

# 相山牛头山地区铀矿床深部多金属成矿流体特征与成矿物质来源探讨\*

邱林飞, 吴迪, 吴玉, 金贵善, 韩娟, 刘军港, 郭娟

(核工业北京地质研究院, 北京 100029)

**摘要** 最新的研究与钻探结果揭示, 相山铀矿田深部蕴藏丰富的铜铅锌多金属矿产资源, 矿田具有“上铀、下多金属”的资源空间展布样式, 对这种新型矿床的形成机制迄今尚未得到阐明。文章在野外地质调查基础上, 研究铀多金属矿石中矿物共生组合和流体包裹体特征, 初步揭示了含矿流体的性质及其成矿机制。新的资料表明, 铀矿化下部的多金属成矿作用可以划分为3期: 第1期形成粒状石英-黄铁矿组合; 第2期形成石英-闪锌矿-黄铜矿-方铅矿-毒砂-菱铁矿组合; 第3期形成方铅矿-辉银矿-黝锡矿-方解石组合。对不同矿化期次脉石矿物中的流体包裹体进行观察鉴定、温度测试、激光拉曼成分分析及硫化物S同位素分析研究。结果表明, 相山矿田多金属成矿流体早期为深部岩浆来源的富CO<sub>2</sub>流体, 晚期为深部流体与大气降水混合物。成矿流体总体为中低温(120~300℃)、低盐度( $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})=4\% \sim 8\%$ )的热液流体。从早到晚, 多金属成矿流体从中温、低盐度向低温、低盐度演化, 浅部流体的混入造成的流体物理化学条件改变可能是Cu、Pb和Zn等成矿元素沉淀的主要机制。

**关键词** 地球化学; 流体包裹体; 成矿流体; 来源; 铀多金属; 相山

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

## Characteristics of ore-forming fluids and sources of polymetallic ore-forming materials in deep segment of uranium deposits in Niutoushan area, Xiangshan

QIU LinFei, WU Di, WU Yu, JIN GuiShan, HAN Juan, LIU JunGang and GUO Juan

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

### Abstract

The latest researches and drilling results show that the Xiangshan uranium ore field is rich in copper, lead and zinc polymetallic mineral resources. The Xiangshan ore field has an ore-forming spatial model of “polymetallic material in the lower part, uranium in the upper part”. On the basis of field geological survey and according to the association characteristics of polymetallic ores, the authors divided the stages of ore-forming fluids of polymetallic ores which are under uranium mineralization. It is believed that there are three stages of mineralization in polymetallic mineralization. Stage 1 is granular quartz-pyrite combination, stage 2 is quartz-sphalerite-chalcopyrite-galena-arsenopyrite-siderite combination and stage 3 is galena-argyrite-calcite combination. Based on temperature test, Laser Raman composition analysis and sulfide S isotope study, the observation and identification of fluid inclusions in gangue minerals in different mineralization stages show that the polymetallic ore-forming fluids in Xiangshan ore field are of deep magma origin. CO<sub>2</sub>-rich fluid in the deep solution mixed with atmospheric

\* 本文得到国家重点研发计划“华南热液型铀矿基地深部探测技术示范(编号:2017YFC0602000)”项目资助

第一作者简介 邱林飞,男,1984年生,硕士,高级工程师,从事铀矿地质及流体地球化学研究工作。Email: qlf0602@163.com

收稿日期 2018-10-04;改回日期 2019-01-20。赵海杰编辑。

precipitation fluid at the late stage. The ore-forming fluid is generally a medium-low temperature (120~300°C), low salinity ( $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})=4\%\sim 8\%$ ) hydrothermal fluid. From the early stage to the late stage of mineralization, the evolution is from medium temperature and low salinity to low temperature and low salinity. Gradually, the change of fluid physicochemical conditions caused by the mixing of shallow fluids may be the main mechanism for the precipitation of ore-forming elements such as Cu, Pb and Zn.

**Key words:** geochemistry, fluid inclusion, ore forming fluid, source, uranium-polymetallic, Xiangshan

相山矿田具有良好的铀多金属成矿地质条件及找矿前景(陈荣清等,2014;张万良等,2014;吴志坚等,2014;胡宝群等,2015;王健等,2016)。近几年,随着勘查程度与研究的深入,在相山矿田牛头山地区及“相山矿田深部科学钻探”钻孔中铀矿化下部均发现了多段的铜铅锌银矿化,矿化规模较大,表明相山矿田除了铀矿产外,还存在其他多金属矿产的找矿前景。目前,该地区铀矿相关研究已取得了许多重要的研究成果(杜乐天,1996;范洪海等,2003;孙占学等,2001;姜耀辉等,2004;李子颖等,2006),但是将铀、铜、铅、锌、银等多矿种作为一个构造-流体作用下的成矿系统研究资料较少。早在1988年,杜乐天就提出了“幔汁-HACONS”假说,认为不同矿种成因都是幔汁的迁移及反应而实现的,碱交代作用是成矿的共同机理(杜乐天,1988)。翟裕生逐步将成矿系列研究扩展为成矿系统研究,提出了以区域成矿系统为核心内容的区域成矿研究的学术思想(翟裕生,2000)。成矿流体是成矿的“精髓”,成矿流体的来源与演化直接关系到找矿前景——仅是浅部成矿还是深部仍具有潜力?本文以相山矿田牛头山地区多金属矿为研究对象,在详细分析矿石矿物组成特点的基础上,综合成矿地质特征及矿物之间的穿插关系,划分了多金属成矿期次,并详细研究了各期次脉石矿物的流体包裹体特征,结合硫化物单矿物S同位素特征,探讨了铀多金属成矿流体特征与来源,为研究铀与多金属成矿流体的演化关系提供依据,并为铀矿与多金属成矿系统研究提供参考。

## 1 区域地质背景

相山矿田是中国著名的火山岩型铀矿田,位于北东向赣杭火山岩铀多金属成矿带与北北东向大王山-于山花岗岩型铀成矿带的复合叠加部位(图2b)。赣杭构造带也是中国铀、铜、铅、锌、银等矿床的重要成矿带。赣杭构造带经历了长期复杂的构造活动,

自加里东期开始形成,到燕山期构造活动最为强烈。长期的地质活动,使赣杭火山岩成矿带成为中国乃至世界上少有的高密度矿化富集区。特定的地质构造位置,频繁的岩浆活动控制了区内长久以来的成矿作用,前震旦纪以产出铜、镍、钨、磷矿等为主;震旦纪—志留纪以产出铜、锌、钼、银、镍矿等为主;泥盆纪—三叠纪以产出铀、磷、硼、钨、铅、锌矿等为主;三叠纪—白垩纪以铅、锌、铜、铀成矿为主(华仁民等,2005;马东升,2008;毛景文等,2008)。北东向德兴-遂川大断裂是相山盆地内主要的构造断裂,从大的区域范围而言,沿该断裂分布有东乡铜矿“银山银铜矿、金山金矿”等一系列重要的矿田和矿床(图1),预示相山矿田具有寻找铜、银、金、铅、锌等金属矿床的潜力。

牛头山地区位于相山铀矿田西部,处于火山塌陷构造-东西向戴坊-相山基底断陷带与河元背-小陂断裂的交汇部位(图2a),是相山矿田内近年发现的又一铀多金属矿床,具有典型“上铀下多金属”的成矿空间展布样式(图4)。

## 2 矿床地质与成矿阶段划分

牛头山地区基底地层主要出露于矿区北部,为震旦系(Z)浅变质岩,其岩性主要为石英云母片岩、绢云母千枚岩等。盖层主要为下白垩统火山岩,包括打鼓顶组上段( $K_1d^2$ )、下段( $K_1d^1$ )、鹅湖岭组上段( $K_1e^2$ )和潜火山岩( $\pi\gamma$ )。打鼓顶组下段岩性主要为紫红色(粉)砂岩,底部为含砾砂岩或砂砾岩,角度不整合于基底地层之上;打鼓顶组上段流纹英安岩仅见于深部而未出露地表,产于距地面标高-500 m以下的深部地段。矿区内大面积出露鹅湖岭组上段碎斑熔岩,呈灰略带浅红色,常见少量粉砂质泥岩岩屑、细小片岩、角岩化砂岩及黑云母角岩岩屑。潜火山岩有斑状花岗岩和花岗斑岩,呈零星分布的不规则岩盘、岩脉或岩瘤状,侵入于碎斑熔岩中。牛头山地区铅锌银多金属矿化主要控矿和容矿构造是河元



Fig. 2 Schematic geological map (a) and geotectonics location map (b) of Xiangshan uranium orefield (after Wang et al., 2016)

1—Cretaceous glutenite; 2—Lower Cretaceous Ehuling Formation Cataclastic porphyry rhyolite; 3—Lower Cretaceous Daguding Formation rhyodacite; 4—Lower Cretaceous Daguding Formation ignimbrite and glutenite; 5—Upper Triassic Anyuan Group coal-bearing glutenite and sandstone; 6—Mesoproterozoic metamorphic rock; 7—Granite porphyry; 8—Caledonian granite; 9—Fault; 10—Deposit; 11—Place name; 12—Xiangshan uranium ore field

背-小坡断裂。该断裂为张扭性,呈近南北走向(340°~350°),倾角为65°~82°,从北至南,从河元背以北向南经过小坡南,至石洞附近尖灭(图3)。断裂带内常见断层角砾和断层泥等,局部地段被硅质胶结形成硅化破碎带或被硅质脉穿插。

牛头山地区铀矿化一般产于距地面标高-300~-500 m的范围内,多金属矿化深度主要集中于距地面标高-700~-1000 m之间(图4)。无论是铀矿化

还是多金属矿化,矿脉均常呈脉状、网脉状或浸染状充填,明显受构造裂隙带控制(图5a)。铀矿化与赤铁矿化、紫黑色萤石化及硅化密切相关;多金属矿化

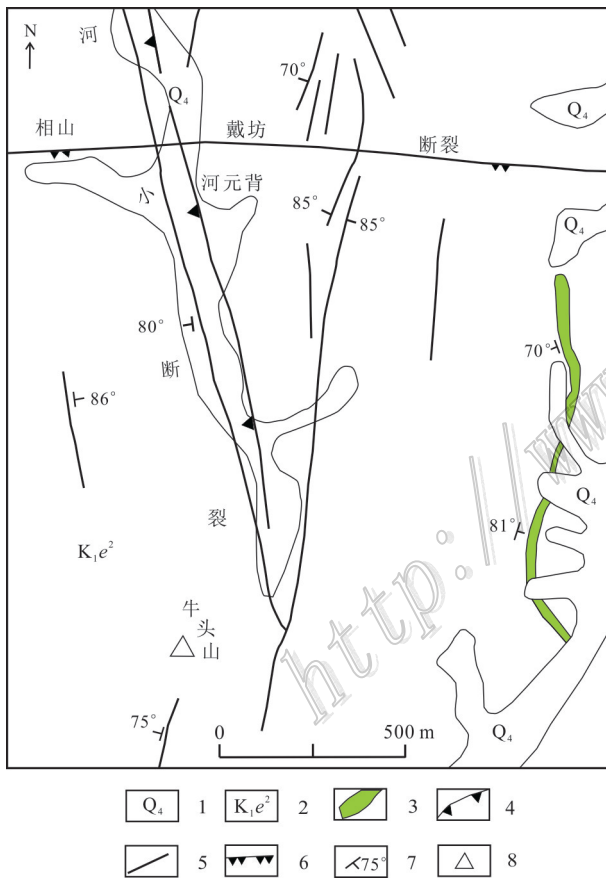


图3 牛头山地区铀多金属矿地质图(据王建国等,2014修改)

1—第四系;2—碎斑熔岩;3—煌斑岩脉;4—火山塌陷构造;5—断裂;6—基底断陷构造;7—产状;8—牛头山位置

Fig. 3 Geological map of uranium-polymetallic ore deposits in Niutoushan area(modified after Wang et al., 2014)

1—Quaternary; 2—Cataclastic porphyry rhyolite; 3—Lamprophyre vein; 4—Volcanic collapse structure; 5—Fault; 6—Basement fault subsidence; 7—Attitude; 8—Location of Niutoushan

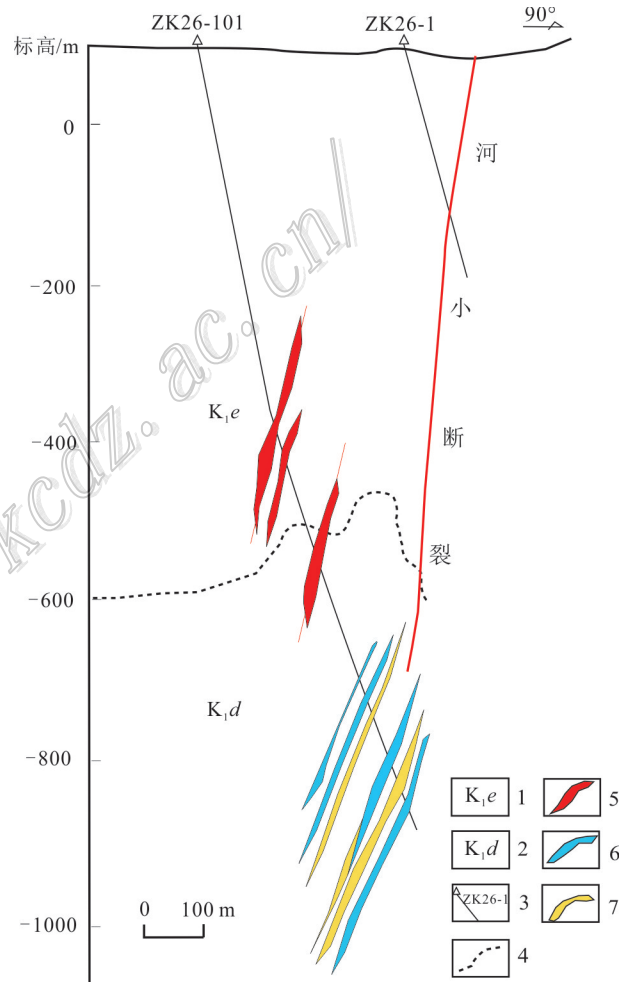


图4 牛头山地区铀多金属矿体剖面图

1—下白垩统鹅湖岭组碎斑熔岩;2—下白垩统打鼓顶组流纹英安岩;3—钻孔及其编号;4—地质界线;5—铀矿体;6—低品位铅锌矿体;7—高品位铅锌矿体

Fig. 4 Geological section of uranium-polymetallic orebody in Niutoushan area

1—Lower Cretaceous Ehuling Formation cataclastic porphyry rhyolite; 2—Lower Cretaceous Daguding Formation rhyodacite; 3—Drill hole and its serial number; 4—Geological boundary; 5—Uranium orebody; 6—Low grade lead-zinc orebody; 7—High grade lead-zinc orebody



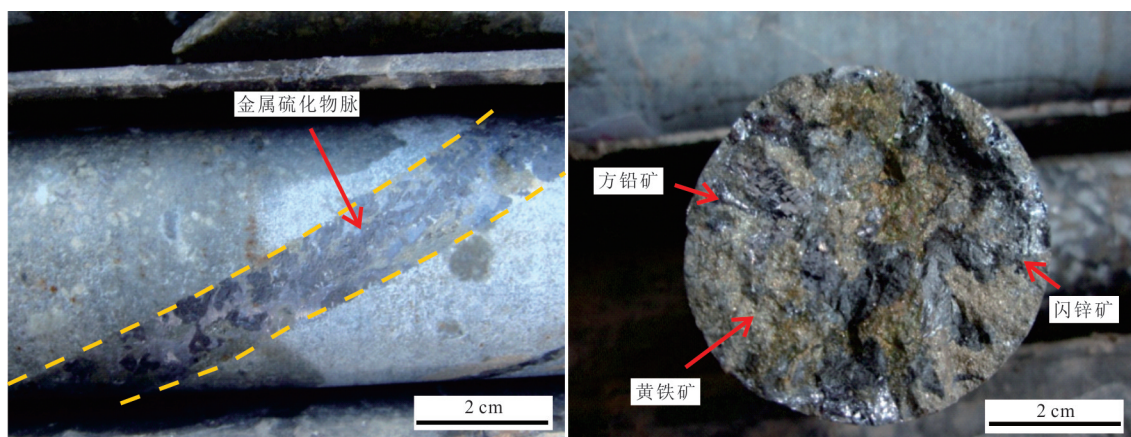


图5 牛头山多金属矿石照片

a. 沿构造裂隙呈带状分布的金属硫化物脉;b. 多金属矿石裂隙(面)中呈网脉状或浸染状分布的方铅矿、闪锌矿、黄铁矿

Fig. 5 Photos of polymetallic ore in Niutoushan area

a. Metal sulfide veins distributed along the tectonic fissure; b. Galena, sphalerite, pyrite in the form of lenticular or disseminated distribution in the fracture of polymetallic ore

与硅化、碳酸盐化密切相关。多金属矿石矿物种类比较复杂,主要有黄铁矿、(铁)闪锌矿、黄铜矿、方铅矿、毒砂、辉银矿等(图5b)。脉石矿物主要有石英、方解石、磷灰石、绢云母、绿泥石等。矿石结构主要为团粒状、自形粒状和他形粒状结构,少部分矿石发育环带结构和交代结构。

精确厘定成矿系统中矿物的生成世代是矿床成因研究的关键前提(邱昆峰等,2015)。通过野外地质调查、光薄片鉴定及电子探针测试分析,将牛头山地区多金属矿划分为3期,其中第2期包括2个成矿阶段。

第1期为粒状石英-黄铁矿期,特征是石英与团粒状黄铁矿呈镶嵌结构,团粒状黄铁矿的粒间空隙或裂缝中充填有晚期硫化物。金属硫化物主要有闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、辉银矿、黝锡矿等,Ag、Sn等元素以类质同像形式进入早期硫化物晶格中。随着温度下降,部分被捕获的矿物组分被排出而形成出溶的独立矿物或混合物(图6b、f)。

第2期为石英-闪锌矿-黄铜矿-方铅矿-毒砂-菱铁矿期。该期又可分为2个成矿阶段:第1成矿阶段的特征是石英与团块状或浸染状闪锌矿呈镶嵌结构,乳滴状黄铜矿和方铅矿呈固溶体结构发育于(铁)闪锌矿内(图6a、c);第2成矿阶段的特征是细脉状、团块状、浸染状黄铜矿(背散射照片中与闪锌矿不同如图6e虚线标示)、方铅矿、毒砂等硫化物沿早期矿物的微裂隙或空隙中充填或胶结(图6d、e)。

第3期为方铅矿-辉银矿-黝锡矿-方解石期,特征是辉银矿、黝锡矿、方铅矿等硫化物呈颗粒状、分散状充填于早期的金属硫化物裂隙中,方解石和方铅矿等矿物具有较好的结晶形态(图6g、h)。

第1期粒状石英、粒状黄铁矿被第2期早阶段闪锌矿(含乳滴状黄铜矿)和方铅矿所胶结、充填或被第2期晚阶段黄铜矿-方铅矿细脉所切割,第3期方解石和方铅矿等呈完整的自形晶,明显切割第1期和第2期硫化物。

### 3 样品与分析测试

#### 3.1 样品与分析方法

按照前文划分的蚀变-矿化阶段及典型矿物生成顺序特征,采集牛头山地区钻孔中不同成矿阶段的典型样品进行流体包裹体岩相学观察。在此基础上,选择了代表性的流体包裹体进行激光拉曼探针成分分析和显微测温,同时对不同成矿阶段的样品进行了硫同位素组成分析。包裹体岩相学观察使用LEICA 4500P研究级透反射显微镜,显微测温使用LINKAM THMSG600型冷热台,仪器精度为0.1℃,测试过程100℃以下升温速率为10℃/min,100℃以上升温速率为5℃/min。激光拉曼成分分析使用法国HORIBA公司生产的LabRAM Evolution型激光拉曼光谱仪,仪器空间分辨率为1 μm。S同位素分析在显微镜下划分不同阶段的硫化物单矿物,使用



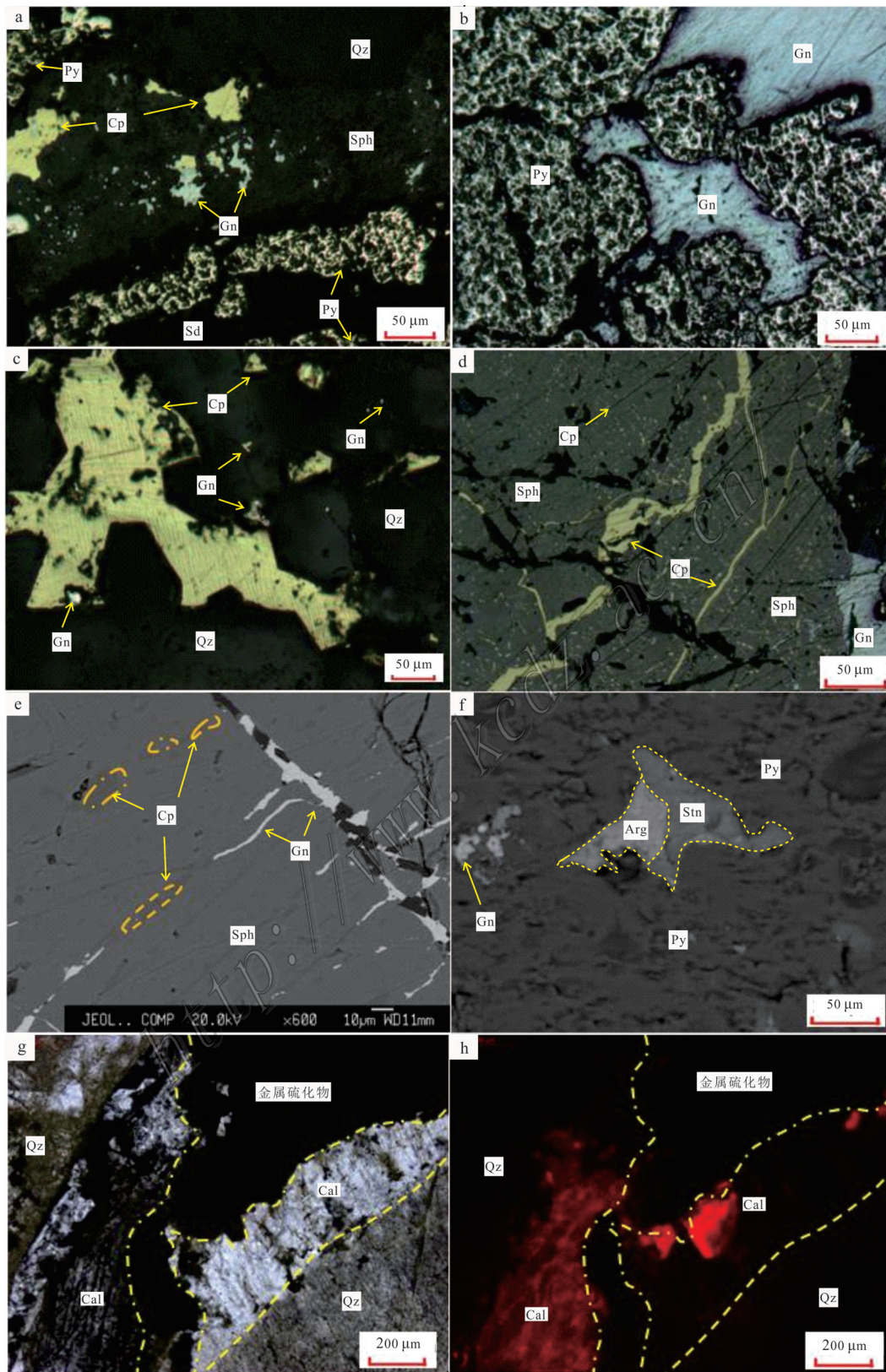


图6 牛头山地区多金属矿矿石显微特征

a. 粒状及脉状黄铁矿,团块状闪锌矿内发育固溶体结构的方铅矿和黄铜矿;b. 方铅矿胶结早期粒状黄铁矿;c. 黄铜矿、方铅矿与石英呈镶嵌结构;d. 闪锌矿被晚期黄铜矿和方铅矿细脉所切割;e. 黄铜矿呈固溶体结构出溶于闪锌矿内,并见方铅矿-黄铜矿脉

切割闪锌矿; f. 辉银矿、黝锡矿、方铅矿充填于早期粒状黄铁矿的微空隙内; g, h. 方解石与金属硫化物密切共生  
a~d. 为反射光照片; e~f. 为电子背散射照片; g. 单偏光照片; h. 阴极发光照片

Py—黄铁矿; Gn—方铅矿; Sph—闪锌矿; Cp—黄铜矿; Arg—辉银矿; Sd—菱铁矿; Stn—黝锡矿; Qz—石英

Fig. 6 Mineral microphotographs of the Niutoushan polymetallic area

- a. Granular and veined pyrite, galena and chalcopyrite with solid solution structure in agglomerated sphalerite; b. Early granular pyrite cemented by late galena;  
c. chalcopyrite, galena and quartz are inlaid together. d. Sphalerite is cut by late chalcopyrite and galena veins; e. Chalcopyrite is dissolved in sphalerite  
by solid solution structure, and sphalerite is cut by galena, chalcopyrite veins; f. Argentite, stannite, galena is filled in the microvoids of early  
granular pyrite; g-h. Calcite and metal sulfides are closely associated  
a~d. Reflected light photograph; e~f. Electron backscatter photography; g. Plainlight photography; h. Cathodoluminescence image  
Py—Pyrite; Gn—Galena; Sph—Sphalerite; Cp—Chalcopyrite; Arg—Argentite; Sd—Siderite; Stn—Stannite; Qz—Quartz

微切割设备挑选出单一期次的金属硫化物,再使用 Delta v plus 质谱仪进行分析,仪器精度为 0.2‰,实验均在核工业北京地质研究院完成。

### 3.2 流体包裹体

#### 3.2.1 岩相学观察鉴定

本次研究主要针对 ZK26-101 中 8 件多金属矿石样品(标高约-950 m)开展流体包裹体分析测试工作,测试的寄主矿物主要为石英和方解石。测试结果表明,样品中共发育 4 种类型的流体包裹体,分别为:

I 型为富 CO<sub>2</sub> 三相包裹体(V<sub>CO<sub>2</sub></sub> + L<sub>CO<sub>2</sub></sub> + L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>),在与粒状黄铁矿、团块状方铅矿、团块状黄铜矿共生的石英内,该类包裹体较为发育,常成群或零星分布,CO<sub>2</sub> 气相分数一般介于 30%~50%,个别可达 70% 以上(图 7a),大小常介于 3~10 μm。

II 型为富液相包裹体(L+V),为最常见的包裹体类型,广泛发育于石英和方解石内,大小一般为 5~20 μm。石英内包裹体气相分数一般为 10%~20% (图 7b~e),方解石内包裹体气相分数一般为 5%~10%(图 7g)。

III 型为纯液相包裹体(L),成群或零星发育于石英或方解石中,大小一般为 5~15 μm。

IV 型为纯(富)气相包裹体(V),仅少量成群或零星发育于部分石英中,气相分数大于 60%。

根据不同期次的矿物共生组合关系与包裹体显微特征,将流体包裹体分为 3 期次,第 1 期次为第 1 期石英中富气包裹体、纯气体包裹体及富 CO<sub>2</sub> 三相包裹体组合,第 2 期次为第 2 期石英中富液包裹体及纯液体包裹体组合,第 3 期为方解石中富液包裹体及纯液体包裹体组合。

#### 3.2.2 包裹体温度盐度特征

对不同脉石矿物中不同期次的流体包裹体进行测温分析,测温结果如表 1 所示。

从不同期次流体包裹体均一温度直方图中(图 8a)可以看出,第 1 期流体包裹体均一温度范围为

227~309℃,集中于 280~300℃,第 2 期次均一温度范围为 122~260℃,集中于 120~180℃,第 3 期次均一温度范围为 155~179℃,集中于 160~180℃。各成矿期次成矿流体的盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  都较为稳定,总体为 3.71%~8.55%,从早到晚盐度具有略微降低的趋势(图 8b)。上述表明相山铀矿深部多金属成矿早期主要为中温成矿作用,少部分达到高温成矿范围。成矿晚期为低温成矿作用过程,从早期到晚期,成矿温度及盐度具有降低的趋势。

#### 3.2.3 包裹体激光拉曼特征

对与多金属矿共生的石英中 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 三相包裹体、富液包裹体、纯气体包裹体进行激光拉曼分析。分析结果表明(图 9),石英中第 1 期次流体包裹体中气体成分主要为 CO<sub>2</sub>、部分含有少量的 CH<sub>4</sub>,第 2 期次流体包裹体中气体成分主要为 CH<sub>4</sub>,同时部分含有少量的 CO<sub>2</sub>,具有典型岩浆期后热液流体的挥发分特征(富含 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>),表明相山矿田深部多金属矿化成矿流体可能主要来自于岩浆期后热液流体。

### 3.3 硫同位素

本文对牛头山地区深部多金属矿及沙洲铀多金属矿矿石进行了硫同位素对比研究(表 2)。表 2 结果显示,相山矿田牛头山地区与铅锌矿伴生的 11 件金属硫化物样品(黄铁矿、闪锌矿、方铅矿)的 δ<sup>34</sup>S 值为 1.7‰~5.6‰,极差 3.9‰,平均值 3.7‰,变化范围较窄。总体而言,黄铁矿、闪锌矿具有相似的 δ<sup>34</sup>S<sub>V-CTD</sub> 同位素特征,大部分均为 4‰~5‰ 之间,方铅矿 δ<sup>34</sup>S 值较黄铁矿和闪锌矿略微偏低,为 1.7‰~2.6‰;与铀矿伴生的 8 件金属硫化物样品 δ<sup>34</sup>S 值为 10.4‰~15.2‰,极差 3.8‰,平均值 13.0‰,变化范围较窄。相山矿田铀矿床中与铀矿石伴生的硫化物 δ<sup>34</sup>S 值为 10.4‰~15.2‰,极差 4.8‰,平均值 13.04‰,变化范围较窄,显示硫同位素比较稳定。



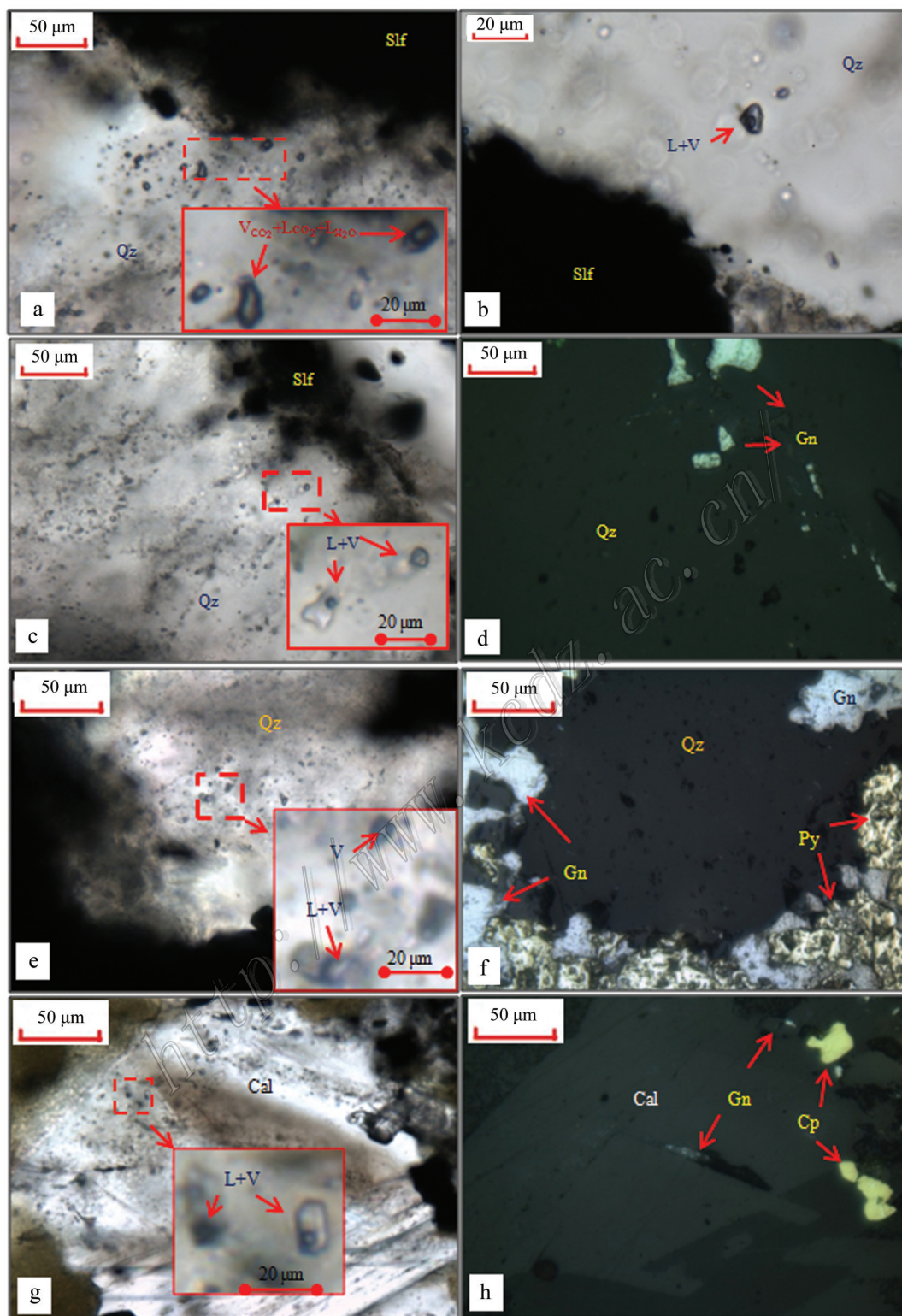


图7 牛头山地区多金属矿石中脉石矿物流体包裹体显微特征

- a. 与粒状黄铁矿共生石英矿物中成群分布的 $H_2O-CO_2$ 三相包裹体; b-f. 与团块状方铅矿、黄铁矿等金属硫化物共生的石英矿物中成群分布的富液包裹体; g-h. 与黄铜矿、方铅矿等金属硫化物共生的方解石矿物内成群分布的富液包裹体  
 Py—黄铁矿; Gn—方铅矿; Cp—黄铜矿; Qz—石英; Cal—方解石; Slf—金属硫化物  
 a、b、c、e、g为单偏光照片; d、f、h为反射光照片



Fig. 7 Photomicrographs of fluid inclusions of the gangue minerals in intergrowth with polymetallic ore in the Niutoushan area  
 a. 3-phase H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> inclusions distributed in groups of quartz in intergrowth with granulated pyrite; b-f. Liquid-rich inclusions distributed in groups of quartz in intergrowth with metal sulfides (galena, pyrite etc.); g-h. Liquid-rich inclusions distributed in groups of calcite intergrowth with metal sulfides (chalcopyrite, galena etc.)

Py—Pyrite; Gn—Galena; Cp—Chalcopyrite; Qz—Quartz. Cal—Calcite; Slf—Metal sulfides

a, b, c, e, g. Plainlight photography; d, f, h. Reflected light photograph

表 1 相山牛头山地区多金属矿石共生脉石矿物流体包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of fluid inclusions in the gangue minerals in intergrowth with polymetallic ore in the Niutoushan area

样品号	寄主矿物	包裹体类型	大小/ $\mu\text{m}$	$t_{\text{CO}_2}$	气相分数或 CO <sub>2</sub> 相比/%	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	成矿期次
26-101-1	石英	II	3~12		5~20	122, 128, 134, 135, 156, 158, 185, 189, 202, 210, 243, 268	5.35~7.59/(12)*	2
	方解石	II	3~6		5~10	159, 165, 168	5.26~5.86/(3)	3
26-101-2	石英	I	4~12	20.2, 20.2, 20.3	40~80	227, 291, 295	5.76~5.93/(3)	1
	石英	II	3~7		5~10	132, 135, 137, 142, 157, 161, 162, 163, 165, 171, 176, 179, 184	6.16~6.14/(9)	2
26-101-3	石英	II	3~6		10~15	131, 132, 136, 137(2), 138, 139, 189	6.59~7.45/(6)	2
26-101-4	石英	II	2~6		5~10	148, 156, 158, 161, 162, 165	6.88~7.02/(5)	2
	方解石	II	3~5		5~10	169(2), 177	5.26~5.71/(2)	3
26-101-6	石英	II	3~15		10~15	172, 177, 179, 202, 239, 244, 251, 253, 281	3.71~8.55/(8)	1, 2
	方解石	II	5~12		5~10	155, 158, 177, 179(2)	5.56~5.71(3)	3
26-101-7	石英	II	3~5		10~15	179(2), 182(2), 183, 187, 207, 209	6.74~7.45(6)	2
26-101-8	石英	II, IV	3~6		10~20	146, 152, 155, 157, 178, 192, 270, 281, 288	7.73~8.55(6)	1, 2
26-101-10	石英	I	4~9	22.4, 22.5	55~70	318, 321	8.10~8.26(2)	1
	石英	II	3~12		10~25	141, 142, 145, 155, 172, 186, 187, 189, 202, 260, 307, 309	4.03~8.55(10)	2

注:“(12)”括号内的数字表示测点数量。

## 5 讨论

测温结果表明,铜铅锌多金属矿石中共生脉石矿物中第 1 期流体包裹体均一温度峰值为 280~300 $^{\circ}\text{C}$ ;第 2 期次均一温度峰值为 120~180 $^{\circ}\text{C}$ ,个别高

于 200 $^{\circ}\text{C}$ ;第 3 期次均一温度峰值为 160~180 $^{\circ}\text{C}$ 。从第 1 期→第 2 期→第 3 期,包裹体均一温度具有缓慢降低的趋势。盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  总体较为稳定,为 3.71%~8.55%,平均值为 6.80%。包裹体中气体成分主要为 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>,第 1 期次流体包裹体中气体成分主要为 CO<sub>2</sub>、部分含有少量的 CH<sub>4</sub>;第 2 期次流体包

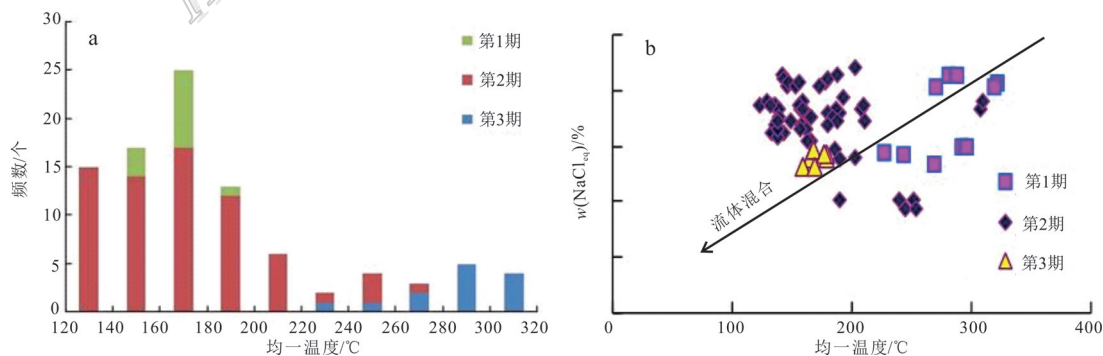


图 8 牛头山地区多金属矿床流体包裹体均一温度直方图(a)和均一温度与盐度关系图(b)

Fig. 8 Histograms of homogenization temperatures (a) and homogenization temperature versus salinity plot (b) of fluid inclusions of polymetallic ore in the Niutoushan area

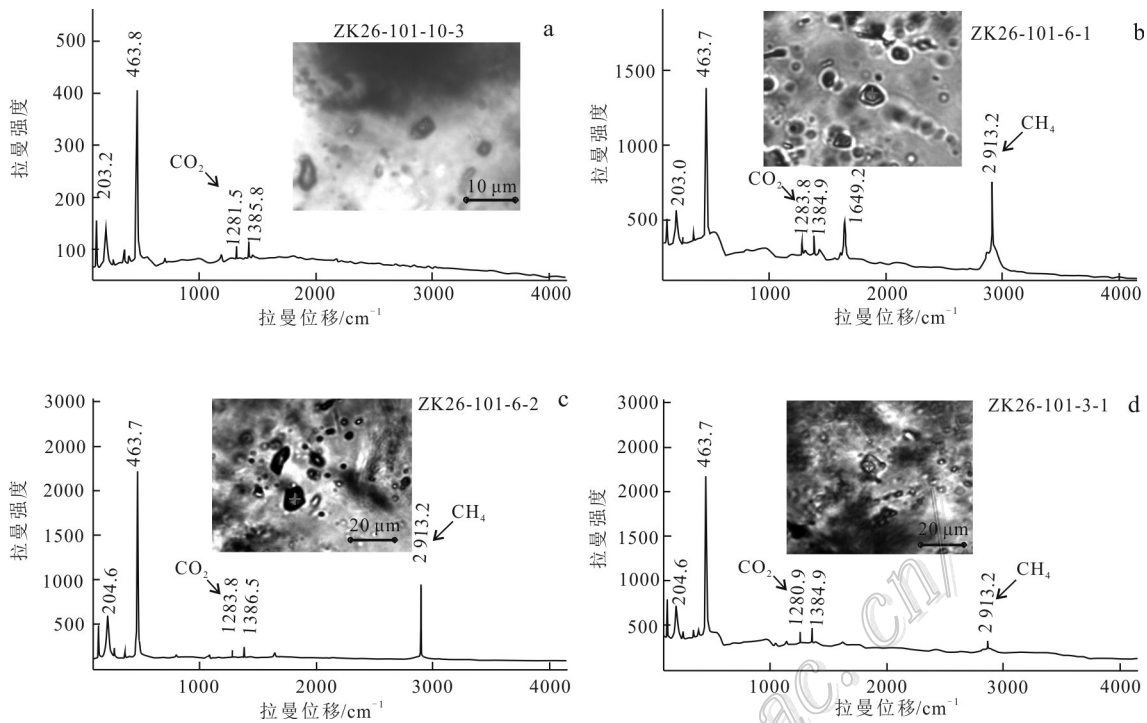


图9 不同成矿阶段矿物中典型流体包裹体拉曼成分

Fig. 9 Typical Raman spectra of composition of fluid inclusions in different metallogenic stages of minerals

裹体中气体成分主要为CH<sub>4</sub>,同时部分含有少量的CO<sub>2</sub>,与相山典型矿床铀矿石流体包裹体挥发分(富H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>)明显不同(邱林飞等,2012),多金属成矿流体具有典型岩浆期后热液流体的特征。

硫同位素在自然过程中具有明显的分馏效应,单个矿物的δ<sup>34</sup>S值不能判断S的来源,但流体总S(ΣS)的δ<sup>34</sup>S<sub>V-CDT</sub>值可以指示成矿流体中的硫来源(Ohmoto, 1986; 韩吟文等, 2003)。相山矿田铀矿床及铜铅锌多金属矿物学的研究表明,含硫矿物均为硫化物,未发现硫酸盐矿物,因此矿床中硫化物的<sup>34</sup>S<sub>V-CDT</sub>平均值与成矿流体的<sup>34</sup>S<sub>V-CDT</sub>基本一致,可代表成矿流体的<sup>34</sup>S<sub>V-CDT</sub>值。由表2所知,铀矿石与铜铅锌多金属硫化物δ<sup>34</sup>S<sub>V-CDT</sub>值有明显的不同,显示相山矿田中铀矿与铜铅锌多金属矿硫可能为不同来源。一般认为地幔初始岩浆δ<sup>34</sup>S变化范围较窄,为-1‰~1‰,接近0;沉积岩和变质岩的硫同位素组成都有很宽广的值,来源受原岩的影响较大,硫源很难为单一的来源,其硫同位素值变化也相对应有宽广的范围。相山矿田中多金属矿硫值十分稳定,仅略高于地幔初始岩浆δ<sup>34</sup>S值,表明其可能来源于深部岩浆房所分异的岩浆期后热液流体,相山矿田内铀矿床中同铀矿伴生的黄铁矿

表2 相山矿田深部多金属矿化及铀多金属矿硫同位素组成  
Table 2 Sulfur isotopic composition of deep polymetallic mineralization and uranium-polymetallic mineralization in Xiangshan ore field

样品号	样品来源	矿石类型	S/‰			资料来源
			Py	Sph	Gn	
26-101-2	牛头山地区	多金属矿	5.0	5.2		本文
26-101-3		多金属矿	4.7	2.3		
26-101-10		多金属矿	4.9	4.6	2.5	
26-101-40		多金属矿	3.9	4.0	1.7	
26-101-43	牛头山地区	多金属矿		3.8		据杨庆坤等, 2015
26-101-46		多金属矿			1.9	
26-101-47		多金属矿			2.6	
CUSD-52		多金属矿	5.6			
CUSD-72	相山科学深钻	多金属矿		3.6	2.6	据王健等, 2016
CUSD-82		多金属矿			2.5	
CUSD-82		多金属矿	4.0			
X16-10-7		富铀矿石	10.6			
X16-10-8	沙洲矿床	富铀矿石	12.3			本文
X16-10-8		富铀矿石	13.6			
SZ09-3		富铀矿石	13.7			
SZ09-6		富铀矿石	13.6			
SZ09-7	沙洲矿床	富铀矿石	14.9			据吴玉, 2013
SZ09-19		富铀矿石	15.2			
SZ09-20		富铀矿石	10.4			

注:Py—黄铁矿;Sph—闪锌矿;Gn—方铅矿。

$\delta^{34}\text{S}$ 值明显高于铜铅锌多金属矿硫化物,说明铀矿石的硫源可能为混合来源,认为是铀在多金属矿形成后,含矿热液流体混入了其他来源的热液流体。

## 6 结 论

(1) 相山矿田深部多金属成矿温度范围为120~300℃,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为3.71%~8.55%,属中低温热液型矿床。气体成分主要为 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ ,第1期次流体包裹体中气体成分主要为 $\text{CO}_2$ 、部分含有少量的 $\text{CH}_4$ ,第2期次流体包裹体中气体成分主要为 $\text{CH}_4$ ,同时部分含有少量的 $\text{CO}_2$ ,具有典型岩浆期后热液流体特征,与研究区铀成矿流体有所不同。相山矿田深部多金属矿硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值反映了硫可能主要来源于深部岩浆房所分异的岩浆期后热液流体。

(2) 相山矿田深部多金属成矿流体早期为深部岩浆来源的富 $\text{CO}_2$ 流体,晚期为深部流体与大气降水混合流体,流体混合引起的温压条件变化可能是造成多金属成矿的重要因素之一。从成矿早阶段到晚阶段,成矿流体从中温低盐度向低温低盐度流体逐渐演化,浅部流体的混入造成的流体物理化学条件的变化可能是Cu、Pb和Zn等成矿元素沉淀的主要机制。

## References

- Chen R Q and Liu P. 2014. Geological characteristics of Xiangshan uranium ore field and prospecting direction of lead, zinc and silver polymetallic ore[J]. *Mineral Deposits*, 33(Supplement): 919-920 (in Chinese with English abstract).
- Du L T. 1988. H-A-C-O-N-S mantle fluid[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 12(1):87-94 (in Chinese with English abstract)
- Du L T. 1996. Geochemical principles of hydrocarbon alkali-fluids(Re-discussion on hydrothermal action and magmatism theory[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-522(in Chinese).
- Fan H H, Ling H F, Wang D Z, Liu C S, Shen W Z and Jiang Y H. 2003. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan uranium ore-field[J]. *Uranium Geology*, 19(4): 208-213(in Chinese with English abstract).
- Han Y W and Ma Z D. 2003. *Geochemical*[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-370(in Chinese).
- Hu B Q, Qiu L F, Li M G, Sun Z X, Lü G X, Zhou Y P and Bai L H. 2015. Tectonic-magmatic evolution and metallogenetic regularity of Xiangshan uranium ore field in Jiangxi Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(4):29-36 (in Chinese with English abstract).
- Hua R M, Chen P R, Zhang W L and Lu J J. 2005. Three major metallogenetic events in Mesozoic in South China[J]. *Mineral Deposits*, 24(2): 99-107(in Chinese with English abstract)
- Jiang Y H, Jiang S Y and Ling H F. 2004. Mantle-derived fluids and uranium mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2):491-430 (in Chinese with English abstract).
- Li Z Y, Huang Z Z and Li X Z. 2006. Study on deep source ore-forming fluids of Xiangshan uranium ore-field[R]. Beijing research institute of uranium geology: 1-326(in Chinese).
- Ma D S. 2008. Metallogenetic characteristics of the important deposits in South China[J]. *Bulletin of mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(3): 209-217(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Guo L C, Yuan S D, Cheng Y B and Chen Y C. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in south China and their metallogenetic settings[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4):510-526(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1986. Mineralogy stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Review of Mineralogy*, 16(1): 491-559
- Qiu K F, Song K R and Song Y H. 2015. Magmatic-hydrothermal fluid evolution of the Wenquan porphyry molybdenum deposit in the North margin of the West Qinling, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3391-3304(in Chinese with English abstract).
- Qiu L F, Ou G X, Zhang M and Zhang J F. 2012. Characteristics and origin of ore-forming fluid of Julong' an uranium deposit, in Xiangshan uranium ore-field[J]. *Mineral Deposits*, 31(2): 271-281 (in Chinese with English abstract)
- Sun Z X, Li X L, Shi W J, Zhou W B and Liu J H. 2001. Isotope geochemistry of oxygen and hydrogen of the Xiangshan uranium ore-field, SE-China[J]. *Geology and Prospecting*, 37(3): 20-24(in Chinese with English abstract).
- Wang J, Nie J T, Guo J, Huang Z Z and Li X Z. 2016. Characteristics of deep poly-metallic mineralization in the Xiangshan uranium ore field of Jiangxi Province[J]. *Geology and Exploration*, 52(1): 47-59(in Chinese with English abstract).
- Wu Z J and Hu Z H. 2014. Uranium-polymetallic metallogenetic geological characteristics and prospecting direction of Niutoushan uranium deposit in Xiangshan ore field[J]. *World Nuclear Geoscience*, 31(2): 89-94(in Chinese with English abstract).
- Wu Y. 2014. Geochemical characteristics of ore-forming fluids and the genesis of Xiangshan uranium ore field (Master's thesis)[D]. Instructor: Pan J Y. Jiangxi: East China Institute of Technology. 54-56.
- Yang Q K, Huang Q T and Sun Q Z. 2015. Geological characteristics of sulfur and lead isotopes in the Xiangshan ore field[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(4): 755-762(in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S. 2000. Metallogenetic system and evolution: From preliminary practice to theoretical consideration[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 333-339 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

Zhang W L and Zou M Q. 2014. Analysis of uranium polymetallic ore-forming conditions in Xiangshan ore field[J]. Uranium Geology, 30(3): 172-179(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

陈荣清, 刘鹏. 2014. 相山铀矿田地质特征及铅锌银多金属矿找矿方向[J]. 矿床地质, 33(增刊):919-920.

杜乐天. 1988. 幔汁——HACONS 流体[J]. 大地构造与成矿学, 12(1): 87-94.

杜乐天. 1996. 烃碱流体地球化学原理—重论热液作用与岩浆作用[M]. 北京: 地质出版社, 1-522.

范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 姜耀辉. 2003. 相山铀矿田成矿机理研究[J]. 铀矿地质, 19(4): 208-213.

韩吟文, 马振东. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 240-271.

胡宝群, 邱林飞, 李满根, 孙占学, 吕古贤, 周义朋, 白丽红. 2015. 江西相山铀矿田构造-岩浆演化及其成矿规律[J]. 地学前缘, 22(4): 29-36.

华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用[J]. 矿床地质, 24(2): 99-107.

姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞. 2004. 地幔流体与铀成矿作用[J]. 地学前缘, 11(2):491-430.

李子颖, 黄志章, 李秀珍. 2006. 相山矿田铀深源成矿流体研究[R]. 核

工业北京地质研究院, 1-326.

马东升. 2008. 华南重要金属矿床的成矿规律-时代爆发性“空间分带性”基底继承性和热隆起成矿[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(3): 209-217

毛景文, 谢桂青, 郭丽春, 元顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 14(4):510-526.

邱昆峰, 宋开瑞, 宋耀辉. 2015. 西秦岭温泉斑岩钼矿床岩浆-热液演化[J]. 岩石学报, 31(11):3391-3404.

邱林飞, 欧光义, 张敏, 张建锋. 2012. 相山居隆庵矿床铀成矿流体特征及其来源探讨[J]. 矿床地质, 31(2): 271-281.

孙占学, 李学礼, 史维浚, 周文斌, 刘金辉. 2001. 华东南相山铀矿田的氢氧同位素地球化学研究[J]. 地质与勘探, 37(3): 20-24.

王健, 聂江涛, 郭建, 黄志章, 李秀珍. 2016. 江西相山矿田深部多金属矿化特征[J]. 地质与勘探, 52(1):47-59.

吴志坚, 胡志华. 2014. 相山矿田牛头山铀矿床铀-多金属成矿地质特征及找矿方向[J]. 世界核地质科学, 31(2): 89-94.

吴玉. 2014. 相山铀矿田成矿流体地球化学特征及矿床成因探讨(硕士论文)[D]. 导师:潘家永. 江西: 东华理工大学. 54-56页.

杨庆坤, 黄强太, 孙清钟. 2015. 江西相山矿田硫铅同位素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(4):755-762.

翟裕生. 2000. 成矿系统及其演化——初步实践到理论思考[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 25(4):333-339.

张万良, 邹茂卿. 2014. 相山矿田铀多金属成矿条件分析[J]. 铀矿地质, 30(3): 172-179.

http://www.kcgg.com