流体包裹体进行了大量研究<sup>[4~15]</sup>,取得一些重要成果。661 铀矿床是我国发现最早、产在流纹岩中的典型火山岩型矿床之一<sup>[16]</sup>。该矿自 20 世纪 60 年代勘探以来,核工业北京地质研究院、华东地质局相关地质大队和南京大学等曾经对其进行多方面的研究。研究工作主要集中于矿床地质特征、矿区流纹岩地球化学和绿色层蚀变成因方面<sup>[16~23]</sup>,对成矿流体来源缺乏详细的研究。本文对该矿床脉石矿物中的流体包裹体进行了显微测温工作,并对其中具代表性的单个包裹体的气相成分进行了激光喇曼光谱分析,以期确定成矿流体物理化学条件,为探讨流体来源和揭示成矿过程提供了依据。

## 1 矿床地质概况

661 矿床位于赣杭火山岩型铀成矿带东段浙江省境内,构造上位于江山-绍兴断裂带南东侧大洲火山断陷盆地北缘。出露地层为基底前震旦系陈蔡群黑云母石英片岩、绢云母片岩和角闪斜长片岩。火山岩地层为下白垩统磨石山群九里坪组火山碎屑岩和熔岩。岩性复杂,九个韵律清晰。含矿层为九里坪组第一、二、三层流纹岩,以第三层流纹岩中矿体最多,占储量的 80%。

矿区构造较为简单,总体是由一个火山旋回组成的单斜层,被许多北西西向断层所切割,自北向南呈阶梯状陷落。矿体明显受层位和岩性控制。铀矿化分布于流纹岩层顶部相和中间相,矿体集中在第三层流纹岩的顶部,距上覆绿色层底板 0~12 m。矿体产状与绿色层或流纹岩顶板一致,呈似层状。富矿见于北北东向断层与北西西向断层交叉处。品位较高的矿体呈巢状、瘤状和透镜状。矿体规模一般较小,最大矿体长 32 m,宽 13 m。达大型矿床规模。

矿石呈浸染状、细脉浸染状、网脉状和角砾状构造,铀以单矿物和吸附分散状态存在。铀矿物有沥青铀矿和铀黑。沥青铀矿呈显微—超显微粒状、球粒状。伴生金属矿物主要有黄铁矿、白铁矿和赤铁矿,还有极少量方铅矿、闪锌矿和辉钼矿等。脉石矿物主要有石英、萤石和方解石。围岩蚀变在区域上以水云母化为特征,形成可作为找矿标志的绿色层。近矿围岩蚀变有赤铁矿化、硅化、黄铁矿化、萤石化、

迪开石化、水云母化和碳酸盐化,以赤铁矿化、硅化与矿化关系最密切。

## 2 流体包裹体研究

### 2.1 样品选择和成矿阶段划分

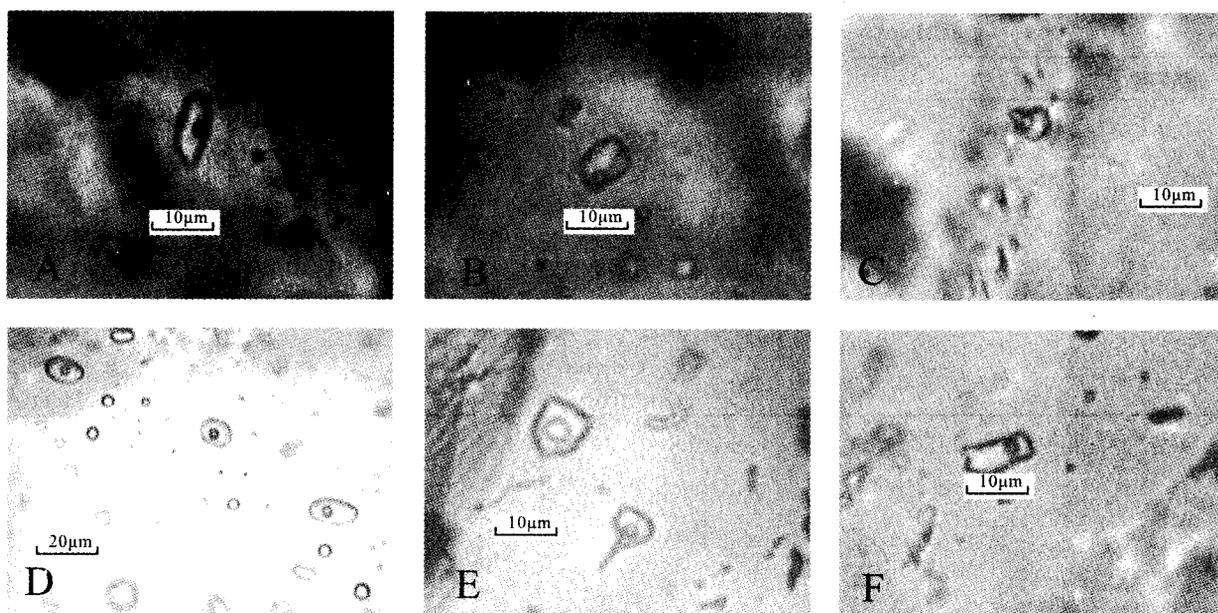
脉石矿物主要有微晶石英、萤石、方解石和少量浅色结晶较好的团斑状石英。野外采集了第三层矿化流纹岩中的含萤石等脉石矿物样品,并进行了初步研究。由于玉髓不适合进行包裹体研究,某些石英样品的流体包裹体过于细小,透明度差,也不宜进行包裹体研究。本文选择了各阶段均有出现的萤石为主要研究对象(8 件),另有 1 件石英样品和 1 件方解石样品。成矿期萤石为紫黑色、紫色,测试部位多为紫黑色萤石中的较浅色部分。判断萤石样品的早晚阶段后,便开始进行显微测温。

萤石成矿阶段的判断结果为:1)成矿紫黑色—紫色—蓝色团块状萤石、微晶石英和紫黑色萤石细脉,为第二成矿阶段产物;2)紫黑色萤石和少量细粒黄铁矿脉为第三成矿阶段的产物;3)团脉状浅紫色、浅蓝色、无色萤石结晶较好,常与方解石共生。稀土元素研究表明(未发表数据),各阶段萤石和方解石是同源热液不同阶段的产物,通过对各期包裹体的研究,以获得成矿流体演化过程中的物化条件变化信息。

### 2.2 流体包裹体岩相学特征

本文按卢焕章<sup>[4]</sup>流体包裹体物理状态分类,在室温(25℃)下对各脉石矿物中流体包裹体的相态特征仔细观察,可划分为纯液体包裹体和液体包裹体两类,液体包裹体气液比一般等于或少于 5%;包裹体在主晶中多呈小群状分布,或沿晶体短小裂隙分布;形态主要为不规则状、多边形、椭圆状,少部分为负晶形。一般原生包裹体形状较规则,呈半浑圆—浑圆状,或呈较好的负晶形;而假次生包裹体常沿短小裂隙呈小群状或带状分布,包裹体形状不规则;次生包裹体沿切割矿物长裂隙分布,且形状极其不规则,相界线浅,包裹体比较透明。本文进行流体包裹体测温研究的主要对象是矿物中原生包裹体和假次生包裹体,同时测试了一个石英样品中的部分次生包裹体。测试矿物中流体包裹体的特征如下。

早期紫黑色萤石:流体包裹体十分发育,大小一般为 4~20  $\mu\text{m}$ ,主要集中于 5~10  $\mu\text{m}$ ,个别达 36  $\mu\text{m}$ 。成因类型可分为两类:1)原生流体包裹体在萤石环带中呈孤立状或群体分布,多为不规则,部分规则者可见多边形、椭圆形或负晶形(图 1A、B)。2)假次生流体包裹体呈短裂隙式分布,包裹体较小,形状不规则(图 1C)。其中较浅色者为本次测试的主要对象。



A、B、C、D. 萤石中包裹体; E. 方解石中包裹体; F. 石英中包裹体

图1 661铀矿床不同脉石矿物中流体包裹体的显微照片

Fig. 1 Photomicrographs of fluid inclusions in gangue minerals from the No. 661 uranium deposit

晚期浅色萤石:流体包裹体也十分发育,且个体较大,一般为 $4\sim 30\ \mu\text{m}$ ,集中于 $5\sim 18\ \mu\text{m}$ ,个别可达 $58\ \mu\text{m}$ 。主要为原生包裹体,分布较规则,呈定向条带或面状分布,基本等间距分布;包裹体形状大多规则,以圆形、椭圆形和长柱状为主(图1D)。

石英:多呈微晶石英或玉髓。包裹体很小,少数发育较好。测试的包裹体为 $4\sim 16\ \mu\text{m}$ (集中于 $4\sim 8\ \mu\text{m}$ ),个别达 $30\ \mu\text{m}$ 。有原生流体包裹体和次生流体包裹体两类。前者呈孤立状或集群状,少数沿短小裂隙排列。大部形状不规则,少部分呈负晶形或近于负晶形(图1F)。次生流体包裹体呈裂隙条带分布,形状很不规则。本次测试仅获得几个晚期裂隙中的包裹体数据。

方解石:包裹体较发育,但比萤石和石英的差。大小为 $5\sim 23\ \mu\text{m}$ ,多呈孤立或小群体分布,部分呈定向条带或定向面状分布,主要为原生包裹体,形态为负晶形、梯形或不规则状(图1E)。

### 2.3 测温及物化条件

2.3.1 显微测温结果 测温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完成。测试仪器为英国 Linkam THMSG600 型冷热台,测温范围为 $-196\sim 600\ ^\circ\text{C}$ ,冷冻数据和均一温度数据精度分别为 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ 和 $\pm 2\ ^\circ\text{C}$ 。升温速率在冰点附近为 $0.2\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ ,均一温度附近为 $0.5\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

本次共测得流体包裹体数据约 320 个,可用来计算盐度的冰点数据约 180 个,显微测温及计算的

盐度和密度结果见表 1,统计柱状图见图 2 和图 3。统计结果,矿床脉石矿物流体包裹体均一温度为 $96\sim 256\ ^\circ\text{C}$ ,众数为 $100\sim 250\ ^\circ\text{C}$ ,与前人所测成矿期温度相近<sup>[11]</sup>,也与华南地区热液铀矿床的温度近似<sup>[18, 24]</sup>,为典型的中低温热液铀矿床。早阶段紫黑色萤石的温度为 $120\sim 260\ ^\circ\text{C}$ ,众数为 $130\sim 170\ ^\circ\text{C}$ ,在 $180\sim 220\ ^\circ\text{C}$ 和 $240\sim 250\ ^\circ\text{C}$ 也出现有相对较低的峰。考虑到选择测定时相当部分为紫黑色萤石的稍浅色部分中的包裹体,且同属主成矿期较早阶段紫黑色团斑状、浸染状紫黑色萤石也没有测定。参考矿体中含铀紫黑色萤石的成矿爆裂温度( $260\sim 290\ ^\circ\text{C}$ )<sup>[16]</sup>,认为本次测定的温度( $250\sim 130\ ^\circ\text{C}$ )也是该矿早期铀沉淀温度。晚期浅色萤石的温度为 $165\sim 95\ ^\circ\text{C}$ ,个别达 $178\ ^\circ\text{C}$ ,众数为 $150\sim 95\ ^\circ\text{C}$ 。石英中原生流体包裹体温度为 $140\sim 312\ ^\circ\text{C}$ ,主要为 $140\sim 248\ ^\circ\text{C}$ (仅一个数据为 $312\ ^\circ\text{C}$ ),均值为 $194\ ^\circ\text{C}$ ,与早期紫黑色萤石的温度相当。石英中次生流体包裹体温度为 $101\sim 158\ ^\circ\text{C}$ ,均值为 $124\ ^\circ\text{C}$ ,与晚期浅色萤石的温度和均值相近。因此,尽管所测试石英样品中没有见到浅色萤石,仍可推测石英中的次生流体包裹体应为晚期流体在裂隙中愈合而成,表现为与浅色萤石相近的温度范围。本次研究只测试了一个与石英共生并包裹少量石英的方解石样品,温度为 $160\sim 232\ ^\circ\text{C}$ ,平均 $192\ ^\circ\text{C}$ ;这个温度略低于石英原生流体包裹体的温度,与早期紫黑色萤石温度也相近。

表 1 661 铀矿床流体包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of fluid inclusions from the No. 661 uranium deposit

成矿阶段	矿物	颜色	类型	冰点 $T_m/^\circ\text{C}$	盐度(%, NaCl)	均一温度 $T_h/^\circ\text{C}$	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
主成矿期	萤石	紫黑色	原生	-0.9~-2	1.65~3.44	122~256	0.81~1.01
				-1.5(118)	2.52(118)	167(147)	0.92(88)
成矿晚期	萤石	浅色	原生	-0.6~-0.8	1.02~1.31	96~178	0.88~0.96
				-0.7(43)	1.22(43)	122(138)	0.94(18)
				-0.8~-0.9	1.48~1.64	140~312	0.90~0.92
主成矿期	石英	无色	原生	-0.9(2)	1.56(2)	194(14)	0.91(2)
				-0.8~-0.9	1.48~1.64	101~158	0.93
			次生	-0.9(3)	1.54(3)	124(23)	0.93(2)
主成矿期	方解石	无色	原生	-0.6~-1.0	1.05~1.74	160~232	0.83~0.92
				-0.7(13)	1.25(13)	192(10)	0.88(10)

注:括号内数字为样品数

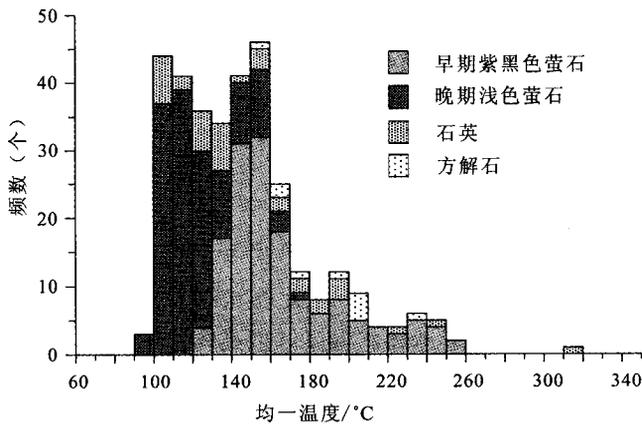
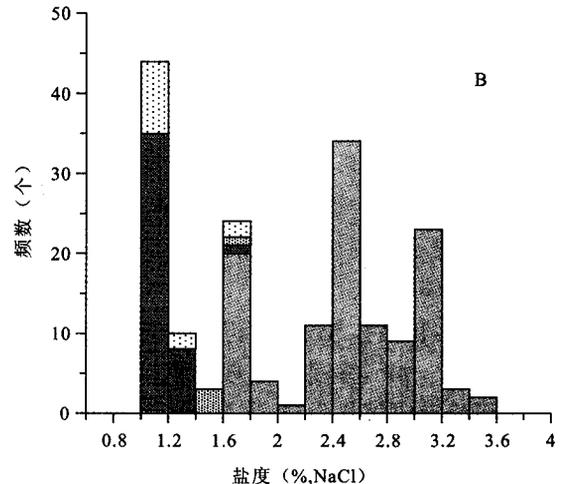
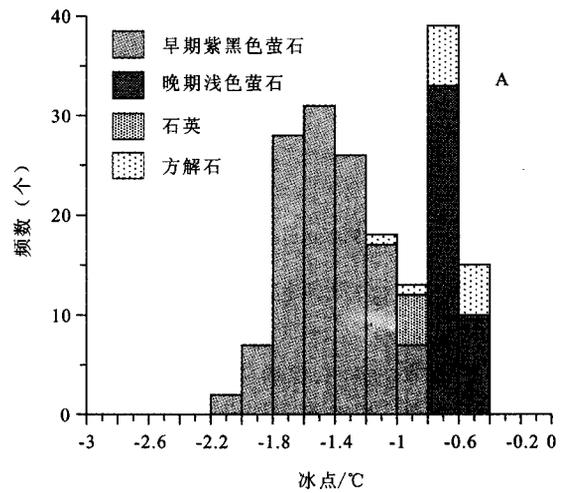


图 2 661 铀矿床流体包裹体均一温度直方图

Fig. 2 Histogram of homogenization temperature of fluid inclusions from the No. 661 uranium deposit

2.3.2 流体的盐度和密度 冷冻台的测定可获得流体包裹体的冰点温度,利用前人的经验公式可计算流体包裹体的盐度。本次工作测得的早期萤石、晚期萤石、石英和方解石的流体包裹体冰点(表 1,图 3-A)分别为  $-0.9 \sim -2.0^\circ\text{C}$  ( $n=118$ )、 $-0.6 \sim -0.8^\circ\text{C}$  ( $n=43$ )、 $-0.8 \sim -0.9^\circ\text{C}$  ( $n=5$ )、 $-0.6 \sim -1.0^\circ\text{C}$  ( $n=13$ )。

661 铀矿床成矿期脉石矿物中未见含有子矿物包裹体,所测得到的流体包裹体冰点数据,均指示流体盐度很低,气相成分经激光喇曼光谱测定主要为  $\text{H}_2\text{O}$ ,未见其他成分。因此可以利用  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  体系盐度-冰点公式来计算流体的盐度。根据  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  体系盐度-冰点公式<sup>[25]</sup>:  $W = 0.00 + 1.78 T_m - 0.0442 T_m^2 + 0.000557 T_m^3$  (式中,  $W$  为 NaCl 的重量百分数,  $T_m$  为冰点下降温度( $^\circ\text{C}$ ))。计算得到早期萤石、晚期萤石、石英和方解石的流体包裹体盐度(表 1,图 3-B)分别为(NaCl):  $1.65\% \sim 3.44\%$  ( $n=118$ )、 $1.02\% \sim 1.31\%$  ( $n=43$ )、 $1.48\% \sim 1.64\%$  ( $n=5$ )、 $1.05\% \sim 1.74\%$  ( $n=13$ )。显示成矿流体盐度

图 3 661 铀矿床流体包裹体冰点(A)和盐度(B)直方图  
Fig. 3 Histograms of freezing points (A) and salinities (B) of fluid inclusions from the No. 661 uranium deposit

很低,从主成矿阶段向晚期演化的过程中,盐度逐渐降低。

根据上述温度和盐度数据,利用热液密度与温度和盐度的函数关系式<sup>[26]</sup>,计算出流体的密度:早期萤石、晚期萤石、石英和方解石的密度(表 1;图 4)

分别为 0.81~1.01 g/cm<sup>3</sup> (n=88); 0.88~0.96 g/cm<sup>3</sup> (n=18); 0.90~0.93 g/cm<sup>3</sup> (n=4); 0.83~0.92 g/cm<sup>3</sup> (n=10)。四者密度范围一致。因此, 661 铀矿床成矿流体属于低盐度、中等密度的流体。

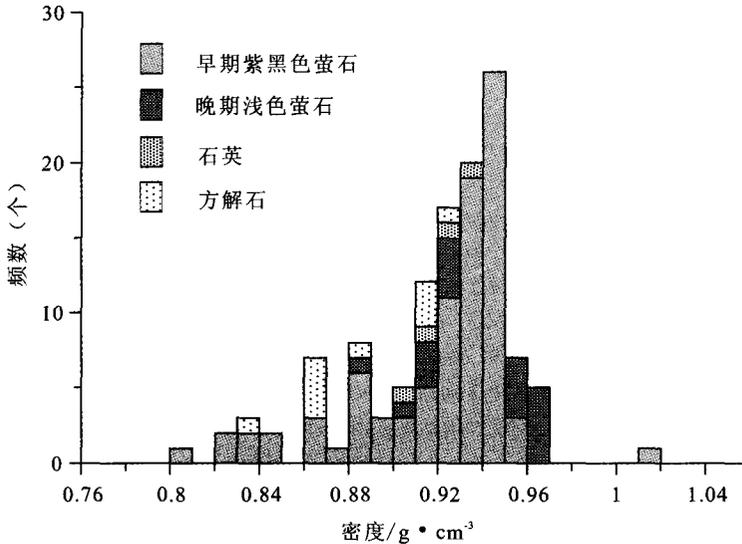


图 4 661 铀矿床脉石矿物流体密度直方图  
Fig. 4 Histogram of densities of different gangue minerals from the No. 661 uranium deposit

### 2.4 激光喇曼分析

单个流体包裹体显微激光喇曼光谱是对包裹体成分进行非破坏性测定的重要手段<sup>[3,27]</sup>, 通过气液相成分的分析, 可获取成岩和成矿流体的组分信息, 为判断成矿流体来源和源区特征提供依据。

单个包裹体的激光喇曼探针分析结果显示, 该矿床成矿期脉石矿物(萤石、方解石和少量石英)中气相成分以 H<sub>2</sub>O 为主。

### 3 成矿流体性质和来源

自然界中有多种类型水, 但对于热液成矿作用来说, 无疑以岩浆水、大气降水(雨水)和海水最为重要, 不同来源的成矿热液具有不同的同位素组成和地球化学特征。本矿床产于火山岩中, 火山岩直接覆于古老地层之上, 本区广泛分布的陆相红层暗示成矿时期经历了干热气候<sup>[28, 29]</sup>, 成矿流体不可能来源于海水; 也不具岩浆来源热液特点<sup>[30]</sup>。661 铀矿床成矿期成矿流体为中低温度、低盐度、中等密度的热液, 明显不同于岩浆热液矿床中包裹体特征及其成矿流体的性质<sup>[31~33]</sup>, 具有大气降水成因性质。矿床中方解石的氧同位素组成计算的流体氧同位素低(2.2‰~3.9‰), 晚期大部分为负值(-3.9‰~0.2‰), 部分接近郑淑惠(1982)对浙江中生代古大

气降水得出的氧同位素组成; 矿区成矿前大面积的水云母化绿色层中粘土矿物的氢、氧同位素(分别为 79.2‰和+12.8‰)研究表明, 粘土矿物是由大气降水为主的中低温热液蚀变形成<sup>[16, 21]</sup>; 本矿床矿岩时差在 10 Ma 以上。因此, 661 铀矿床成矿流体中的水可能主要为大气降水。

据前人研究<sup>[11, 18, 39]</sup>, 华南的铀矿(火山岩型和花岗岩型)具有相似的地质构造背景, 均于白垩纪一新近纪裂陷红盆附近产出, 成矿时代大致一致, 并具类似的成矿地质特征, 如华南热液铀矿床几乎都产在断裂蚀变破碎带内, 成矿流体均为中低温度和低盐度(表 2), 有类似的氢氧同位素组成、蚀变作用强烈以及具有明显的矿岩时差等特点, 表明整个华南热液铀矿床可能都是由深循环的大气降水加入矿化剂 CO<sub>2</sub> 后浸取围岩中的铀而成矿的。

表 2 华南典型热液铀矿床成矿流体特征

Table 2 Characteristics of ore-forming fluids from some typical uranium deposits in South China

类型	矿田/床	测试矿物	成矿阶段	均一温度 / °C	盐度 (% NaCl)	资料来源
火山岩型	相山	萤石、石英	成矿期钠交代型	162~190		
			成矿期萤石-水云母型	120~190	3.06~8	[34]
	661	萤石	成矿期	130~250	1.65~3.44	本文
	570	萤石、微量石英	成矿期	150~230	0~2.5	[35]
	670	—	成矿期	133~239 160~250	—	[36] [11]
花岗岩型	302	石英、萤石、方解石	主成矿期	140~270	3~6.5	[15]
	下庄	萤石、方解石	成矿期	150~250	0~1.83	[13]
	白面石	石英、萤石	成矿期	270~350 100~170	中低盐度混合	[37]
	361	石英、萤石	成矿期	125~264	—	[38]

### 4 结 论

661 铀矿床主成矿期和成矿晚期的脉石矿物中包裹体类型单一, 仅有纯液体包裹体和液体包裹体。显微测温结果表明其成矿热液为中低温度、低盐度和中等密度流体。激光喇曼探针分析表明包裹体气相成分主要是 H<sub>2</sub>O, 未见其他气体成分, 661 铀矿床成矿流体中水可能主要为大气降水。

**致谢:**野外工作期间得到核工业 771 矿徐松生、雷遥鸣等同志的支持和帮助。室内测试工作得到中国科学院矿床地球化学国家重点实验室秦朝建助理研究员的指导,在此一并致以诚挚的谢意!

### 参考文献 (References):

- [1] Roedder E. Fluid inclusions. Reviews in mineralogy[J]. Mineral. Soc. Amer., 1984, 12: 1-664.
- [2] Shepherd T J, Rankin A H, Alderton D H M. A practical guide to fluid inclusion studies[M]. Blackie: Chapman and Hall, 1985.
- [3] 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: 1-487.  
Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, Ou Guangxi, Shen Kun, Zhang Wenhui. Fluid inclusion[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-487. (in Chinese)
- [4] Cuney M. Geologic environment, mineralogy, and fluid inclusions of the Bois Noirs-Limouzat uranium vein, Forez, France [J]. Economic Geology, 1978, 73(8): 1567-1610.
- [5] Leroy J. The Margnac and Fanay uranium deposits of the La Crouzille District (western Massif Central, France): Geologic and fluid inclusion studies[J]. Economic Geology, 1978, 73(8): 1611-1634.
- [6] Negga H S, Sheppard S M F, Rosenbaum J M, Cuney M. Late Hercynian U-vein mineralization in the Alps: fluid inclusion and C, O, H isotopic evidence for mixing between two externally derived fluids[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 93(2): 179-186.
- [7] Pecher A, Lespinasse M, Leroy J. Relations between fluid inclusion trails and regional stress field: A tool for fluid chronology—An example of an intragranitic uranium ore deposit (northwest Massif Central, France) [J]. Lithos, 1985, 18: 229-237.
- [8] Min M Z, Fang C, Fayek M. Petrography and genetic history of coffinite and uraninite from the Liueyiqi granite-hosted uranium deposit, SE China[J]. Ore Geology Reviews, 2005, 26(3-4): 187-197.
- [9] Min, M Z, Luo X Z, Du G S, He B A, Campbell A R. Mineralogical and geochemical constraints on the genesis of the granite-hosted Huangao uranium deposit, SE China[J]. Ore Geology Reviews, 1999, 14(2): 105-127.
- [10] Chen P R, Zhang B T, Zhang Z H. Speciation and precipitation of uranium complexes in hydrothermal solutions related to granite-type uranium deposits[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1992, 11(03): 252-260.
- [11] 陈安福, 陈先, 蒋桂玉, 苏守田, 徐国庆. 火山岩铀矿床包裹体研究[J]. 铀矿地质, 1982, (2): 107-114.  
Chen Anfu, Chen Xian, Jiang Guiyu, Su Shoutian, Xu Guoqing. Fluid inclusion study of volcanic rock-hosted uranium deposit[J]. Uranium Geology, 1982, (2): 107-114. (in Chinese)
- [12] 金景福, 胡瑞忠. 302 矿床成矿热液中铀的迁移和沉淀[J]. 地球化学, 1987, (4): 320-329.
- Jin Jingfu, Hu Ruizhong. Transportation and deposition of uranium in hydrothermal ore-forming fluids as exemplified by uranium deposit No. 302[J]. Geochimica, 1987, (4): 320-329. (in Chinese with English abstract)
- [13] 商朋强. 岩石圈伸展对粤北下庄矿田铀成矿的制约机制研究[D]. 中国科学院地球化学研究所, 2007.  
Shang Pengqiang. Restraining mechanism of lithospheric extension on uranium mineralization in the Xiazhuang orefield, Northern Guangdong Province, China[D]. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [14] 覃慕陶, 刘师先. 南岭地区花岗岩型和火山岩型铀矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1998.  
Qin Mutaotao, Liu Shixian. Granite-hosted and volcanic rock-hosted uranium deposits in Nanling zone[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. (in Chinese)
- [15] 张国全. 华南热液铀矿床地球化学研究——以 302 铀矿床为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2008.  
Zhang Guoquan. Geochemistry of hydrothermal uranium deposits in South China: A case study of the No. 302 uranium deposit[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [16] 章邦桐, 秦社彩, 倪琦生, 吴俊奇. 浙江 661 铀矿床“绿色层”成因及控矿作用的研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1992, 28(3): 439-451.  
Zhang Bangtong, Qin Shecai, Ni Qisheng, Wu Junqi. On genesis and ore-control of stratiform green tectonic altered rock on No. 661 uranium deposit in Western Zhejiang Province[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 1992, 28(3): 439-451. (in Chinese with English abstract)
- [17] 侯文尧, 季树藩, 张学权, 王思龙, 仇本良. 660 铀矿田绿色蚀变带及其意义[J]. 核工业北京地质研究院年报, 1982: 101-106.  
Hou Wenyao, Ji Shufan, Zhang Xuequan, Wang Silong, Qiu Benliang. Stratiform green altered zone and its significance of the No. 660 uranium orefield[J]. Annuals of Beijing Institute of Geology, Nuclear Industry, 1982: 101-106. (in Chinese)
- [18] 华东地质勘探局. 赣杭构造火山岩成矿带铀成矿规律及成矿预测研究[R]. 1988.  
East China Geological Exploration Bureau. Study on mineralogical regularity and metallogenic prediction of Gan-Hang tectonic volcanic rock-type uranium belt[R]. Unpublished data, 1988. (in Chinese)
- [19] 华东地质勘探局 269 大队. 六六〇矿田: 六六一, 六六三矿床实例报告[R]. 1984.  
Geological Party No. 269, East China Geological Exploration Bureau. Report examples of the No. 660 uranium orefield: The No. 661 and the No. 663 uranium deposits[R]. Unpublished data, 1984. (in Chinese)
- [20] 刘惠三. 浙江中生代陆相火山岩型铀矿化特征及其分布规律[J]. 浙江地质, 1986, 2(1): 7-30.

- Liu Huisan. The characteristics and distribution law of uranium mineralization of Mesozoic land facies volcanic rock-type in Zhejiang Province[J]. *Geology of Zhejiang*, 1986, 2(1): 7—30. (in Chinese with English abstracts)
- [21] 秦社彩. 661 矿床控矿“绿色层”物质组分及成因研究[D]. 南京: 南京大学, 1988.
- Qin Shecai. A study on mineral-petrological composition and genesis of ore-control “green strata” in 661 uranium deposit [D]. Nanjing: Nanjing University, 1988. (in Chinese with English abstracts)
- [22] 杨流顺. 某铀矿田“绿色层”的成因及其意义[J]. *浙江地质*, 1987, 3(2): 46—51.
- Yang Liushun. Genesis and significance of “green strata” from a volcanite-type uranium deposit[J]. *Geology of Zhejiang*, 1987, 3(2): 46—51. (in Chinese with English abstract)
- [23] 周家志. 661 铀矿床成矿地质条件[J]. *华东铀矿地质*, 1989, (1): 6—17.
- Zhou Jiazhi. Metallogenic geological conditions of the No. 661 uranium deposit[J]. *Uranium Geology of East China*, 1989, (1): 6—17. (in Chinese)
- [24] 陈培荣, 章邦桐, 张祖还. 某些花岗岩型铀矿床成矿热液中的含铀离子和沉淀机理[J]. *地球化学*, 1991, (4): 351—358.
- Chen Peirong, Zhang Bangtong, Zhang Zuhuan. Uranium-bearing coordinate ions in hydrothermal solutions and mechanism of uranium precipitation during the formation of some granite-type uranium deposits[J]. *Geochimica*, 1991, (4): 351—358. (in Chinese with English abstract)
- [25] Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O solutions [J]. *Economic Geology*, 1988, 83(1): 197—202.
- [26] Bodnar R J. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids[J]. *Economic Geology*, 1983, 78(3): 535—542.
- [27] Burke E A J. Raman microspectrometry of fluid inclusions [J]. *Lithos*, 2001, 55(1—4): 139—158.
- [28] 陈祖伊, 张邻素, 陈树崑, 郭葆琛, 陈伟鹤, 王正邦. 华南断块运动-陆相红层发育期与区域铀矿化[J]. *地质学报*, 1983, (3): 294—303.
- Chen Zuyi, Zhang Linsu, Chen Shukun, Guo Baochi, Chen Weihe, Wang Zhengbang. The stages of development of fault-block movement and continental red beds with respect to the regional uranium mineralization in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1983, (3): 294—303. (in Chinese with English abstract)
- [29] 吴萍, 杨振强. 中南地区白垩纪-第三纪岩相古地理及含矿性[M]. 北京: 地质出版社, 1979.
- Wu Ping, Yang Zhenqiang. Paleogeography and ore-bearing potential of Cretaceous-Tertiary of Central part Region, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979. (in Chinese)
- [30] 沈渭洲. 同位素地质学教程[M]. 北京: 原子能出版社, 1997.
- Shen Weizhou. *Isotopic geology*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997. (in Chinese)
- [31] 卢焕章. 高盐度、高温和高成矿金属的岩浆成矿流体——以格拉斯伯格 Cu-Au 矿为例[J]. *岩石学报*, 2000, 16(4): 465—472.
- Lu Huanzhang. High temperature, salinity and high concentrated ore metal magmatic fluids: An example from Grasberg Cu-Au porphyry deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(4): 465—472. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王巧云, 胡瑞忠, 彭建堂, 毕献武, 武丽艳, 刘华, 苏本勋. 湖南瑶岗仙钨矿床流体包裹体特征及其意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2263—2273.
- Wang Qiaoyun, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, Bi Xianwu, Wu Liyan, Liu Hua, Su Benxun. Characteristics and significance of the fluid inclusions from Yaogangxian tungsten deposit in South Hunan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(9): 2263—2273. (in Chinese with English abstract)
- [33] 王守旭, 张兴春, 秦朝建, 石少华, 冷成彪, 陈衍景. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿流体包裹体初步研究[J]. *地球化学*, 2007, 36(5): 467—478.
- Wang Shouxu, Zhang Xingchun, Qin Chaojian, Shi Shaohua, Leng Chengbiao, Chen Yanjing. Fluid inclusions in quartz veins of Pulang porphyry copper deposit, Zhongdian, northwestern Yunnan, China[J]. *Geochimica*, 2007, 36(5): 467—478. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘雷. 地幔去气与铀成矿的关系[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005.
- Liu Lei. The relationship between mantle degassing and uranium metallogenesis; a case study of the Xiangshan uranium deposit[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [35] 黄伟良. 某火山岩型铀矿床成矿物化条件浅析[J]. *铀矿地质*, 1989, 5(2): 78—85.
- Huang Weiliang. Preliminary analysis of physico-chemical conditions of metallogenesis for a volcanite-type uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, 1989, 5(2): 78—85. (in Chinese with English abstract)
- [36] 丘志力, 章邦桐. 670 矿床多期成矿作用特征及控矿因素研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1991, 30(2): 140—148.
- Qiu Zhili, Zhang Bangtong. A research on multistage metallization and ore-controlling factors of 670-uranium deposit[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1991, 30(2): 140—148. (in Chinese with English abstract)
- [37] 何德宝. 江西省白面石铀矿田成矿机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- He Debao. Study on mineralization mechanism of Baimianshi uranium orefield in South Jiangxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007. (in Chinese with English abstract)

- assimilation capability of water from Tuojiang River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1986, 6(1): 37-42. (in Chinese with English abstract)
- [19] 赵振华. 河水在硝化过程中抑制作用的研究[J]. *环境科学*, 1979, (4): 22-26.  
Zhao Zhenhua. The study of inhibiting in nitrification in rivers [J]. *Environmental Science*, 1979, 4: 22-6. (in Chinese with English abstract)
- [20] Brooker M P, Johnson P C. The behavior of phosphate, nitrate, chloride and hardness in twelve Welsh rivers[J]. *Water Research*, 1984, 18(9): 1155-1164.
- [21] Kronfang B. The export of particulate matter, particulate phosphorus and dissolved phosphorus from two agricultural river basins: implications on estimating the non-point phosphorus load[J]. *Water Research*, 1992, 26(10): 1347-1358.
- [22] Prepas E E, Charette T. Worldwide eutrophication of water body: Causes, concerns, controls[M]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 9: 311-331.
- [23] 陈建耀, 王亚, 张洪波, 赵新峰. 地下水硝酸盐污染研究综述[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(1): 34-41.  
Chenjanyao, Wangya, Zhanghongbo, Zhaoxinfeng. Overview on the studies of nitrate pollution in groundwater[J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(1): 34-41. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李思亮, 刘丛强, 肖化云, 陶发祥, 郎赞超, 韩贵林.  $\delta^{15}\text{N}$  在贵阳地下水氮污染来源和转化过程中的辨识应用[J]. *地球化学*, 2005, 34(3): 257-262.  
Li Siliang, Liu Congqiang, Xiao Huayun, Tao Faxiang, Lang Yunchao, Han Guilin. Using  $\delta^{15}\text{N}$  to assess groundwater nitrogen pollution in Guiyang[J]. *Geochimica*, 2005, 34(3): 257-262. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王毛兰, 胡春华, 周文斌. 丰水期鄱阳湖氮磷含量变化及来源分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(1): 138-142.  
Wang Maolan, Hu Chunhua, Zhou Wenbin. Concentration variations of N and P in Poyang Lake during high water period with analysis on their sources[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(1): 138-142. (in Chinese with English abstract)
- [26] 白占国, 吴丰昌, 万曦, 邹申清, 万国江. 百花湖季节性水质恶化机理研究[J]. *重庆环境科学*, 1995, 17(3): 10-14.  
Bai Zhanguo, Wu Fengchang, Wan Xi, Zou Shenqing, Wan Guojiang. Mechanism of water quality worsening seasonally in Lake AHA[J]. *Chongqing Environmental Science*, 1995, 17(3): 10-14. (in Chinese with English abstract)

(上接第 23 页)

- [38] 刘埃平, 金景福. 361 铀矿床热液地球化学特征及成矿物理化学条件[J]. *成都理工学院学报*, 1994, 21(1): 51-61.  
Liu Aiping, Jin Jingfu. The hydrothermal geochemical features and physico-chemical conditions of uranium deposit 361 [J]. *Journal of Chengdu institute of technology*, 1994, 21(1): 51-61. (in Chinese with English abstract)
- [39] 杜乐天, 王玉明. 华南花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型、砂岩型铀矿床成矿机理的统一性[J]. *放射性地质*, 1984, (3): 1-10.  
Du Letian, Wang Yuming. Uniform metallogenic mechanism among the granite-, volcanic-, carbonaceous-siliceous-pelitic rock and sand-stone-hosted uranium deposits in South China [J]. *Radioactive Geology*, 1984, (3): 1-10. (in Chinese with English abstract)