

文章编号: 0258-7106 (2011) 01-0033-12

桂北沙子江铀矿床流体包裹体初步研究*

石少华^{1,2}, 胡瑞忠^{1**}, 温汉捷¹, 赵肖芒³, 宋生琼^{1,2}, 魏文凤^{1,2}

(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, 贵州 贵阳 550002; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3 金原铀业公司桂林分公司, 广西 桂林 541400)

摘要 对沙子江矿床内与成矿关系密切的各成矿阶段石英中流体包裹体进行了研究, 显示成矿早阶段部分高温流体对铀的迁移可能发挥了一定作用, 而整个成矿过程中主要成矿流体为中-低温、低盐度及中等密度热液。含子矿物包裹体可能捕获于流体沸腾作用过程中。沸腾作用降低了成矿流体中碳酸铀酰络离子的浓度, 有利于铀的沉淀。成矿晚阶段, 源自赋矿的富烃花岗岩体中烃类组分的加入为营造铀沉淀的还原环境贡献了力量, 同时, 这类富烃的花岗岩体对铀矿体形成以后的保存也起到了很大的作用。

关键词 地球化学; 成矿流体; 烃类包裹体; 沙子江; 苗儿山; 桂北

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

A tentative discussion on fluid inclusions in quartz veins of Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi

SHI ShaoHua^{1,2}, HU RuiZhong¹, WEN HanJie¹, ZHAO XiaoMang³, SONG ShengQiong^{1,2}
and WEI WenFeng^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Guilin Branch of Jinyuan Uranium Corporation, China National Nuclear Corporation, Guilin 541400, Guangxi, China)

Abstract

The Miaoershan uranium orefield, one of the five large-size uranium orefields in central South China, hosts the Chanziping uranium ore deposit, which is the largest carbonaceous-siliceous-pelitic rock type uranium ore deposit in China, and some granite uranium ore deposits. A series of petrographic, microthermometric and Laser Raman microspectroscopic studies of fluid inclusions (FI) in the quartz veins of the Shazijiang uranium ore deposit, one of the important granite-hosted uranium ore deposits in the orefield, were carried out by the authors. Five types of FI were observed or identified, namely liquid FI, daughter mineral-bearing FI, pure gas FI, pure liquid FI and hydrocarbon FI. As the main fluid inclusion type of the whole ore-forming process, liquid FI have characteristics of the ore-forming fluid. The homogenization temperatures, salinities and densities of liquid FI are in the range of 109.0~342.6°C, 0.53%~7.73%, and 0.71~1.02 g/cm³ respectively. It is concluded that part of high-temperature (>300°C) fluids carried significant amounts of uranium at the early ore-forming stage. Of course, dominant ore-forming fluids are characterized by low-moderate temperature, low salinity and moderate density. Daughter mineral-bearing FI could be captured under the condition of ore-forming fluid boiling. Daugh-

* 本文得到国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411408)及国家自然科学基金重大项目(40634020)的联合资助

第一作者简介 石少华, 男, 1979年生, 博士研究生, 地球化学专业, 从事矿床学及矿床地球化学研究。Email: ssh311@163.com

**通讯作者 胡瑞忠, 男, 1958年生, 博士, 研究员, 博导, 从事大陆动力学与成矿关系、成矿作用地球化学、成矿规律与成矿预测等的研究。Email: huruizhong@vip.gyig.ac.cn

收稿日期 2010-05-26; 改回日期 2010-08-12。张绮玲编辑。

ter minerals are halite and sylvite. The homogenization temperatures, salinities [$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$] and densities of daughter mineral-bearing FI are in the range of 211.8~322.0°C, 32.39%~39.76%, and 1.07~1.15 g/cm³, which should not be considered to represent the characteristics of original ore-forming fluid. Boiling reduced the activity of uranyl-carbonate complexes and resulted in uranium precipitation. At the last ore-forming stage, the addition of hydrocarbon probably from host granite into the ore-forming fluid contributed to the reduction and precipitation of hexavalent uranium. Meanwhile, hydrocarbon-rich host granite created favorable conditions for uranium ore body preservation. The hydrocarbon is composed of lots of saturated hydrocarbon, benzene, olefin and bitumen.

Key words: geochemistry; ore-forming fluid; hydrocarbon inclusion; Shazijiang; Miaoershan; northern Guangxi

地质流体在热液矿床形成过程中扮演着十分重要的角色,是成矿物质得以活化、迁移、富集的主要介质。流体包裹体作为地质流体的直接证据,可以提供热液矿床成因方面的诸多有价值的信息。因此,在热液铀矿床中广泛发育的石英、方解石、萤石、重晶石等脉石矿物中进行过较深入的流体包裹体研究。同时,还开展过较多的直接针对铀的单矿物(主要是沥青铀矿)本身的群体包裹体爆裂法测温及群体成分提取研究,但因群体包裹体方法自身的缺陷,目前已少有应用。而且,铀元素放射性衰变过程也可能对铀矿物内包裹体化学成分产生显著的影响(Dubessy et al., 1983)。近年来,发展迅速的红外显微研究方法在辉锑矿、闪锌矿及黄铁矿等不透明矿物的包裹体研究中发挥了重要作用(Chapman et al., 1984; Lueders, 1996; Kouzmanov et al., 2002; Kucha et al., 2009),沥青铀矿因受制于其禁带宽度等物理性质的影响,红外显微研究前景仍不明朗。所以,透明脉石矿物流体包裹体研究仍然是目前获取热液铀矿床的成矿流体参数最直接有效的手段。

沙子江矿床位于广西桂林市资源县境内,是苗儿山铀矿田内重要的花岗岩型铀矿床之一。它在20世纪60~70年代桂北普查会战时由原中南地勘局发现并提交储量,经近年来补充勘探已经落实它为大型铀矿床。苗儿山铀矿田是中南地区五大铀矿田之一,其内分布有著名的中国最大规模的碳硅泥岩型铀矿床——铲子坪矿床,及双滑江、孟公界、白毛冲等诸多花岗岩型铀矿床。花岗岩型铀矿床(国外一般归类为脉型铀矿床)多数为典型的热液矿床,大

量流体包裹体资料显示,该类铀矿床成矿流体主要以中-低温、低盐度、含CO₂为特征(Cuney, 1978; Leory, 1978; Poty et al., 1988; Wide et al., 1989; Min et al., 1999; 金景福等,1987;张国全,2008),纯CO₂或含CH₄、H₂及烃类包裹体在一些铀矿床中也有发现(Wide et al., 1989; 范洪海等,2007)。前人对该成矿区进行过大量的找矿勘探和专题研究,对围岩提供铀源潜力、构造与矿体产出关系、围岩蚀变与成矿过程关联等宏观基础地质问题进行过较为详尽的论述^{①②③}(孙涛等,2007;方适宜等,2007;谢晓华等,2008)。然而,有关矿床内成矿流体性质、铀迁移及沉淀等成矿核心问题却有待继续深入。沙子江矿床的地球化学工作薄弱,虽然进行过少量流体包裹体研究^④,但缺少系统岩相学观察表述,包裹体成分也多为群体分析资料。本次研究对在空间上和时间内与铀矿化密切相关的脉石矿物中的流体包裹体进行了详细的研究,这对于研究和探讨该矿床成矿流体特征及成矿作用具有重要的意义。同时,在成矿晚阶段梳状石英中发现了较多烃类包裹体,并对其进行了初步的研究,为探索该矿床的成因提供了新的线索。

1 地质概况

沙子江矿床的大地构造位置处于华南扬子板块江南被动陆缘隆起带南缘,苗儿山-越城岭花岗岩穹窿构造西翼的苗儿山岩体中段,南东侧为华夏岛弧系。

① 中国核工业地质局. 2005. 中南铀矿地质志.

② 核工业230研究所,南京大学地球科学系. 2007. 苗儿山铀矿田双滑江铀矿床次生铀矿富集成矿作用研究.

③ 广西310核地质大队. 1991. 新资盆地黄沙江-湾底地段白垩系地层层序初步研究报告.

铀地层为震旦系陡山沱组及寒武系清溪组黑色岩系,中-上泥盆统信都组的含碳质石英粉砂岩、泥质岩,唐家湾组的含碳深灰色厚-巨厚层细晶白云岩。苗儿山-越城岭岩体为多期多阶段花岗岩复式岩体,除苗儿山岩体有少量雪峰期花岗斑岩出露外,两岩体主体均以加里东期花岗岩为主,伴有多个印支期及燕山期花岗岩体。另外,在苗儿山岩体中段及越城岭岩体东侧中-上泥盆统见基性岩浆侵入,时代不详。新资断陷红盆地层不整合于下白垩统-震旦系地层及苗儿山-越城岭两花岗岩体之上,呈NNE向蜿蜒分布,白垩系主要为一套陆相粗碎屑沉积物组成的类磨拉石建造。区内断裂构造发育,主体为NNE向断裂。新资断裂为区内最大断裂构造,并同时发育许多NNE向次级断裂,它们是铀矿化的重要部位。沙子江矿床产在苗儿山岩体中段印支期的豆乍山岩体与香草坪岩体接触带附近,香草坪岩体为中粗粒黑云母花岗岩,豆乍山岩体为中粒-中细粒黑(二)云母二长花岗岩。矿化段花岗岩蚀变作用发育,蚀变带宽,近矿段常表现为强的赤铁矿化、黄铁矿化、绿泥石化、钾钠长石化、高岭土化;远矿段为伊利水云母化;无矿化段蚀变作用弱或无。另外,矿区内分布有较多的花岗斑岩及细晶岩等晚期岩脉。矿区构造发育,并伴有较多次级构造裂隙,呈束状构造群排列。构造变异部位及两岩体的接触带常控制铀矿化的分布。矿体多呈透镜状、脉状及楔状侧幕式排列,具尖灭再现、膨胀收缩、分支复合等现象,矿体产状及形态受控于矿床内断裂。

2 含矿脉体特征

除了通过野外地质产状、矿物共生组合及矿石结构构造等特点判断成矿阶段的方法外,热液铀矿床中各成矿阶段的脉石矿物本身所具有的显著特点,有助于我们准确确定代表不同成矿阶段的脉体,开展流体包裹体研究。在沙子江矿床,矿石矿物主要为沥青铀矿,在其附近广泛分布着铀黑、钙铀云母、铜铀云母、钙铀矿等次生铀矿物;脉石矿物主要有石英、方解石、萤石、黄铁矿、赤铁矿及针铁矿等。其中,常可见黄铁矿、赤铁矿与沥青铀矿共生,这类不同物理化学条件下形成的矿物共存,张复新等(2006)称之为特态相矿物群,赵凤民等(1983)对热液铀矿床中这类矿物群进行过系统研究,它们实际上应该是热液演化不同阶段的产物,共生矿物中

赤铁矿形成于早期有利于六价铀迁移的氧化体系,而沥青铀矿则形成于黄铁矿之前或同时,为体系转化为还原环境后的产物,针铁矿则是上述含铁矿物交代蚀变的产物。由于整个成矿过程中,石英脉的特征变化最为显著,以下笔者以石英脉类型为“纲”,对与之共存的矿物进行了“梳理”(图2a~2f)。

①粗晶石英脉:以大量白色粗晶石英为特征,伴少量白色、浅肉红色方解石细脉,其内少量沥青铀矿呈浸染状分布。这一时间段的硅化活动强烈,形成了诸多大型硅化构造带,热液活动漫长,温度降低缓慢,使硅质有条件充分结晶而形成粗晶石英。

②微晶-细晶石英脉:以白色、红褐色等微晶及细晶石英为特征,伴有较多的肉红色及酱紫色方解石和紫黑色萤石,沥青铀矿呈浸染状、细脉状、肾状及球粒状。

③隐晶质石英脉:微晶-隐晶石英反映了一种快速堆积的环境,常具烟灰色、红褐色、黑色等特征色,通常认为主要是由于其中混合了成矿流体或围岩中不同阳离子或矿物所致。另外,同样也伴有较多的肉红色及酱紫色方解石和紫黑色萤石等。关于方解石及萤石的不同成色现象除与微晶-隐晶石英原因类似外,一般认为可能还与铀矿物的辐射效应有关。这类脉石矿物通常颜色越深的部位矿化也越好,沥青铀矿呈浸染状、细-粗脉状、肾状及球粒状。②及③类型伴有较多的黄铁矿、赤铁矿及针铁矿,黄铁矿呈浸染状及(细)脉状产出,有胶状及晶形完好(五角十二面体)的晶粒状两种,两者应为不同世代的产物。

④梳状石英脉:物质沉淀速度减慢,温度和矿液浓度缓慢降低,晶粒自裂隙边缘向中心由细变粗,自形和半自形石英沿脉壁呈梳状生长,伴有较多的纯净乳白色方解石、无色及绿色萤石、晶洞石英及少量黄铁矿、赤铁矿、针铁矿等,距矿化稍有一定的距离。

上述4类的大致活动顺序为:①类最早,可归为成矿早阶段;②类及③类次之,且两者无明显先后关系,许多脉体同时具备两者的特征,为主成矿阶段;④类归为成矿晚阶段。

3 流体包裹体研究

3.1 流体包裹体岩相学特征

本次研究系统采集了不同成矿阶段的各类脉石

矿物,制成双面抛光包裹体片 70 余片在光学显微镜下观察。其中,方解石样品因解理发育,其内包裹体多沿解理带成簇分布,可能多为次生包裹体。主成矿阶段萤石颜色太黑,也很难进行系统的显微研究。为此,笔者重点选择了各成矿阶段包裹体发育的石英样品 9 件(每件样品所属成矿阶段见表 1),对其中的原生包裹体进行了显微测温。细晶石英通过挑选晶形较好的单矿物,用环氧树脂黏结固定磨片。根据卢焕章等(2004)提出的流体包裹体在室温下相态分类准则,可以划分为以下 5 种类型(图 2g~2m)。

I 类:液体包裹体(L+V),主要形态有椭圆状、近圆状、长条状及不规则状,包裹体大小多数在 5~35 μm,气相分数介于 5%~35%之间,呈孤立状及

群状分布。本类是整个铀成矿过程中占绝大多数的流体包裹体,在均一化过程中,全部均一至液相。

II 类:含子矿物包裹体(L±V+S),包裹体形态主要为椭圆状,大小 3~25 μm,气相分数 5%~25%,呈孤立状分布。子矿物种类主要为石盐和钾盐等,部分包裹体同时含有石盐和钾盐,个别含 3 个子矿物。其中,石盐子矿物颗粒较大,晶形很好,呈立方体状;钾盐子矿物颗粒较小,呈浑圆状,颜色较暗。主要分布于主成矿阶段石英脉中,其他成矿阶段石英脉中偶有分布。

III 类:纯气体包裹体(V),此类包裹体出现量较少,包裹体形态为椭圆状,大小 5~10 μm,呈孤立分散状随机镶嵌分布,在主成矿阶段及成矿晚阶段石

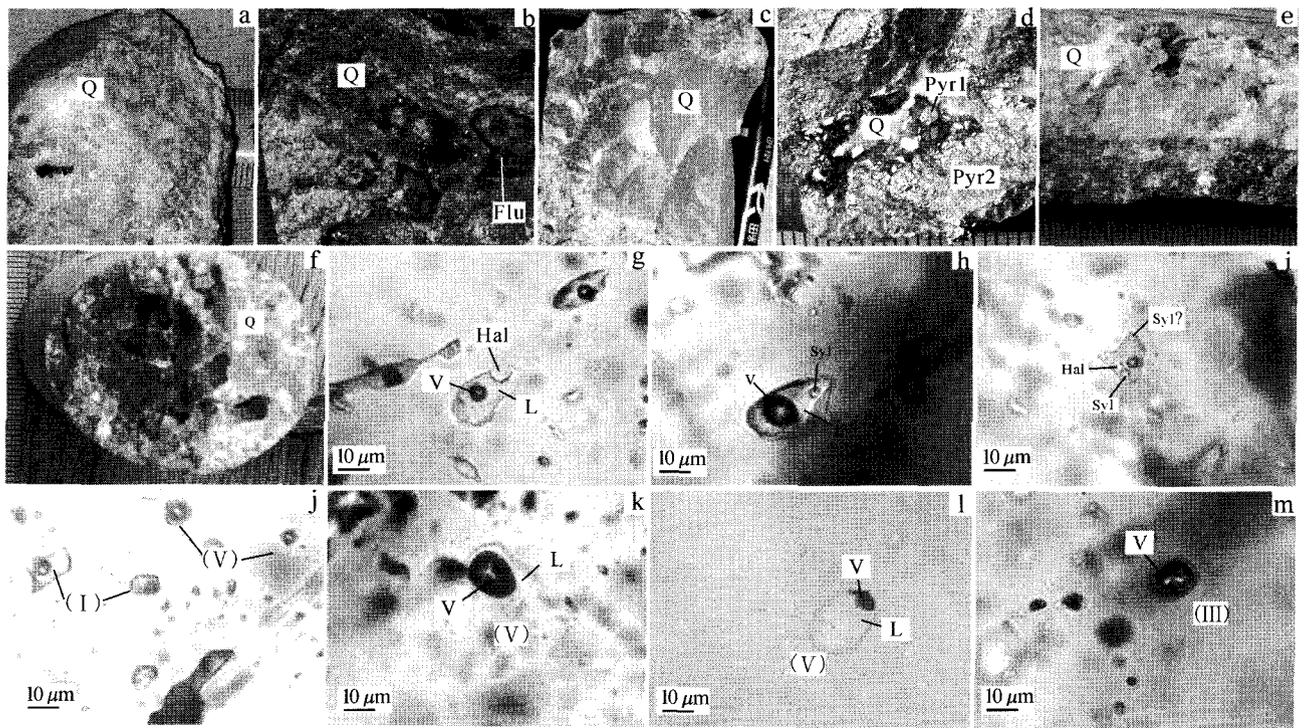


图 2 沙子江铀矿床成矿各阶段石英脉及流体包裹体显微照片

a. 成矿早阶段粗晶石英; b. 主成矿阶段细晶石英与紫黑色萤石; c. 主成矿阶段微晶石英; d. 主成矿阶段细晶石英与黄铁矿; e. 成矿晚阶段梳状石英; f. 成矿晚阶段晶洞石英; g. 含石盐子矿物包裹体; h. 含钾盐子矿物包裹体; i. 同时含石盐与钾盐子矿物包裹体; j. 水溶液包裹体与烃类包裹体共存; k. 富气相烃类包裹体; l. 富液相烃类包裹体; m. 纯气相包裹体; L—包裹体液相; V—包裹体气相; (I)、(II)、(III)及(V)为包裹体类型; Hal—石盐; Syl—钾盐; Flu—萤石; Pyr1—晶粒状黄铁矿; Pyr2—胶状黄铁矿; Q—石英

Fig. 2 Micrographs of quartz veins and fluid inclusions in the Shazijiang uranium ore deposit

a. Coarse crystalline quartz of early mineralization stage; b. Fine crystalline quartz and purple black fluorite of main mineralization stage; c. Microcrystalline quartz of main mineralization stage; d. Fine crystalline quartz and pyrite of main mineralization stage; e. Comb quartz of late mineralization stage; f. Drusy cavity quartz of late mineralization stage; g. Halite-bearing FI; h. Sylvite-bearing FI; i. Halite- and sylvite-bearing FI; j. Coexistence of aqueous FI and hydrocarbon FI; k. Gas-rich hydrocarbon FI; l. Liquid-rich hydrocarbon FI; m. Pure gas FI; L—Liquid of FI; V—Vapor of FI; (I), (II), (III) and (V) represent types of FI; Hal—Halite; Syl—Sylvite; Flu—Fluorite; Pyr1—Pyrite with excellent crystalline grain form; Pyr2—Colloidal pyrite; Q—Quartz

英脉中,与I型及II型包裹体共存,指示在包裹体捕获时可能发生过流体的沸腾作用,或者有两种流体的不混溶作用存在。

IV类:纯液体包裹体(L),此类包裹体出现量也较少,主要分布在成矿晚阶段石英脉中,包裹体形态为椭圆状、长条状,常沿矿物结晶面成群分布。

V类:烃类包裹体(L+V),在成矿晚阶段梳状石英脉中广泛分布,占此类石英脉中包裹体总量近4%,主要形态有椭圆状、近圆状、长条状,大小10~25 μm ,气相分数变化大,10%~90%范围内都有,暗示了可能捕获于流体向开放体系转变的过程中。液相呈淡黄色或无色,很清澈,气相很黑,呈近圆状、椭圆状及不规则状,表明液相黏度较大,可能为液态烃类,后文进一步的研究也证实了这个推断。

3.2 流体包裹体显微测温

显微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流体包裹体实验室完成,主要是针对I类及II类包裹体进行。测试仪器为英国Linkam THMSG 600型冷热台,测温范围为-196~600 $^{\circ}\text{C}$ 。冰点测定时,升温速率由开始的10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 逐渐降低为5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,临近相变点时降至1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 或0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,测试精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。均一温度测定时,开始时的升温速率为20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,临近相变点时降至1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 或0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,测试精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。I类包裹体的含盐度,根据流体包裹体冰点与盐度关系表(卢焕章等,2004)获得。II类包裹体的含盐度,根据石盐熔化温度和盐度经验公式(Hall et al., 1988)计算获得。I类及II类包裹体的流体密度,根据刘斌等(1999)推导的公式计算获得。

显微测温结果列于表1、图3,以下根据包裹体

类型及不同成矿阶段综合分析均一温度、盐度及密度特征。

I类液体包裹体:成矿早阶段包裹体均一温度范围165.3~342.6 $^{\circ}\text{C}$ ($n=76$),均值273.6 $^{\circ}\text{C}$,集中区间255~315 $^{\circ}\text{C}$ ($n=41$),冰点范围-4.9~-0.6 $^{\circ}\text{C}$ ($n=62$),对应盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 1.06%~7.73%,均值4.98%,流体密度0.71~1.01 g/cm^3 ,均值0.89 g/cm^3 。主成矿阶段包裹体均一温度范围136.1~312.8 $^{\circ}\text{C}$ ($n=129$),均值209.4 $^{\circ}\text{C}$,集中区间180~240 $^{\circ}\text{C}$ ($n=79$),冰点范围-4.1~-0.6 $^{\circ}\text{C}$ ($n=113$),对应盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 1.06%~6.59%,均值4.25%,流体密度0.72~1.02 g/cm^3 ,均值0.93 g/cm^3 。成矿晚阶段包裹体均一温度范围109.0~264.5 $^{\circ}\text{C}$ ($n=82$),均值157.8 $^{\circ}\text{C}$,集中区间120~165 $^{\circ}\text{C}$ ($n=58$),冰点范围-4.2~-0.3 $^{\circ}\text{C}$ ($n=58$),对应盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 0.53%~6.74%,均值3.44%,流体密度0.79~1.02 g/cm^3 ,均值0.95 g/cm^3 。各成矿阶段均一温度跨度均较大,可能是由于存在2个或2个以上世代的包裹体。从成矿早阶段至晚阶段,成矿流体温度及盐度呈下降趋势(图4),而密度呈增高趋势,其中温度变化趋势非常显著,而盐度及密度变化趋势弱。

II类含子矿物包裹体:均一温度范围211.8~322.0 $^{\circ}\text{C}$ ($n=16$),均值287.4 $^{\circ}\text{C}$,对应的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为32.39%~39.76%,均值37.26%,密度大于I类液体包裹体,为1.07~1.15 g/cm^3 ,均值1.09 g/cm^3 。部分此类包裹体缺失气相(L+S),暗示其捕获的流体可能发生过去气作用过程。其他此类包裹体均一化过程中,大部分首先是气泡消失,最后通过子矿物消失而均一至液相。另有一含单个子矿物的

表1 桂北沙子江铀矿床流体包裹体测温结果

Table 1 Microthermometric data of fluid inclusions in quartz veins from the Shazijiang uranium ore deposit

样号	成矿阶段	石英脉及包裹体类型	$t_m/^{\circ}\text{C}$		$t_h/^{\circ}\text{C}$		$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$		流体密度/ (g/cm^3)	
			范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
08-g 02-a	成矿早阶段	①,I	-4.9~-0.6 (62)	-3.3	165.3~342.6 (76)	273.6	1.06~7.73	4.98	0.71~1.01	0.89
03-b 07-g xm-1 xm-2	主成矿阶段	②,I	-4.1~-0.6 (113)	-2.6	136.1~312.8 (129)	209.4	1.06~6.59	4.25	0.72~1.02	0.93
		③,II			211.8~322.0 (16)	287.4	32.39~39.76	37.26	1.07~1.15	1.09
1320-a 1320-c 07-f	成矿晚阶段	④,I	-4.2~-0.3 (58)	-2.1	109.0~264.5 (82)	157.8	0.53~6.74	3.44	0.79~1.02	0.95

注:括号中数字为统计的包裹体测试数。

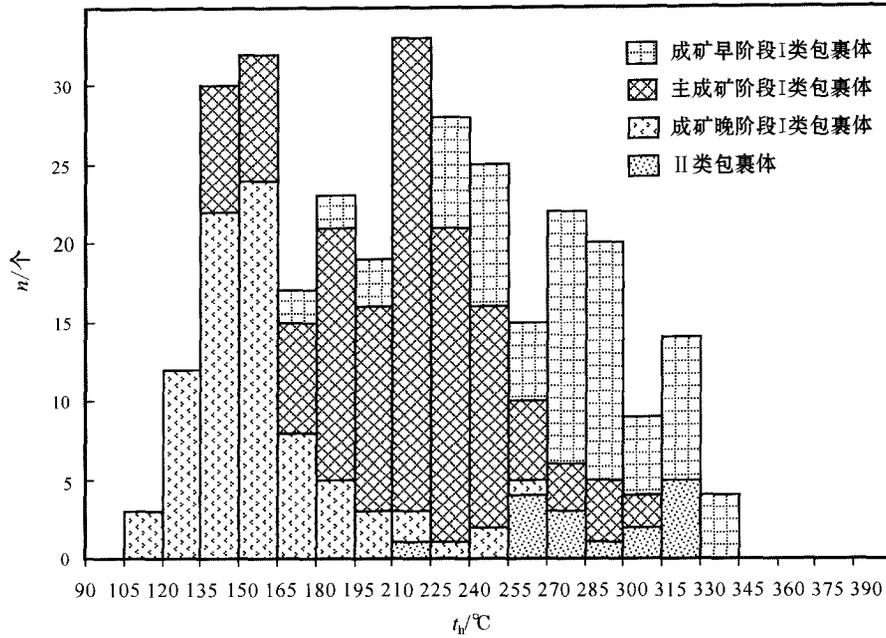


图 3 沙子江铀矿床流体包裹体均一温度直方图

Fig. 3 Histogram showing homogenization temperatures of fluid inclusions in the Shazijiang uranium ore deposit

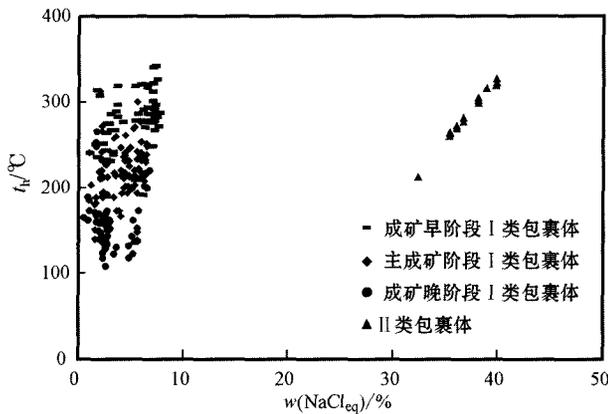


图 4 沙子江铀矿床均一温度-盐度分布图

Fig. 4 Homogenization temperatures versus salinities of fluid inclusions in the Shazijiang uranium ore deposit

包裹体,在 211.8℃ 时通过气泡和子矿物同时消失而达到均一状态,暗示流体发生了沸腾作用(卢焕章等,2004)。

3.3 激光拉曼探针分析

单个包裹体的成分分析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激光拉曼光谱实验室完成。测试仪器为 Renishaw 公司生产的 In-Via Reflex 型显微共焦激光拉曼光谱仪,光源为 Spectra-Physics 氩离子激光器,波长为 514 nm,激光功率 20 mW,空间分辨率为 1~2 μm,积分时间一般

为 30 s,局部测试积分时间适当延长,100~4 000 cm⁻¹全波段一次取谱。

分析结果表明, I ~ IV 类包裹体气相及液相成分均为 H₂O,未检测出其他成分。对 II 类包裹体中的子矿物进行了拉曼分析,均未检出拉曼谱峰,推测子矿物种类主要为前述的石盐与钾盐。V 类包裹体气相及液相成分拉曼谱征相似,在 2 845~2 963 cm⁻¹附近有强的拉曼谱峰显示,3 063 cm⁻¹及 1 065 cm⁻¹处也有明显的拉曼效应,3 218 cm⁻¹处有弱的拉曼显示,另有很少量 H₂O 的拉曼谱峰(图 5)。由于烃类包裹体拉曼光谱是由其分子结构和基团特征决定的,而烃类组分的复杂性及共同基团特征,导致了根据拉曼图谱确定包裹体中烃种类和某烃的相对含量牵强而不准确,但是可以通过拉曼图谱总体特征定性分析烃类包裹体中饱和烃、沥青、芳香烃及非烃四大组分的含量高低(张鼐等,2007)。通常饱和烃以甲基、亚甲基在 2 700~2 970 cm⁻¹区域有强烈拉曼谱峰为特征,苯环在 988 cm⁻¹及 3 058 cm⁻¹处有特征峰,烯烃以 1 635 cm⁻¹为主,2 970 cm⁻¹及 3 200 cm⁻¹则为沥青质的特征峰(张鼐等,2007;2009)。由此推测 V 类包裹体确为烃类包裹体,以饱和烃为主,有少量苯、烯烃及沥青质,另外还有少量的 H₂O。当然,激光拉曼能够提供有关烃类包裹体的信息毕竟是有限的,深入工作可开展诸如荧光显

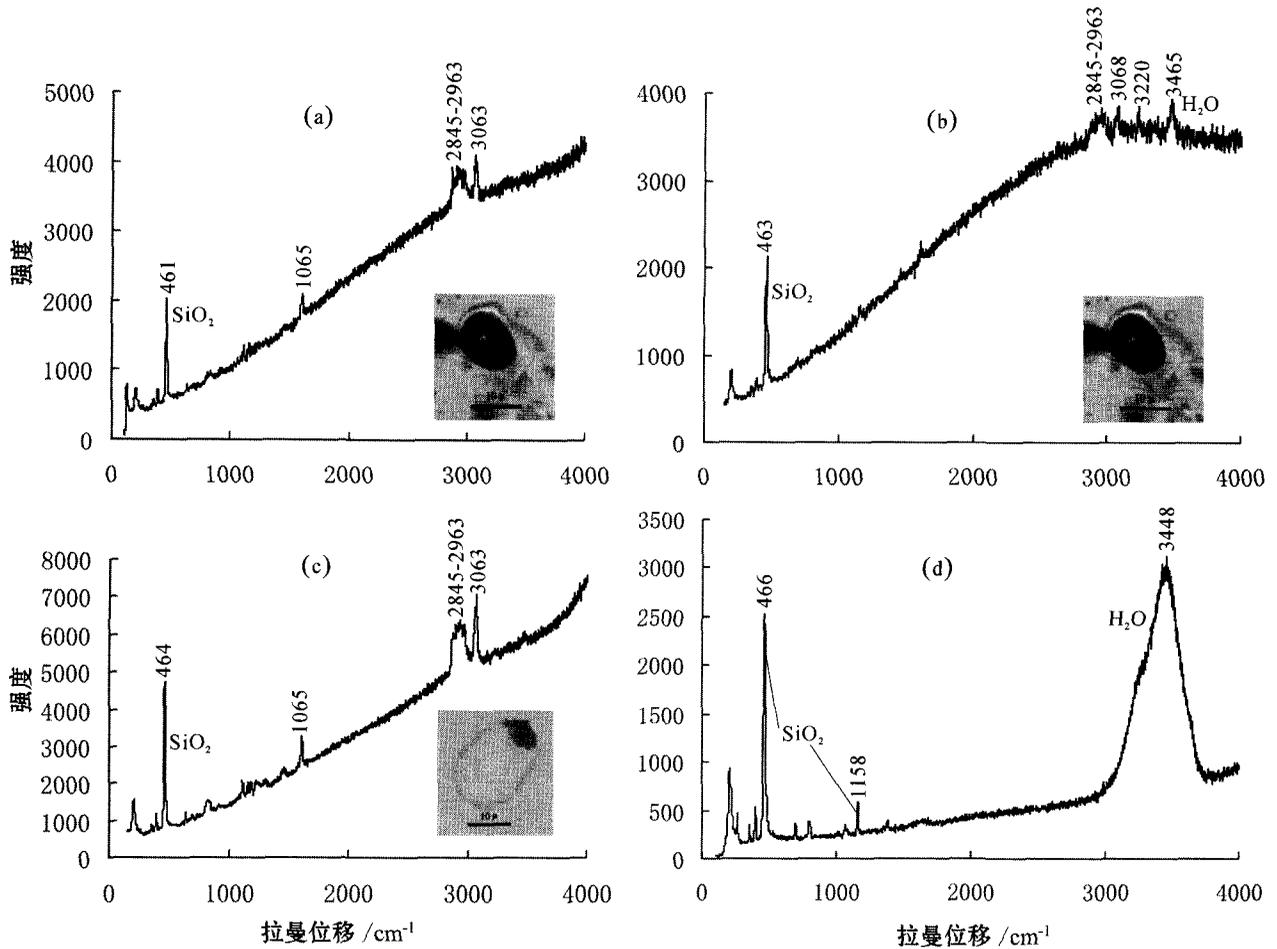


图5 沙子江铀矿床流体包裹体激光拉曼光谱

a. V类包裹体液相成分; b. V类包裹体气相成分; c. V类包裹体液相成分; d. I~IV类包裹体气相及液相成分

Fig. 5 Laser Raman spectra of fluid inclusions in the Shazijiang uranium deposit

a. Raman spectra of liquid in type V FI; b. Raman spectra of gas in type V FI; c. Raman spectra of liquid in type V FI; d. Raman spectra of liquid and gas in type I~IV FI

微研究及傅立叶红外光谱等方面的工作。

4 讨论

流体包裹体作为成矿热液的样品,为确定成矿流体成分提供了最直观的渠道,但同时不应该忽略矿物共生组合及围岩蚀变等可用以确定成矿热液成分的宏观因素,毕竟可用以进行包裹体研究的样品仅仅是很少部分成矿流体的产物,而包裹体的捕获又存在很大的随机性,故而在确定成矿流体成分时,以上两者应结合起来分析。如前所述,方解石、萤石、黄铁矿、赤铁矿等脉石矿物大量存在且与铀矿化紧密相伴,近矿段强的赤铁矿化、黄铁矿化、绿泥石化、钾钠长石化、高岭土化等,表明成矿流体中 K^+ 、

Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 或 Fe^{3+} 及 HCO_3^- 、 F^- 、 S^{2-} 的存在是毋庸置疑的。本次石英脉样品中流体包裹体研究中发现了较多石盐及钾盐子矿物,同样表明成矿流体中富含 K^+ 、 Na^+ 及 Cl^- 等。梳状石英中烃类包裹体的存在,暗示了成矿晚阶段成矿流体中有烃类组分的加入。综合分析包裹体岩相学及显微测温结果, I类包裹体基本反映了成矿流体的主要特征,考虑到均一温度是包裹体捕获温度的下限,笔者认为部分高温流体($>300^{\circ}C$)可能对成矿早阶段铀的迁移发挥了一定的作用,而整个成矿过程中主要成矿流体为中-低温、低盐度及中等密度的热液;而II类包裹体很可能是主成矿阶段成矿流体发生沸腾作用时捕获的,其所对应的高盐度并非原始成矿流体的特征。流体发生沸腾作用的证据除前已提及的理由

外,还有如下3点:①大部分含子矿物包裹体中子矿物熔化温度与附近I类包裹体均一温度接近;②虽然中酸性岩浆通过一定程度的结晶分异作用使岩浆中挥发分过饱和,也可以造成流体相和熔体相的不混溶作用,形成中-高盐度流体(Heinrich, 2007)。但是,华南热液铀矿床所具有的矿岩时差的典型特点,基本可以排除这种形成机制。沙子江矿床主要成矿年代为104.4 Ma及 (53.0 ± 6.4) Ma(石少华等, 2010),而赋矿的豆仵山及香草坪岩体均为印支期岩体,最新锆石 SHRIMP U-Pb 年代学数据显示成岩年龄分别为 (228 ± 11) Ma(谢晓华等, 2008)和 (211 ± 2) Ma(李妩巍等, 2010),矿岩时差达100 Ma以上,远远超出岩浆活动所能影响的时限。而且,区内也不存在与成矿年代相接近的中酸性岩浆活动;③方解石碳、氧同位素研究($n = 22$)显示, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 相关图解上两者呈明显负相关关系,同样暗示了成矿流体发生去气作用是导致方解石沉淀的主控因素(郑永飞等, 2000),而减压沸腾是实现去气作用的重要途径之一(石少华等, 2009)。

苗儿山铀成矿区内铀矿床(点、化)产于从前寒武纪至第三纪的各类岩石中,铀成矿显示了就地取材的特点,即铀源岩为各类已固结的富铀岩石。华南众多铀矿床氢、氧同位素研究结果近乎一致地显示成矿流体中的水主要为大气降水(杜乐天等, 1984;金景福等, 1990;王联魁等; 1987; Min et al., 1999)。那么,铀的迁移及沉淀成矿经历了怎样的过程呢?铀在成矿流体中的迁移必须满足两个基本条件,即具有较高的溶解度和最大的稳定性(章邦桐等, 1990),而铀的沉淀则主要受控于成矿流体的氧化还原状态、pH值、配位体浓度及温度变化,其他影响因素还包括低温环境下的吸附作用及细菌还原作用等(Cuney, 2009; Skirrow et al., 2009)。热液铀矿床成矿流体中铀大部分以碳酸铀酰络离子形式迁移已取得较多共识(Cuney, 1978; Leory, 1978; McLennan et al., 1979; Michard et al., 1987; 胡瑞忠等, 1993; 2007)。沙子江矿床显微测温所得成矿早阶段及主成矿阶段流体包裹体的均一温度集中区间与实验测得的铀氧化物最大溶解区间(Naumov, 1963; 刘正义等, 1995)基本一致。成矿流体减压沸腾,大大降低了碳酸铀酰络离子的浓度,有利于铀的沉淀。有关烃类组分与金属成矿的关系受到越来越多的地学工作者重视,很多金属矿床和成矿流体中都发现了烃类组分(Etminan et al., 1989; Wide et

al., 1989; Sangély et al., 2007; 张志坚等, 1995; 薛春纪等, 2002; 徐庆鸿, 2007)。在中国北方砂岩型铀矿床中有较多该方面的研究,一般认为烃类组分源自于深部油气田,对铀的还原沉淀起了很大作用(李宏涛等, 2008; 李怀渊等, 2000)。欧光习等(2000)研究发现,华南产铀花岗岩较之于无矿花岗岩往往具有较高含量的烃类组分,花岗岩型铀矿床的铀矿化常与赋矿花岗岩体中烃类含量有显著的正相关关系。实际上,目前烃类组分异常与 ^{210}Po 法(曹晓满, 2006)一样,已经作为指导圈定铀矿体的重要方法之一在中国铀矿地质勘查中应用。成矿晚阶段,成矿流体中的烃类组分很有可能就是源自于这种赋矿的花岗岩体,它们的加入无疑会对营造铀沉淀的还原环境贡献力量,同时这类富烃的花岗岩体对铀矿体形成以后的保存也会起到很大的作用。

5 主要结论

(1) 沙子江矿床内与成矿关系密切的各成矿阶段石英中流体包裹体的类型有液体包裹体、含子矿物包裹体、纯液体包裹体、纯气体包裹体及烃类包裹体。子矿物主要为石盐及钾盐,烃类包裹体组分以饱和烃为主,另有少量苯、烯烃及沥青质,还有少量的 H_2O 。

(2) 部分高温流体对沙子江矿床成矿早阶段铀的迁移可能发挥了一定作用,而整个成矿过程中主要成矿流体为中-低温、低盐度、中等密度热液。热液成分为 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 等阳离子及 HCO_3^- 、 F^- 、 Cl^- 等阴离子。成矿早阶段到晚阶段,成矿流体温度及盐度呈下降趋势,而密度呈增高趋势,其中温度变化趋势非常显著,而盐度及密度变化趋势弱。

(3) 含子矿物包裹体是流体发生沸腾作用时捕获的,其所对应的高盐度并非原始成矿流体的特征,沸腾作用大大降低了成矿流体中碳酸铀酰络离子的浓度,有利于铀的沉淀。成矿晚阶段,可能是源自赋矿花岗岩体中烃类组分的加入为营造铀沉淀的还原环境贡献了力量,同时,这类富烃的花岗岩体对铀矿体形成以后的保存也起到了很大的作用。

志 谢 野外工作得到了金原铀业公司桂林分公司、广西310核地质大队及核工业230研究所的大力帮助,室内分析及成文过程中得到中国科学院地球化学研究所秦朝建高级工程师及施继锡研究员

的悉心指导,核工业北京地质研究院欧光习研究员及中国石油勘探开发研究院张甯高级工程师热心解答了实验中遇到的问题,审稿专家及编辑部对完善本文给予了宝贵意见和建议,作者在此一并表示衷心的感谢。

References

- Cao X M. 2006. The application effect of ^{210}Po survey in uranium exploration[J]. *Uranium Geology*, 22(3): 177-181 (in Chinese with English abstract).
- Champbell A R, Hackbarth C J, Plumlee G S and Petersen U. 1984. Internal features of ore minerals seen with the infrared microscope [J]. *Econ. Geol.*, 79(6): 1387-1392.
- Cuney M. 1978. Geological environment, mineralogy, and fluid inclusions of the Bois Noirs-Limouzat uranium vein, Forez, France[J]. *Econ. Geol.*, 73(8): 1567-1610.
- Cuney M. 2009. The extreme diversity of uranium deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 44(1): 3-9.
- Du L T and Wang Y M. 1984. The integration of metallogenic mechanisms of the granite-type, volcanic-type, carbonaceous-siliceous-pelitic rock-type, and sandstone-type uranium deposits in South China[J]. *Radioactive Geology*, (3): 1-10(in Chinese).
- Dubessy J, Hicel B and Pagel M. 1983. Radiolysis of water and organic matter: A source of free H_2 and O_2 in geological fluids[J]. *Terra Cognita*, 3: 178.
- Etiman H and Hoffmann C F. 1989. Biomarkers in fluid inclusions: a new tool in constraining source regimes and its implications for the genesis of Mississippi Valley-type deposits[J]. *Geology*, 17(1): 19-22.
- Fan H H, He D B, Gu D Z and Wang F G. 2007. Characteristics of fluid inclusions in the Baimianshi uranium ore field, southern Jiangxi [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(Supp.): 193-194(in Chinese).
- Fang S Y, Fan L T, Zhu K R, Shu X J, Ouyang P N and Xiao J J. 2007. Study on mineralization structures of vein shape granite type uranium deposit and prospecting prognosis in Menggongjie[J]. *Uranium Geology*, 23(3): 138-144(in Chinese with English abstract).
- Hall D L, Sterner S M and Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$ solutions[J]. *Econ. Geol.*, 83(1): 197-202.
- Heinrich C A. 2007. Fluid-fluid interactions in magmatic-hydrothermal ore formation[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 65(1): 363-387.
- Hu R Z, Li C Y, Ni S J, Liu L and Yu J S. 1993. Research on ΣCO_2 source in ore-forming hydrothermal solution of granite type uranium deposit, South China[J]. *Science in China(Series B)*, 23(2): 189-196(in Chinese).
- Hu R Z, Bi X W, Peng J T, Liu S, Zhong H, Zhao J H and Jiang G H. 2007. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China [J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 139-152 (in Chinese with English abstract).
- Jin J F and Hu R Z. 1987. Transportation and deposition of uranium in hydrothermal ore-forming fluids as exemplified by uranium deposit No. 302[J]. *Geochimica*, 16(4): 320-329(in Chinese with English abstract).
- Jin J F and Hu R Z. 1990. A preliminary study on the ore-forming materials of the Xiwang uranium deposit[J]. *Mineral Deposits*, 9(2): 141-148(in Chinese with English abstract).
- Kouzmanov K, Bailly L, Ramboz C, Rouer O and Bény J M. 2002. Morphology, origin and infrared microthermometry of fluid inclusions in pyrite from the Radka epithermal copper deposit, Srednogie zone, Bulgaria[J]. *Mineralium Deposita*, 37(6): 599-613.
- Kucha H and Raith J G. 2009. Gold-oxysulphides in copper deposits of the Greywacke zone, Austria: A mineral chemical and infrared fluid inclusion study[J]. *Ore Geology Reviews*, 35(1): 87-100.
- Leory J. 1978. The Margnac and Fanay uranium deposits of the La Crouzille district (western Massif Central, France): Geological and fluid inclusion studies[J]. *Econ. Geol.*, 73(8): 1611-1634.
- Li H T, Wu S X, Cai C F and Luo X R. 2008. Forming process of petroleum-related sandstone-type uranium ore: Example from Qianjiandian uranium deposit[J]. *Geochimica*, 37(6): 523-532(in Chinese with English abstract).
- Li H Y, Zhang S P and Li H M. 2000. Study of the relationship between uranium mineralization and oil accumulation[J]. *Geological Review*, 46(4): 355-361(in Chinese with English abstract).
- Li W W, Wang G, Chen W F and Zhao K D. 2010. Geochemical and chronological characteristics of Xiangcaoping granite pluton in Miaoershan area[J]. *Uranium Geology*, 26(4): 215-221, 227(in Chinese with English Abstract).
- Liu B and Shen K. 1999. *Fluid Inclusion Thermodynamics*[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 171-248(in Chinese).
- Liu Z Y and Zhang J F. 1995. Experimental study on dissolution behavior of Au, U and Si[J]. *Uranium Geology*, 10(4): 212-219 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, Ou G X, Shen K and Zhang W H. 2004. *Fluid Inclusions*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Lueders V. 1996. Contribution of infrared microscopy to fluid inclusion studies in some opaque minerals (wolframite, stibnite, bourmonite): Metallogenic implications[J]. *Econ. Geol.*, 91(8): 1462-1468.
- McLennan S M and Taylor S R. 1979. Rare earth element mobility associated with uranium mineralisation[J]. *Nature*, 282: 247-250.
- Michard A, Beaucarite C and Michard G. 1987. Uranium and rare earth element in CO_2 -rich waters from Vals-les-bains (France) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(4): 901-909.
- Min M Z, Luo X Z, Du G S, He B A and Campbell A R. 1999. Mineralogical and geochemical constraints on the genesis of the granite-hosted Huangao uranium deposit, SE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 14(2): 105-127.
- Naumov G B. 1963. On the role of complexing in the transport and deposition of uranium by hydrothermal solution[J]. *Geochemistry International*, 5: 544-550.
- Ou G X, Chen A F, Cui J Y, Xu Y H, Wang C H and Xu Y. 2000. U-

- ranium metallogenic model related to CO₂ and hydrocarbon in granite type uranium deposits[R]. China Nuclear Science and Technology Report. 577-593(in Chinese with English abstract).
- Poty B and Pagel M. 1988. Fluid inclusions related to uranium deposits: a review[J]. Journal of the Geological Society, 145(1): 157-162.
- Sangély L, Chaussidon M, Michels R, Brouand M, Cuney M, Huault V and Landais P. 2007. Micrometer scale carbon isotopic study of bitumen associated with Athabasca uranium deposits: Constraints on the genetic relationship with petroleum source-rocks and the abiogenic origin hypothesis[J]. Earth and Planetary Science Letters, 258(3-4): 378-396.
- Shi S H, Hu R Z, Wen H J, Sun R L, Wang J S and Chen H. 2009. Carbon-Oxygen and sulfur isotope compositions of the Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi, China and their implications for the uranium mineralization process[J]. Acta Mineralogica Sinica, 29(Supp.): 326-327(in Chinese).
- Shi S H, Hu R Z, Wen H J, Sun R L, Wang J S and Chen H. 2010. Geochronology of the Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi, China: U-Pb ages of pitchblende and their geological significance[J]. Acta Geological Sinica, 84(8): 1175-1182(in Chinese with English abstract).
- Skirrow R G, Jaireth S, Huston D L, Bastrakov E N, Schofield A, Wielen S E and Barnicoat A C. 2009. Uranium mineral systems: Processes, exploration criteria and a new deposit framework[R]. Australia: Geoscience Australia Record.
- Sun T, Wang Z C, Chen P R and Zhou X M. 2007. Study on late Mesozoic granites in northern Nanling Rang: Miaoershan and Yuechengling granite[A]. In: Zhou X M, ed. Genesis of Late Mesozoic granites and their geodynamic evolution of Nanling Rang [M]. Beijing: Science Press. 504-520(in Chinese).
- Wang L K and Liu T G. 1987. A study on H, O, S and Pb isotopes of granite-hosted uranium deposits, South China[J]. Geochemica, 16(1): 67-77(in Chinese with English abstract).
- Wide A R, Mernagh T P, Bloom M S and Hoffmann C F. 1989. Fluid inclusion evidence on the origin of some Australian unconformity-related uranium deposits[J]. Econ. Geol., 84(6): 1627-1642.
- Xie X H, Chen W F, Zhao K D, Sun T, Jiang S Y, Zhu K R and Li W W. 2008. Geochemical characteristics and geochronology of the Douzhashan granite, northeastern Guangxi Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1302-1312(in Chinese with English abstract).
- Xu Q H. 2007. Studies of relationship between hydrocarbon and ore-forming in fluid flow and its application for ore exploration(dissertation for Doctor degree)[D]. Supervisor: Mao J W and Chen Y R. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Xue C J, Chen Y C, Yang J M, Wang D H and Xu J. 2002. The CO₂-rich and hydrocarbon-bearing ore-forming fluid and their metallogenic role in the Lanping Pb-Zn-Ag-Cu orefield, north-western Yunnan[J]. Acta Geological Sinica, 76(2): 244-253(in Chinese with English abstract).
- Zhang B T and Chen Z Y. 1990. Endogenic uranium deposits: Theory and methodology [M]. Beijing: Atomic Energy Press. 38-39(in Chinese).
- Zhang F X, Qiao H M and Jia H. 2006. The metallogenic condition and epigenetic alteration mineralization of Dongsheng uranium deposit in the Inner Mongolia[J]. Acta Geological Sinica, 80(5): 733-739(in Chinese with English abstract).
- Zhang G Q. 2008. Geochemistry of hydrothermal uranium deposits in South China: A case study of the No. 302 uranium deposit(dissertation for Doctor degree)[D]. Supervisor: Hu R Z. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- Zhang N, Tian Z J, Leng Y Y, Wang H T, Song F Q and Meng J H. 2007. Raman spectroscopic characteristics of hydrocarbon and hydrocarbon inclusions[J]. Science in China(Series D), 37(7): 900-907(in Chinese).
- Zhang N, Tian Z J, Mao G J, Wu S H, Liu J X and Tuo Q. 2009. Raman spectroscopic characteristics of bitumen inclusions [J]. Geochimica, 38(2): 174-178(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z J, Xia W H, Zhang W H and Feng Z W. 1995. Organic inclusions of Xitieshan Lead-Zinc deposit and their significance[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 20(2): 225-230 (in Chinese with English abstract).
- Zhao F M and Zheng Z X. 1983. Classification and genesis of mineral associations in hydrothermal uranium deposits of China[J]. Geological Review, 29(3): 220-226(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F and Chen J F. 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

附中文参考文献

- 曹晓满. 2006. ²¹⁰Po 法在铀矿勘探中的应用效果[J]. 铀矿地质, 22(3): 177-181.
- 杜乐天, 王玉民. 1984. 华南花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型、砂岩型铀矿成矿机理的统一性[J]. 放射性地质, (3): 1-10.
- 范洪海, 何德宝, 顾大钊, 王凤岗. 2007. 江西赣南白面石铀矿田流体包裹体特征研究[J]. 矿物学报, 27(增刊): 193-194.
- 方适宜, 范立亭, 朱康任, 舒孝敬, 欧阳平宁, 肖建军. 2007. 孟公界花岗岩型脉状铀矿床成矿构造研究及找矿预测[J]. 铀矿地质, 23(3): 138-144.
- 胡瑞忠, 李朝阳, 倪师军, 刘 莉, 于津生. 1993. 华南花岗岩型铀矿床成矿热液中ΣCO₂来源研究[J]. 中国科学(B辑), 23(2): 189-196.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 刘 葵, 钟 宏, 赵军红, 蒋国家. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. 矿床地质, 26(2): 139-152.
- 金景福, 胡瑞忠. 1987. 302 矿床成矿热液中铀的迁移和沉淀[J]. 地球化学, 16(4): 320-329.
- 金景福, 胡瑞忠. 1990. 希望铀矿床成矿物质来源初探[J]. 矿床地质, 9(2): 141-148.
- 李宏涛, 吴世祥, 蔡春芳, 罗晓容. 2008. 油气相关砂岩型铀矿的形成

- 过程:以钱家店铀矿床为例[J]. 地球化学,37(6):523-532.
- 李怀渊,张守鹏,李海明. 2000. 铀-油相伴性探讨[J]. 地质论评,46(4):355-361.
- 李妩巍,王 敢,陈卫峰,赵葵东. 2010. 香草坪岩体年代学和地球化学特征[J]. 铀矿地质,26(4):215-221,217.
- 刘 斌,沈 昆. 1999. 流体包裹体热力学基础[M]. 北京:地质出版社. 171-248.
- 刘正义,张家富. 1995. 金、铀、硅溶解性状的实验研究[J]. 铀矿地质,10(4):212-219.
- 卢焕章,范宏瑞,倪 培,欧光习,沈 昆,张文淮. 2004. 流体包裹体[M]. 北京:科学出版社.
- 欧光习,陈安福,崔建勇,许银焕,王春华,徐 燕. 2000. 花岗岩型铀矿床中碳氢化合物的铀成矿模式[R]. 中国核科技报告. 577-593.
- 石少华,胡瑞忠,温汉捷,孙如良,王加昇,陈 恒. 2009. 桂北沙子江铀矿床碳、氧、硫同位素特征及其对成矿过程的指示[J]. 矿物学报,29(增刊):326-327.
- 石少华,胡瑞忠,温汉捷,孙如良,王加昇,陈 恒. 2010. 桂北沙子江铀矿床成矿年代学研究:沥青铀矿 U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报,84(8):1175-1182.
- 孙 涛,王志成,陈培荣,周新民. 2007. 南岭地区晚中生代北带花岗岩研究:苗儿山-越城岭岩体[A]. 见:周新民,主编. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京:科学出版社. 504-520.
- 王联魁,刘铁庚. 1987. 华南花岗岩型铀矿 H、O、S、Pb 同位素研究[J]. 地球化学,16(1):67-77.
- 谢晓华,陈卫锋,赵葵东,孙 涛,陈培荣,蒋少涌,朱康任,李妩巍. 2008. 桂东北豆乍山花岗岩年代学与地球化学特征[J]. 岩石学报,24(6):1302-1312.
- 徐庆鸿. 2007. 流体中烃类组分与金属成矿关系研究及其在找矿勘查中的应用(博士论文)[D]. 导师:毛景文,陈远荣. 北京:中国地质大学.
- 薛春纪,陈毓川,杨建民,王登红,徐 珏. 2002. 滇西北兰坪铅锌银铜矿田含贫 CO₂ 成矿流体及其地质意义[J]. 地质学报,76(2):244-253.
- 章邦桐,陈祖伊. 1990. 内生铀矿床及其研究方法[M]. 北京:原子能出版社.
- 张复新,乔海明,贾 恒. 2006. 内蒙古东胜砂岩型铀矿床形成条件与成矿作用[J]. 地质学报,80(5):733-739.
- 张国全. 2008. 华南热液铀矿床地球化学研究——以 302 铀矿床为例(博士论文)[D]. 导师:胡瑞忠. 贵阳:中国科学院地球化学研究所.
- 张 甯,田作基,冷莹莹,王汇彤,宋孚庆,孟建华. 2007. 烃和烃类包裹体的拉曼特征[J]. 中国科学(D辑),37(7):900-907.
- 张 甯,田作基,毛光剑,吴胜华,刘建宪,脱 奇. 2009. 沥青包裹体的拉曼光谱特征[J]. 地球化学,38(2):174-178.
- 张志坚,夏卫华,张文淮,冯志文. 1995. 锡铁山铅锌矿床有机包裹体及其研究意义[J]. 地球科学,20(2):225-230.
- 赵凤民,郑自先. 1983. 中国热液铀矿床矿物共生组合分类和成因初步探讨[J]. 地质论评,29(3):220-226.
- 郑永飞,陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社.