

江西相山矿田“充填+交代”铀成矿热液演化过程

张万良¹, 郭福生², 魏欣¹, 李余亮¹

(1. 核工业二七〇研究所, 中国地质学会华东放射性矿产勘查技术创新基地, 江西 南昌 330200; 2. 东华理工大学, 江西 南昌 330013)

摘要: 江西相山矿田是我国具有代表性的热液型铀矿田。刻画相山矿田铀成矿热液过程, 探讨形成机理, 对促进热液矿床成矿理论创新和突破, 推动矿床学发展, 具有重要意义, 但是, 由于缺乏对成矿期次和成矿动力学机制的深刻认识, 相山矿田成矿热液演化过程一直是研究的薄弱环节。本文通过对已有矿石分析数据再开发、野外和镜下现象重新观察, 以水力压裂铀成矿作用为主线, 对相山矿田热液演化过程进行了探讨。研究表明, 相山矿田主要热液铀矿脉由充填型矿化和交代型矿化组成。充填型矿化品位高, 规模较小, K_2O 含量为 0.88%~7.03% (平均 1.03%), Na_2O 含量为 0.12%~1.09% (平均 0.35%), 伴生组分复杂, 磷灰石颗粒细小, 成矿速度较快; 交代型矿化品位较低, 分布广泛, K_2O 含量为 0.09%~4.50% (平均 1.15%), Na_2O 含量为 1.91%~10.01% (平均 6.07%), 伴生组分少, 磷灰石结晶良好, 成矿速度缓慢。铀成矿从充填型矿化开始, 交代型矿化结束, 铀成矿温度变化不大, 成矿压力和氧化还原电位逐渐升高, 成矿热液向碱度升高方向演化。

关键词: 充填型铀矿化; 交代型铀矿化; 形成时期; 演化过程; 相山铀矿田

中图分类号: P619.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)04-0855-15

The uranium mineralization hydrothermal evolution process of “filling to metasomatism” in Xiangshan ore field, Jiangxi Province

ZHANG Wan-liang¹, GUO Fu-sheng², WEI Xin¹ and LI Yu-liang¹

(1. No. 270 Research Institute of Nuclear Industry, Innovation Base for Radionetric Mineral Exploration Technology of East China Geological Society of China, Nanchang 330200, China; 2. East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Xiangshan ore field in Jiangxi Province is a representative hydrothermal uranium ore field in China. Describing the evolution of uranium metallogenic hydrothermal fluid in Xiangshan ore field and exploring its formation mechanism is of great significance for promoting innovation and breakthroughs in the theory of hydrothermal ore deposit mineralization, and advancing the development of ore deposit studies. However, due to the lack of deep understanding of the mineralization stage and mineralization dynamics mechanism, the evolution of uranium metallogenic hydrothermal fluid in Xiangshan ore field has been a weak link in the study. This paper discusses the hydrothermal process from filling mineralization to metasomatism mineralization in Xiangshan ore field by redeveloping existing ore analysis data and re-observing the macro and micro phenomena, with hydraulic fracturing uranium mineralization as the main focus. The study shows that the main hydrothermal uranium veins in Xiangshan ore field are composed of filling type mineralization and metasomatism type mineralization. Filling type mineralization has high grade and small

收稿日期: 2024-11-07; 接受日期: 2025-02-19; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(42472130); 中国核工业地质局地勘费项目(2022-29); 江西省技术创新引导类计划(20212AEI91008)

作者简介: 张万良(1962-), 男, 正高级工程师, 铀矿地质专业, E-mail: ZWL270@163.com; 通讯作者: 郭福生(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 地质学专业, E-mail: 24173404@qq.com。

scale, with K_2O content of 0.88% ~ 7.03% (average 4.03%) and Na_2O content of 0.12% ~ 1.09% (average 0.35%), complex associated components, small apatite particles, and fast mineralization rate. Metamorphic type mineralization is low grade and widely distributed, with K_2O content of 0.09% ~ 4.50% (average 1.15%), Na_2O content of 1.91% ~ 10.01% (average 6.07%), few associated components, good crystallization of apatite, and slow mineralization rate. Uranium mineralization begins with filling type mineralization and ends with metasomatism type mineralization. The temperature of uranium mineralization does not change much, and the ore-forming pressure and redox potential show a gradual increase process. The ore-forming hydrothermal fluid evolves towards an increase in alkalinity.

Key words: filling type uranium mineralization; metasomatism type mineralization; formation of time sequence; evolution process; Xiangshan uranium ore field

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42472130); China Nuclear Geology Bureau Geological Exploration Fund Project (2022-29); Jiangxi Province Technological Innovation Guidance Program (2021AEI91008)

1957年8月6日,江西省抚州市乐安县公溪镇横涧村附近的一个小山头,发现903号航空伽玛异常,从此揭开了相山地区60余年的铀矿普查及勘探开发序幕。普查找矿前赴后继,铀资源储量不断扩大,铀矿地质科研工作者在总结成矿规律、探索矿床成因方面开展了大量工作。20世纪60年代,杜乐天提出岩浆期后热水上升、浸取花岗质岩石中的铀,铀形成成矿热液的铀成矿观点;陈肇博(1985)提出双混成因模式,认为铀成矿是深部岩浆原生流体和大气降水混合、深部成矿物质和浅部围岩成矿物质混合的结果;范海等(2001)通过邹家山和沙洲矿床及其赋矿围岩(碎斑熔岩和花岗斑岩)的Nb、Sr、Pb同位素研究表明,相山矿田成矿物质主要来自富铀的火山侵入杂岩本身;孙占学(2004)根据矿石中U、Th、Mo、P分布特征进一步佐证了铀等来源于围岩本身的观点;刘龙等(2021)研究认为,相山北部花岗斑岩绿泥石化作用为铀成矿创造了良好的铀源条件。矿床成因研究的积累为新的成矿理论创建奠定了坚实基础。

近年来,笔者在邹家山矿床探采资料对比分析过程中,发现开采后呈现的矿体形态与原地勘圈连的矿体形态明显不同,实际矿体形态复杂,产状多变,以陡产状矿体为主,也有缓(或近水平)产状的矿体,矿脉脉壁没有擦痕、阶步等断层作用标志,矿化与隐爆岩脉(筒)关系密切,控矿构造没有应力致裂构造的痕迹,但有流体致裂构造的迹象,因而提出水力压裂铀成矿作用的概念,即铀成矿是因为岩浆活动晚期,流体聚集、超压、水力压裂(热液隐爆)而引起的,铀来源于火山侵入杂岩本身,铀的搬运主要是以铀酰络合物形式沿水力压裂裂隙进行,铀的沉淀

是隐爆发生后的降压作用引起的,主要成矿作用方式是充填和交代(张万良等, 2017: 221)。

相山矿田是热液脉型铀矿的代表性矿田,刻画铀成矿热液过程,探讨形成机理,促进热液矿床成矿理论创新和突破,推动矿床学发展,对实施相山地区公共矿区的找矿突破战略行动,具有重要意义。但是,由于缺乏对成矿期次和成矿动力学机制的深刻认识,相山矿田成矿热液演化过程一直是研究的薄弱环节。本文根据前人资料的再研究、野外和镜下现象的重新观察,以水力压裂铀成矿机制为主线,重塑了相山矿田从充填成矿到交代成矿的热液演化过程。

1 成矿地质背景

相山矿田在大地构造位置上位于华南褶皱带的北缘,萍乡-广丰大断裂从其北侧通过,在铀成矿区划上,位于华南铀矿省赣杭构造火山岩铀成矿带西端,早白垩世火山-侵入岩浆活动强烈(郭福生等, 2017),形成了较大面积分布的火山碎屑岩、碎斑熔岩、流纹英安斑岩、斑状花岗岩(花岗斑岩)以及零星分布的英安斑岩、煌斑岩等火山岩和侵入岩组合,构成相山火山侵入杂岩体,分布面积约318 km²(图1)。相山地区岩浆活动之后,产生了较大规模的流体聚集,甚至超压隐爆和水力压裂,水力压裂构造广泛分布,相山地区具有独特的铀矿化形成的地质背景(郭福生等, 2017; 张万良等, 2021)。

相山矿田发现近30个热液铀矿床,矿床主要分布在矿田西部和北部,东部或东南部虽发现一些矿(化)点,但均未能发展成铀矿床。相山火山侵入杂

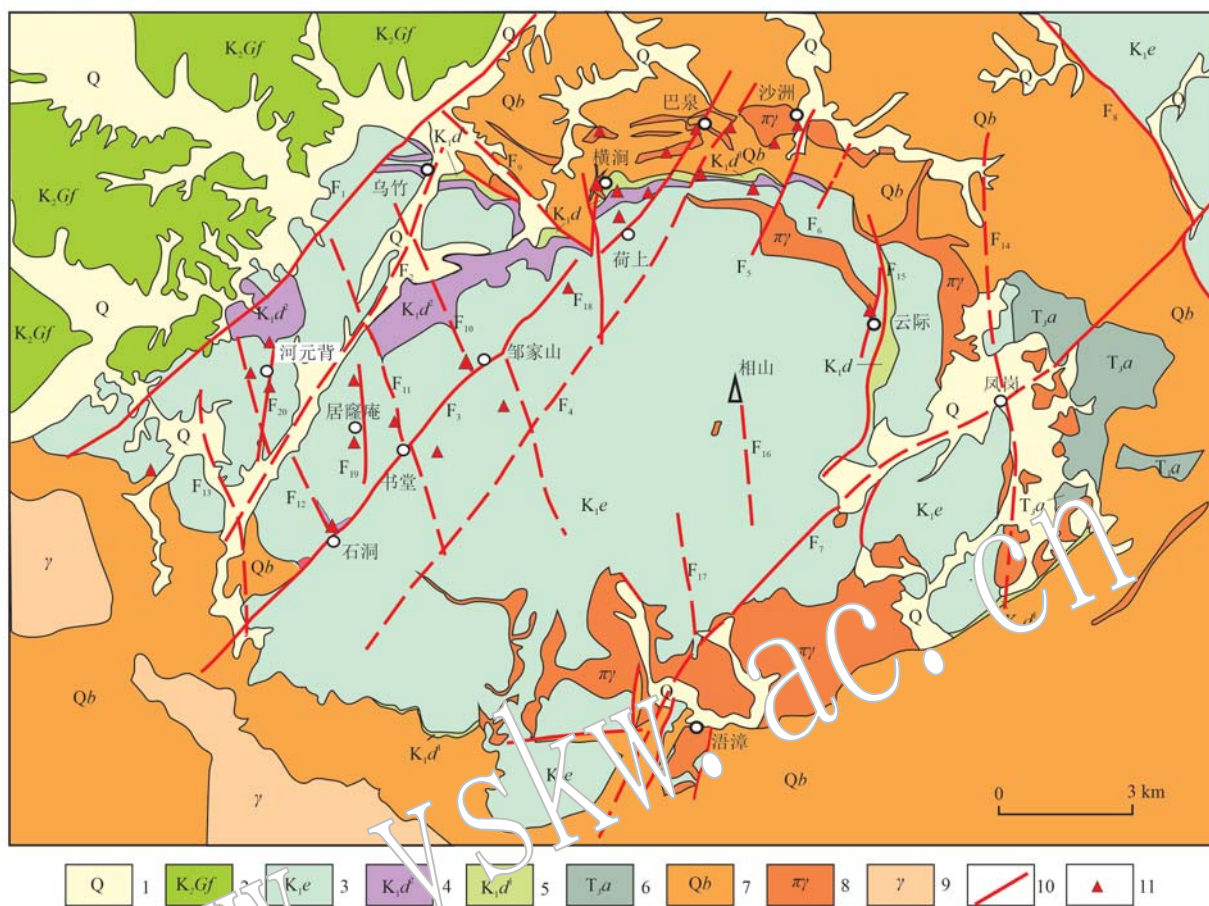


图1 相山矿田地质图(据张万良等, 2021)

Fig. 1 Geological map of the Xiangshan ore field(Zhang Wanliang *et al.*, 2021)

1—第四系黏土、砾石; 2—上白垩统龟峰群紫红色砂岩、砂质砾岩; 3—下白垩统鹅湖岭组碎斑熔岩; 4—下白垩统流纹英安斑岩; 5—下白垩统打鼓顶组火山碎屑岩; 6—上三叠统石英砂岩、页岩; 7—青白口系片岩、千枚岩; 8—斑状花岗岩(花岗斑岩); 9—加里东期花岗岩; 10—断层; 11—铀矿床

1—Quaternary clay and gravel; 2—purplish-red sandstone and sandy conglomerate of the Upper Cretaceous Guifeng Group; 3—porphyroclastic lava of the Lower Cretaceous Ehuling Formation; 4—Lower Cretaceous rhyolite porphyry; 5—volcanic clastic rocks of the Lower Cretaceous Daguding Formation; 6—Upper Triassic quartz sandstone and shale; 7—Qingbaikou schist and phyllite; 8—porphyritic granite (granite porphyry); 9—Caledonian granite; 10—fault; 11—uranium deposit

岩形成时代为早白垩世早期, 铀矿化发生在早白垩世晚期—古近纪, 矿岩时差明显。铀矿化对岩性选择性不大, 矿体围岩主要有碎斑熔岩、流纹英安斑岩、斑状花岗岩(花岗斑岩)和基底变质岩如黑云母石英片岩等。

2 矿化类型

矿化类型是矿床成因研究的重要内容。矿床类型一般按成因或成矿作用不同划分为内生矿床、外生矿床和变质矿床, 热液矿床是内生矿床的一种重要类型。热液铀矿床按含矿主岩不同, 通常划分为

火山岩型、斑岩型、花岗岩型、碳硅泥岩型、砂岩型等。相山矿田属火山岩型, 张万良等(2021)将其归斑岩型。矿床由矿体所组成, 矿体类型主要根据矿体外形不同进行划分, 如等轴状矿体、柱状(筒状)矿体、板状、脉状矿体等, 相山矿田矿体主要呈脉状, 个别筒状。而矿化(或矿石)类型的划分依据则较复杂, 有的根据矿石的矿石矿物和热液矿物组成特点进行划分(李丽荣等, 2021), 有的根据共、伴生元素组成不同进行划分(张振强, 2001), 有的根据成矿热液性质不同进行划分(林锦荣等, 2019), 有的根据成矿作用方式不同进行划分。一个矿床通常包含一种或多种形态的矿体, 一个矿体通常也包含一种

或多种矿化或矿石类型。

根据矿石矿物和热液矿物组成的不同,陈肇博(1985)将相山矿田铀矿(石)划分为萤石-水云母型和钠交代型。中国核工业地质局《华东铀矿地质志》编纂委员会(2005)将钠交代型分为U-赤铁矿型和U-绿泥石型,将萤石-水云母型分为U-萤石型和U-硫化物型,每个矿床都存在不止一种矿石类型,但都存在U-赤铁矿型。由于依据矿石矿物与热液矿物组合的划分方案边界不清,一种矿石中往往多种热液矿物同时存在,特征矿物的选择又因人而异,矿物的识别和含量的估算也不是一件容易完成的事情,因而该划分方案难以在地勘单位推广应用。林锦荣等(2019)根据成矿热液性质,将矿化类型划分为碱性铀矿化和酸性铀矿化,U-赤铁矿型、U-绿泥石型归碱性铀矿化,U-萤石型、U-硫化物型归酸性铀矿化。虽然U-绿泥石型包括U-方解石型可归于碱性铀矿化,但在U-萤石型、U-黄铁矿型矿石中经常有绿泥石

或方解石伴生,绿泥石或方解石在酸性环境中也有生成的可能。张万良等(2021)按成矿作用方式不同,将矿化类型划分为充填型铀矿化和交代型铀矿化,U-萤石型、U-黄铁矿型属充填型铀矿化,U-赤铁矿型、U-绿泥石型为交代型铀矿化(即钠交代型铀矿化)。

充填和交代是热液成矿作用的两种基本方式。相山矿田是热液脉型铀矿田,矿体是热液充填和交代作用的产物。邹家山露天采场和钻孔矿心深入观察发现,相山矿田铀矿脉实际上由两种矿化类型组成,即充填型矿化和交代型矿化,充填型矿化形成充填型矿石,呈黑色或深灰色(图2a和图2b矿脉的中间部分A);交代型矿化形成交代型矿石,多呈红色(图2a和图2b深色矿脉两侧的红色部分B)。仅云际矿床较特殊,交代型矿化规模大,U-萤石脉(富矿)规模小,分布局限,在以往研究中常被忽略,故云际矿床常被认为是交代成矿的典型矿床。

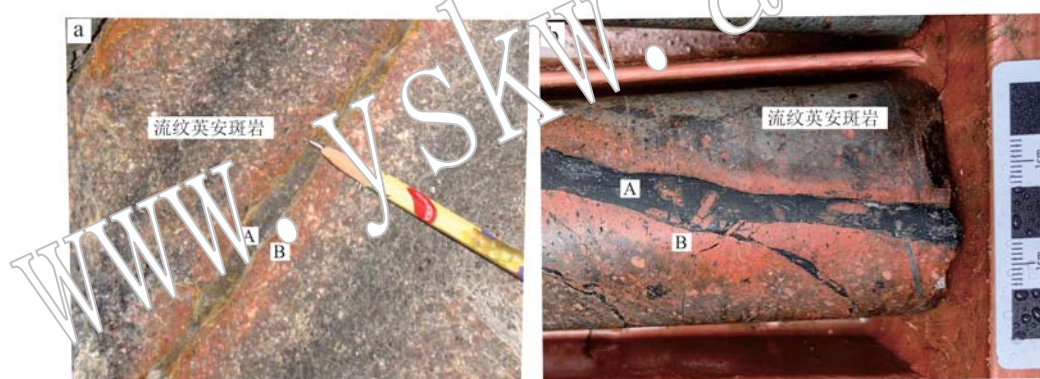


图2 相山矿田典型矿脉照片

Fig. 2 Typical ore vein photo of Xiangshan ore field

a—矿脉围岩为流纹英安斑岩,邹家山矿床-130 m中段采场;b—矿脉围岩为流纹英安斑岩,相山北部ZK71-3孔岩心;A—充填型矿石;B—交代型矿石

a—the surrounding rock of the ore vein is rhyolite andesite, the middle section at -130 meters depth of the Zoujiashan deposit; b—the surrounding rock of the ore vein is rhyolite andesite, ZK71-3 core in the northern part of Xiangshan; A—filling type ore; B—metasomatic type ore

野外和镜下深入观察发现,充填型矿石是由热液矿物或热液矿物+围岩碎屑(角砾)组成的,是流体(或碎屑流)充填作用的产物,有的矿石呈碎屑结构,流动构造(图3a)。热液矿物包括萤石、水云母、绿泥石、方解石、金属硫化物等(图3b、3c、3d),矿石多呈黑色、深灰色,只有当热液矿物全为方解石时,呈粉红色。交代型矿石是热液交代围岩的产物,矿石呈交代残余或假晶结构(图3e、3f),热液蚀变(赤铁矿化、钠长石化、方解石化、绿泥石等)由裂隙中心向两侧(向外)逐渐减弱,对于单个矿物颗粒来说,红化

(粉末状赤铁矿)从矿物颗粒边缘向中心逐渐减弱,矿石的突出特点是颜色较鲜艳,呈浅红色、紫红色。

3 矿化形成时序

相山矿田充填成矿和交代成矿的形成时序,以往的解释是两期成矿,早碱晚酸:早期,先裂开,后含铀偏碱性热液沿裂隙向两侧交代,形成低品位铀矿化(交代型矿石);晚期,再裂开,含铀偏酸性热液充填,形成高品位铀矿化(充填型矿石)(中国核工业

地质局《华东铀矿地质志》编纂委员会, 2005)。但这种解释难圆其说, 裂开或裂隙的形成与成矿如何关联? 为什么会裂开? 为什么是两次裂开? 为什么有流体活动? 为什么早期形成的是碱性铀矿化(贫矿), 晚期形成的是酸性铀矿化(富矿)? 二者是演变关系还是相互独立的成矿事件? 都没有给予解释或说明。

更重要的是, 这种解释的地质依据与实际不相符(图3), 大多数矿床矿脉, 充填成矿与交代成矿相伴产出, 界线分明, 充填型矿化位于矿脉的中心位置, 交代型矿化在充填型矿化两侧呈对称分布, 即充

填型矿化的展布决定着交代型矿化的展布, 充填型矿化的形成引领着交代型矿化的发育, 而不是相反。充填型矿石中的红色碎屑(角砾)不是早期已形成的交代型矿石碎屑(角砾), 而是在充填型矿化形成过程中, 成矿热液在对两侧围岩进行交代蚀变(红化)的同时, 也对其中的围岩碎屑(角砾)进行交代蚀变和红化作用而产生的结果。从红色角砾或碎屑的形态看(图3b), 看不出形成时有任何碾压、错动的迹象, 不具动力构造角砾的特征, 因此认为交代型矿化是充填型矿化的延续, 即先有充填成矿, 后有交代成矿。

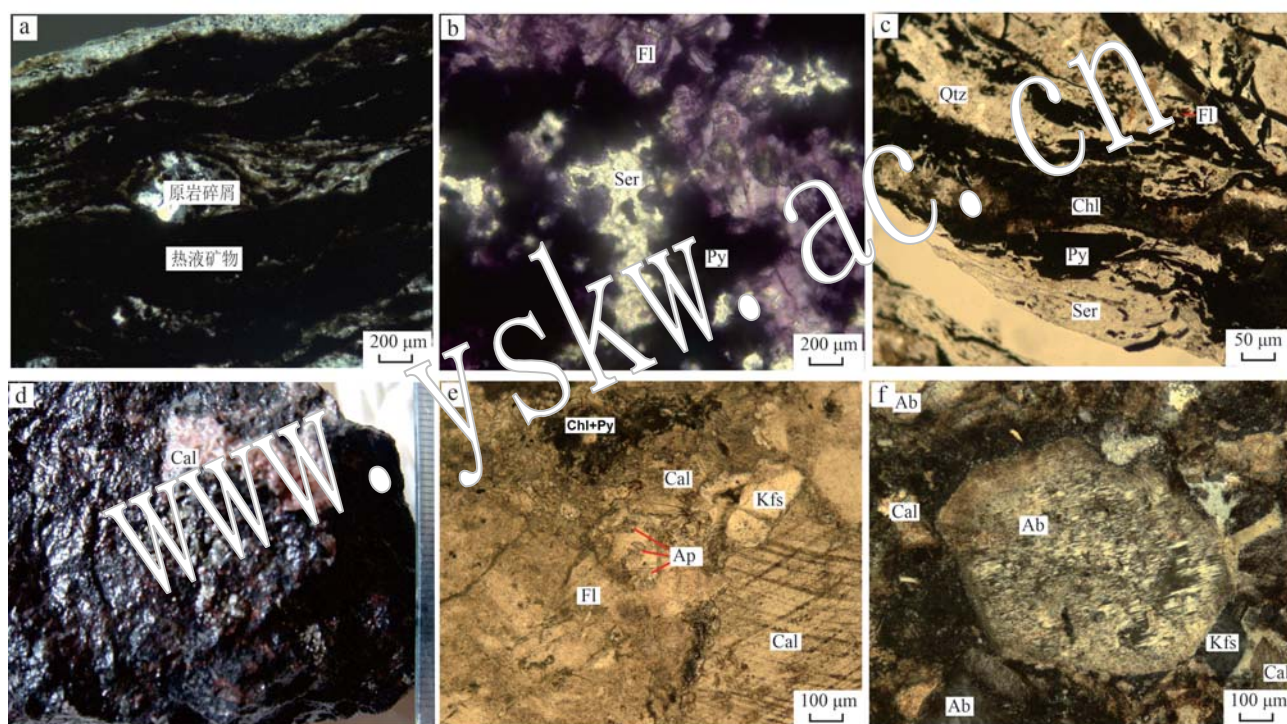


图3 矿石照片

Fig. 3 Ore photos

a—充填型矿石, 由热液矿物(萤石、水云母等)和原岩碎屑(角砾)组成, 具流动构造, U 含量为 2.220%, 样号 13ZJS-1, 邹家山矿床(+); b—充填型矿石, 萤石-水云母-黄铁矿共生, U 含量为 2.740%, 样号 R-44, 邹家山矿床(+); c—充填型矿石, 绿泥石-水云母-黄铁矿-萤石共生, U 含量为 0.982%, 样号 13HYB-3, 河元背 8 号带矿床(-); d—充填型矿石富矿石手标本, 见方解石团块, U 含量为 14.850%, 样号 R-20, 沙州矿床; e—交代型矿石, 方解石-磷灰石-萤石-绿泥石-黄铁矿共生, U 含量为 0.704%, 样号 13YJ-1, 云际矿床(-); f—交代型矿石的交代残余结构, 由热液矿物(Ab+Cal)和残余造岩矿物(Kfs)组成, 样号 13YJ-1, 云际矿床(+); Qtz—石英; Kfs—钾长石; Ab—钠长石;

Chl—绿泥石; Fl—萤石; Ser—水云母; Cal—方解石; Py—黄铁矿

a—filling type ore, composed of hydrothermal minerals (fluorite, hydromica, etc.) and original rock debris (breccia), with flowing structure, U content of 2.220%, sample number 13ZJS-1, Zoujiashan deposit (+); b—filling type ore, fluorite muscovite pyrite symbiotic, U content of 2.740%, sample number R-44, Zoujiashan deposit (+); c—filling type ore, coexisting with chlorite, hydromica, pyrite and fluorite, with a U content of 0.982%, sample number 13HYB-3, Heyuanbei 8 belt deposit (-); d—hand specimen of filling type ore rich ore, with calcite blocks, U content of 14.850%, sample number R-20, Shazhou deposit; e—metasomatic type ore, coexisting with calcite, apatite, fluorite, chlorite and pyrite, U content of 0.704%, sample number 13YJ-1, Yunji deposit (-); f—residual structure of metasomatism type ore, composed of hydrothermal minerals (Ab+Cal) and residual rock forming minerals (Kfs), sample number 13YJ-1, Yunji deposit (+); Qtz—quartz; Kfs—K-feldspar; Ab—albite;

Chl—chlorite; Fl—fluorite; Ser—sericite; Cal—calcite; Py—pyrite

长期以来,地质科研工作者针对相山铀成矿年龄做了大量研究工作(陈繁荣等,1990;孟艳宁,2012;李子颖等,2014;林锦荣等,2019; Bonnetti *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2023)。陈繁荣等(1990)将沥青铀矿的 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 等时线年龄作为成矿年龄,碱交代铀成矿年龄为 $115.2\pm0.5\text{ Ma}$,萤石-水云母型(充填型)铀成矿年龄为 $97.6\pm7.6\text{ Ma}$ 。由于沥青铀矿本身的组成和结构限制,传统溶样法难以精确测定其U-Pb同位素组成(骆金诚等,2019),沥青铀矿U-Pb年龄可信度受到一定限制,沥青铀矿U-Pb等时线年龄被赋予不同成矿期的地质含义,也值得商榷。张万良(2012)曾收集19个已发表的成矿年龄数据,发现已发表的成矿年龄数据较分散,难以对成矿期次进行划分,故提出一期成矿的认识。但相山矿田是一期成矿或多期成矿,目前仍有不同的见解。

充填成矿和交代成矿可能都不是一个时间点成矿,有一个过程,特别是交代成矿,速度较慢,可能有一个较长的过程,具体的成矿时长、成矿开始的时间和成矿结束的时间,目前尚没有好的办法限定,主要原因是,难以取到成矿开始时间点和成矿结束时间点的测年矿物样品,因为取样(选矿)时,难以辨别所选测年矿物到底是开始成矿时形成的,还是成矿结束时形成的,抑或是成矿期之内某个时间点形成的。

李子颖等(2014)测得与铀矿化伴生的钠长石中流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为90 Ma,并认为与华南花岗岩型铀矿的主成矿期近一致,该年龄可能是交代型铀矿化形成时的某个时间点的成矿年龄。林锦荣等(2019)的锆石裂变径迹研究表明,78.6~66.4 Ma期间仍然存在成矿热事件,故交代型铀矿化结束时的年龄值可能小于90 Ma。孟艳宁(2013)采用LA-ICP-MS法测定的铀钍矿化伴生的磷灰石形成年龄为97.5 Ma,代表了充填型矿化形成时的某个时间点的成矿年龄,显示充填型矿化开始形成时的年龄值可能还要大。

本文对成矿年龄的参考使用持谨慎态度。充填成矿与交代成矿的先后关系的主要依据是野外观察到的充填型矿化(黑矿)与交代型矿化(红矿)的伴生关系,即红矿(红化)围绕着脉状、枝状黑矿矿脉两侧对称发育,热液脉体及其两侧的交代蚀变是一个整体,有较高温度的热液流体在充填过程中必然会对两侧围岩进行交代,充填和交代是一个连续的过程,把它们割裂开来作两期对待是不合理的。因此,

我们归纳的相山矿田铀成矿过程是:流体超压→水力压裂(隐爆)→流体活化→萃取矿质→流体充填并向裂隙两侧渗滤交代成矿,最终形成相山矿田的“充填+交代”成矿形成的复合铀矿脉。成矿从充填型矿化开始,交代型矿化结束,只有一期成矿,成矿一气呵成。

4 充填成矿与交代成矿的比较

充填成矿形成的充填型矿石是相山矿田的富矿类型,矿脉宽数毫米到数十厘米,局部达数米,有时呈微脉产出,有时见红矿角砾或碎屑,总体规模较小。交代型铀矿化是相山矿田的主要矿化类型之一,分布广泛,规模较大,品位较低,在矿田东部和西部,在浅部和深部均有发育。

充填型矿石,除围岩碎屑或角砾外,主要由热液矿物组成,热液矿物磷灰石结晶程度较差(图4a),粒度 $0.001\sim0.01\text{ mm}$,反映了结晶速度相对较快的演化过程;交代型矿石的热液矿物磷灰岩结晶良好,呈自形-半自形柱状(图4b),粒径 $0.01\sim0.6\text{ mm}$,与充填型矿石相比,磷灰石结晶时间较长,反映了一种较缓慢(与充填型矿化相比而言)的热液演化过程。

为了进一步对比分析充填型矿石和交代型矿石特征,探索“充填+交代”铀矿脉的形成机制,本文收集了不同矿石样品的分析资料,两类矿石主要化学成分和参数见表1。

充填型矿石品位高,U含量 $0.674\%\sim14.85\%$,大多数矿石U含量大于1%,平均U含量 3.694% ,往往形成富矿脉。交代型矿石品位较低,至今未发现 $\text{U}>1\%$ 的矿石,U平均品位 0.241% 。充填型矿石U平均品位是交代型矿石的15.3倍。

SiO_2 在充填型矿石和交代型矿石中含量变化范围均较大,充填型矿石 SiO_2 含量 $6.67\%\sim57.66\%$,交代型矿石 $38.60\%\sim71.51\%$,交代型矿石 SiO_2 平均值(57.63%)明显高于充填型矿石(35.49%)。两种类型矿石的 SiO_2 平均含量均低于围岩 SiO_2 平均含量,碎斑熔岩 SiO_2 平均含量 74.82% ,流纹英安斑岩 68.30% ,斑状花岗岩(花岗斑岩) 71.22% (张万良等,2021)。

CaO也是两类矿石中主要化学组分,与交代型矿石相比,充填型矿石中的CaO含量变化范围较大,表明方解石化发育不均匀,且充填型矿石CaO平均

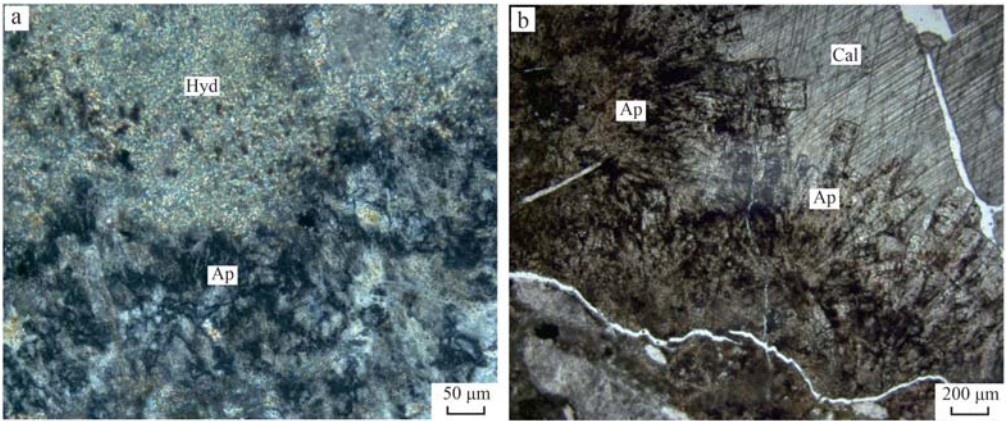


图 4 充填型矿石(a)和交代型矿石(b)磷灰石结晶程度对比(正交偏光)

Fig. 4 Comparison of apatite crystallization degree between filling type ore (a) and metasomatic type ore (b) (crossed nicols)
a—磷灰石结晶程度差,沙州矿床; b—磷灰石呈自形半自形,颗粒较大,云际矿床; Ap—磷灰石; Cal—方解石; Hyd—水云母
a—poor crystallinity of apatite, Shazhou deposit; b—selfshaped and semiself shaped apatite, with larger particles, Yunji deposit; Ap—apatite;
Cal—calcite; Hyd—hydromica

表 1 充填型矿石和交代型矿石的主要化学成分(参数)对比表

Table 1 Comparison of main chemical components (parameters) of filling type ore and metasomatism type ore

矿石类型(样数)	充填型矿石(18)	交代型矿石(34)	资料来源
$w(\text{U})/10^{-2}$	0.67~4.85, 平均 3.64	0.050~0.760, 平均 0.241	张万良等 (2021)
$w(\text{SiO}_2)/10^{-2}$	6.67~77.66, 平均 35.49	38.60~71.51, 平均 57.63	
$w(\text{CaO})/10^{-2}$	0.99~41.12, 平均 14.23	1.71~22.79, 平均 6.98	
$w(\text{K}_2\text{O})/10^{-2}$	0.88~7.03, 平均 4.03	0.09~4.50, 平均 1.15	
$w(\text{Na}_2\text{O})/10^{-2}$	0.12~1.09, 平均 0.35	1.91~10.01, 平均 6.07	
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/10^{-2}$	0.30~7.59, 平均 2.47	0.14~12.59, 平均 2.48	
$w(\text{REE})/10^{-6}$	314.01~9389.60, 平均 1917.82	169.06~629.12, 平均 340.81	
LREE/HREE	1.382~0.125, 平均 0.33	2.672~1.200, 平均 1.83	
伴生元素	Th、Mo、HREE、W、Hf、Sb、Cu、Pb、Zn、Zr 等	Sr、Zr、Hf、Sc、W 等	李子颖等 (2014)
pH	7.91~8.68	8.57~9.41	
盐度/%	15.1 (方解石)	7.2~8.5 (方解石)	
成矿温度/°C	120~428		
成矿压力/MPa	5~60		

含量(14.23%)高于交代型矿石(6.98%)。

K_2O 在充填型矿石中的变化范围和平均含量均要高于交代型矿石,充填型矿石 K_2O 含量为 0.88%~7.03%,平均 4.03%,交代型矿石 K_2O 含量为 0.09%~4.50%,平均 1.15%;而 Na_2O 在交代型矿石中的变化范围和平均含量均要高于充填型矿石,交代型矿石 Na_2O 含量为 1.91%~10.01%,平均 6.07%,充填型矿石 Na_2O 含量为 0.12%~1.09%,平均 0.35%。

P_2O_5 在两种类型矿石中的平均含量非常接近,

充填型矿石平均 2.47%,交代型矿石平均 2.48%,矿石围岩中的 P_2O_5 含量小于 0.27%,充填型矿石 U- P_2O_5 相关系数 0.682(样数=18),交代型矿石 U- P_2O_5 相关系数 0.601(样数=34)(张万良等,2021)。

REE 在充填型矿石中含量明显高于交代型矿石,充填型矿石 REE 变化范围 $314.01 \times 10^{-6} \sim 9389.60 \times 10^{-6}$,交代型矿石变化范围 $169.06 \times 10^{-6} \sim 629.12 \times 10^{-6}$,充填型矿石平均值(1917.82×10^{-6})是交代型矿石平均值(340.81×10^{-6})的 5.6 倍,这点与 U 含量

变化趋势相似,反映 REE 与 U 的密切共生关系。充填型矿石 LREE/HREE = 0.33,交代型矿石 LREE/HREE = 1.83,显示铀成矿过程也是稀土元素特别是重稀土元素的富集过程。

充填型矿化和交代型矿化,相当于陈肇博(1985)划分的萤石-水云母型和钠交代型,这两种矿化的成矿流体的参数不相同,萤石-水云母型矿化成矿流体 pH = 7.91~8.68,盐度 [$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$,下同] = 15.1%(方解石),钠交代型 pH = 8.57~9.41,盐度 = 7.2%~8.5%(方解石),虽然两种成矿热液的 pH 值均大于 7,但至少反映充填成矿的热液酸度大于交代成矿时的热液酸度。

5 “早碱晚酸”还是“早酸晚碱”?

相山矿田铀成矿热液的演化过程,是“早碱晚酸”还是“早酸晚碱”?从检索到的相关文献(中国核工业地质局《华东铀矿地质志》编纂委员会 2005;杜乐天等,2009;李子颖等,2014;林锦荣等,2019)看,不少铀矿地质学家持“早碱晚酸”观点,本文不评论“早碱晚酸”观点,仅对相山矿田存在的“早酸晚碱”的热液过程的事实依据进行阐述。

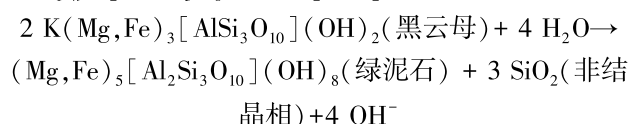
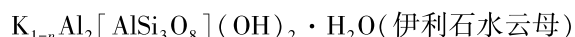
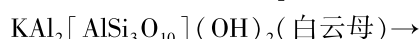
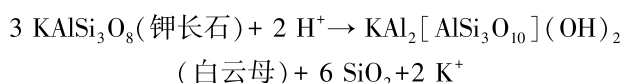
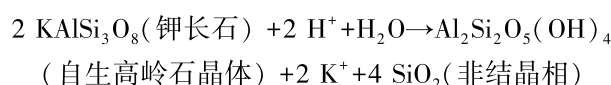
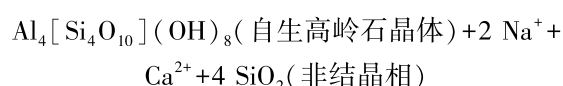
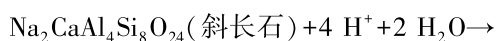
5.1 褪色蚀变指示成矿前的偏酸性地球化学环境

相山矿田成矿前褪色蚀变较发育,ETM+数据主成分分析在相山矿田西部和北部提取出了大规模泥化或褪色蚀变异常(张万良等,2006;吴志春等,2020),该蚀变异常范围涵盖了相山矿田全部矿床,推测当时(成矿前)的超压流体的分布范围与之相当。

褪色蚀变表现为黏土化或泥化,具体包括高岭石化、高水多岭石化、水云母化、迪开石化、绿泥石化等。褪色蚀变改变了围岩的物理-力学性质(孔隙度增加、抗压强度降低、脆性增强、渗透能力提高等),改变了原岩中铀的赋存状态、创造了有利于水力压裂铀成矿发育的物理化学环境。

相山矿田褪色蚀变表现为,花岗斑岩中的钾长石由红色变成了灰白色(图 5a、5b),斜长石斑晶的水云母(水白云母)化(图 5c),褪色蚀变碎斑熔岩局部见迪开石集合体(图 5d),黑云母绿泥石化并析出铁质(图 5e),钾长石碎斑晶明显高岭石化(图 5f)。

长石高岭石化、水云母化、黑云母绿泥石化的化学方程式如下:



这些蚀变化学方程式呈现了 H^+ 交代和岩石的水解作用属性,指示了褪色蚀变热液偏酸性的特点。

邹家山矿床“充填+交代”铀矿化产于碎斑熔岩和流纹英安斑岩中的灰色(即褪色)蚀变带中,这种灰色蚀变带规模较大、面(体)型分布,控制了矿带矿体的分布范围,是成矿前偏酸性流体大规模活动的特征。

2024 年 5 月完工的邹家山地区 ZK1-19 孔,孔深 295.26 m, 237.17 m 以浅的流纹英安斑岩和碎斑熔岩呈灰色、浅灰色、灰绿色,成矿前期的酸性蚀变明显,酸性蚀变带局部见工业矿体,237.17 m 以深(至终孔)为紫红色流纹英安斑岩,无酸性蚀变迹象,也无铀矿化现象。

邹家山矿床受灰色蚀变带控制,横涧、沙州等矿床也产于灰色蚀变带之中。火山岩及次火山岩中广泛发育的成矿前酸性蚀变是火山岩型铀矿形成的重要条件,并已列入火山岩型铀矿找矿判据(中国核工业总公司,1996;温志坚等,2000)。

5.2 偏酸性溶液有利于铀、钍、磷的共同活化和迁移

酸性溶液堆浸提铀工艺流程设计的原理,即是酸性溶液有利于铀、钍活化。相山矿田多个矿床采用堆浸提铀工艺流程进行了开发,作为萃取剂的酸性试剂(如硫酸),是影响萃取工艺成败的最关键因素。邹家山铀矿床浸出实验表明,流纹英安斑岩型矿石,硫酸用量 15%,粒度 -0.5mm,温度 80℃,耗时 3 h,铀浸出率可达 93.52%,同时 70.73% 的钍被浸出(中国核工业地质局《华东铀矿地质志》编纂委员会,2005)。

相山矿田西部的居隆庵、李家岭、邹家山等矿床,都是铀钍混合矿床,居隆庵矿床工业矿体($\text{U} \geq 0.05\%$)

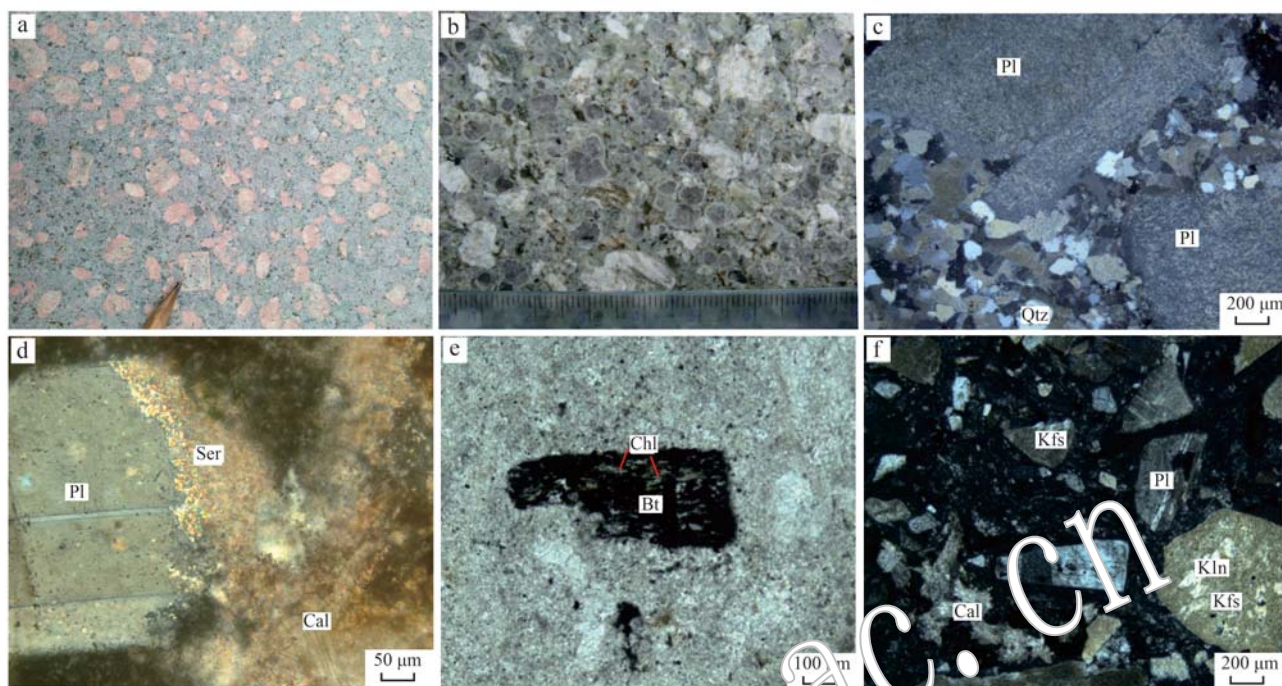


图5 成矿围岩褪色蚀变现象

Fig. 5 Fading and alteration phenomena in ore-forming wall rocks

a—未褪色蚀变的花岗斑岩(斑状花岗岩),钾长石斑晶大多呈红色,凤岗岩体;b—褪色蚀变花岗斑岩(斑状花岗岩),钾长石斑晶大多呈白色、浅绿色,横涧岩体;c—斜长石黏土化,呈假晶,原岩为花岗岩(+);d—斜长石绢云母(水云母)化,原岩为碎斑岩(+);e—黑云母绿泥石化(+);f—钾长石高岭石化,原岩为碎斑岩(+);Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Qtz—石英;Bt—黑云母;Ser—绢云母;Chl—绿泥石;Cal—方解石;Kln—高岭石

a—unaltered granite porphyry (porphyritic granite) with K-feldspar phenocrysts predominantly red in color, Fenggang pluton; b—bleached granite porphyry (porphyritic granite) with K-feldspar phenocrysts predominantly white to pale green, Hengjian pluton; c—plagioclase appears as pseudocrystals and sericitized, protolith is granite porphyry (+); d—sericitization (hydromica) alteration of plagioclase, protolith is porphyroclastic lava (+); e—kaolinization of biotite (+); f—kaolinization of K-feldspar, protolith is porphyroclastic lava (+); Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Qtz—quartz; Bt—biotite; Ser—sericite; Chl—chlorite; Cal—calcite; Kln—kaolinite

Th = 0.05% ~ 0.062%, 李家岭矿床 Th = 0.051% ~ 0.077%, 邹家山矿床工业矿体平均含 Th 0.046%。钍的赋存状态: ① 以独立钍矿物形式存在于钍石、铀钍石、方钍石中; ② 以类质同象形式存在于沥青铀矿、晶质铀矿、铀石、钍铀矿中; ③ 以微量类质同象存在于副矿物磷灰石、锆石、独居石、金红石、磷钇矿中(孟艳宁, 2013)。钍矿化一般只存在于充填成矿形成的充填型矿石中, 交代铀成矿基本无 Th 伴生, 这与 Th 的地球化学性质有关, 在碱性溶液中不利于 Th 的活化迁移, 而含 F^- 和 SO_4^{2-} 的酸性溶液更能高效地使 Th 和 U 共同活化迁移(Nisbet *et al.*, 2022)。成矿前的偏酸性褪色蚀变为 U、Th 共同活化迁移创造了良好的地球化学条件, 而当热液由酸性向碱性变化的时候, Th 就会与 U 分离, 难以再向两侧迁移。

矿石中 U、P 关系密切, 充填型矿石含 P_2O_5 为

0.30% ~ 7.59%, 平均 2.47%, U- P_2O_5 相关系数 0.682(样数 = 18); 交代型矿石含 P_2O_5 为 0.14% ~ 12.59%, 平均 2.48%, U- P_2O_5 相关系数 0.601(样数 = 34)(张万良等, 2021)。磷铀活化迁移实验表明, P_2O_5 与 U、Th、 ΣREE 在酸性条件下, 可从固态进入液相状态, 且酸性越强进入液相状态的比例越高(高海东, 2021)。

相山火山侵入杂岩中的 U、Th、P 通常赋存于造岩矿物或副矿物中, 铀源岩发生酸性蚀变、副矿物发生脱晶化促使了成矿物质的释放。除 U、Th、P 外, 岩石中的多种金属, 如 Cu、Pb、Zn、Ag、Mo 等, 主要是以金属硫化物、氧化物、碳酸盐和硅酸盐等弱酸盐矿物形式存在, 它们在近中性和偏碱性的水溶液中均非常难溶, 只有酸性或强酸性热液与围岩金属矿物反应才可能形成高含量的金属含矿溶液, 高含量的金属含矿溶液进入有利成矿空间后才可能发生金属

成矿作用(陈福, 2000)。

5.3 铀成矿热液遵循由复杂到简单的演化过程

充填型铀矿化, 成矿组分复杂, 伴生 Th、Mo、HREE 等元素; 交代型铀矿化, 成矿组分简单, 流体遵循由复杂到简单演化规律, 而难以出现相反的情况, 矿物沉淀过程逐渐改变了成矿热液的性质, 降低了热液的金属组分浓度, 这与成矿热液盐度由高到低的演化过程相呼应。西藏昂仁县罗布真金银矿床也表现出, 随着含矿热液成矿物质及金属硫化物的大量析出, 流体温度、盐度迅速降低的成矿热液演化过程(刘洪等, 2020)。

5.4 碱交代体是酸性蚀变的派生物

火山气体冷凝水是强酸性的, $\text{pH} \leq 0.3$, 岩浆气体在地壳深处冷凝时首先形成的是酸性溶液(陈福, 2000), 酸性热液与火山岩或侵入岩的相互作用可形成酸性蚀变场(黄志章等, 1999), 酸性蚀变使岩石中碱金属、碱土金属离子如钾、钠、钙、镁、铁和锰等逐渐溶解, 进入溶液, 岩石的主要造岩矿物从架状结构转为层状结构, 矿物中结构水增加, 溶液的 pH 值升高, 为碱交代发育创造了条件。

火山岩或侵入岩中的酸性蚀变是面型分布的,

而碱交代体的规模则小得多。花岗岩型铀矿区的白云母化、云英岩化、伊利石(水云母)化等自变质作用, 与火山岩型铀矿区成矿前的褪色蚀变相类似, 也属酸性热液蚀变。桃山矿田打鼓寨岩体通过自变质作用, 形成了二云母或白云母花岗岩, 同时衍生出偏碱性流体, 形成了小规模岩滴状、不规则状的碱交代体, 碱交代体分布在自变质作用范围内(曾文乐等, 2010), 在未发育自变质的花岗岩体中, 无碱交代体分布。

相山矿田的铀矿化受褪色蚀变带控制, 无褪色蚀变的碎斑熔岩、流纹英安斑岩、花岗斑岩基本无矿, 也无碱交代(体)发育。相山矿田的碱交代作用, 是在褪色酸性蚀变的基础上发育特殊的蚀变类型。在沙州矿床交代型矿石中, 见到钠长石交代水云母的现象(图 6a), 钠长石集合体中伴生碳酸盐矿物, 在河元背 8 号带矿床充填型矿石中, 见到方解石交代黏土矿物的现象(图 6b), 进一步佐证了铀成矿热液向碱度升高方向演化的事实。因此, 在相山矿田, 面型褪色蚀变是碱性蚀变和铀成矿的重要前提条件, 碱交代体是面型褪色蚀变和酸性蚀变的派生物。

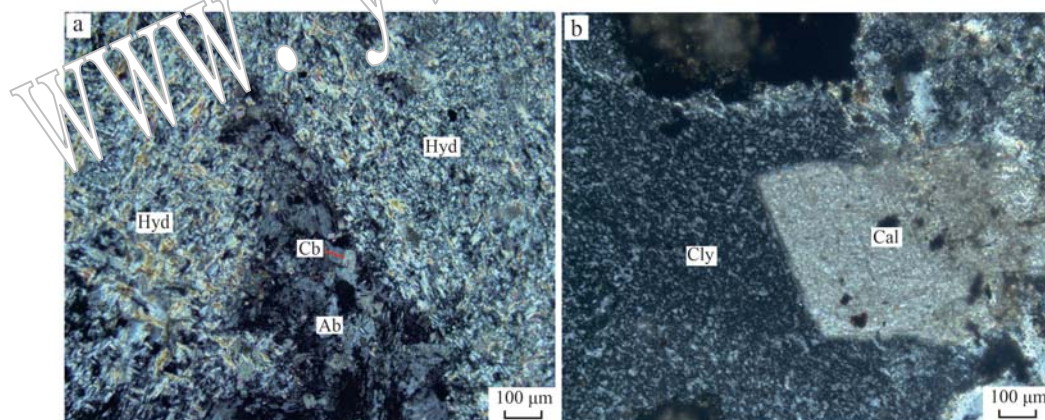


图 6 钠长石(碳酸盐)交代穿插水云母(a)和方解石交代穿插黏土矿物(b)镜下照片(正交偏光)

Fig. 6 Microphotos of albite (carbonate) interbedded with hydromica (a) and calcite interbedded with clay minerals (b) (crossed nicols)

a—交代型矿石, $U=0.219\%$, 取自沙州矿床坑道, 样号 13SZ-3; b—充填型矿石, $U=0.982\%$, 取自河元背 8 号带矿床 ZK13-3 孔 795.90~796.30 m, 样号 13HYB-3; Hyd—水云母; Ab—钠长石; Cb—碳酸盐; Cal—方解石; Cly—黏土矿物

a—metasomatic type ore, $U=0.219\%$, collected from the tunnel of Shazhou deposit, sample No. 13SZ-3; b—filling type ore, $U=0.982\%$, collected from interval 795.90~796.30 m of ZK13-3 borehole in the Heyuanbei No. 8 Zone deposit, sample No. 13HYB-3; Hyd—hydromica;

Ab—albite; Cb—carbonate; Cal—calcite; Cly—clay mineral

5.5 火山侵入杂岩(蚀变岩)→充填成矿→交代成矿流体演化系列同位素证据

全岩 O 同位素研究表明, 蚀变花岗斑岩 $\delta^{18}\text{O}=4.42\text{‰} \sim 5.82\text{‰}$ (周文斌等, 1997), 萤石-水云母型

(充填成矿)矿石 $\delta^{18}\text{O}=5.98\text{‰}$, 钠交代型矿石 $\delta^{18}\text{O}=6.3\text{‰}$ (张学权等, 1982), 从蚀变→充填成矿→交代成矿的流体呈现出统一的 $\delta^{18}\text{O}$ 值增高的演化趋势。

李子颖等(2014)通过测定相山矿田不同演化阶

段方解石、石英的 O 同位素特征,并用计算的相应流体水中 O 同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 和包裹体 H 同位素 $\delta^2\text{D}$ 值投点作图,发现成矿流体既不是来自大气降水,也不是由变质水提供,而是与原始岩浆水相关的流体来源,因为这些矿脉生成水中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 和包裹体 $\delta^2\text{D}$ 值投点都分布在原始岩浆水区域附近,反映成矿流体与火山侵入杂岩后期聚集的演化流体有渊源关系,属同一流体系统。

相山火山杂岩总体 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.711\ 8$,邹家山矿床成矿期紫黑色萤石(充填成矿) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.713\ 27$ (陈繁荣等,1990),沙洲矿床成矿期萤石(充填成矿) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.721\ 028$ (范洪海等,2001),而碱交代(钠化)花岗斑岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.721\ 78\sim 0.731\ 77$ (陈迪云等,1993),从火山侵入杂岩→充填成矿→碱交代蚀变成矿, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值呈增高趋势,也反映了同一流体系统的从酸→碱的连续演化过程。

硫同位素组成是示踪成矿流体来源和物理化学环境演变的重要指标(Chinnasamy and Mishra, 2013)。在中等氧逸度条件下,从碱性溶液中沉淀的硫化物要比从酸性溶液中沉淀的硫化物,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值更高(Ohmoto, 1972)。根据相山火山侵入杂岩(蚀变岩)、充填型矿石(萤石、水云母型)和碱交代型矿石黄铁矿的 S 同位素测试结果(仇本良等,1980),火山侵入杂岩(钠化杂岩、流纹英安斑岩、晶玻屑凝灰岩)黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}=3.6\text{‰}\sim 8.6\text{‰}$ (4个样品),平均 6.375‰ ,该黄铁矿的形成与黑云母绿泥石化或长石黏土化、水云母化等褪色蚀变有关,充填型矿石 $\delta^{34}\text{S}=4.5\text{‰}\sim 7.1\text{‰}$ (4个样品),平均 6.3‰ ,碱交代型矿石 $\delta^{34}\text{S}=4.2\text{‰}\sim 17.3\text{‰}$ (19个样品),平均 9.5‰ ,不管是围岩(蚀变岩)还是矿石, $\delta^{34}\text{S}$ 值均为正值,且 $>+4\text{‰}$,属地壳硫,围岩与矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围有重叠。火山侵入杂岩(蚀变岩)与充填型矿石的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值非常接近,而交代型矿石黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显偏高,反映火山侵入杂岩成岩后聚集的与岩浆水有关的蚀变流体和充填成矿开始时的成矿流体,均属偏酸性流体,而到成矿发生后,流体才向碱性方向转化,意味着相山矿田成矿流体是一个从酸性向碱性演化的同一个热液系统,这与 O、H、Sr 同位素反映的事实一致。

6 成矿热液过程

如上所述,成矿热液具有由偏酸性向偏碱性方向演化的趋势,那么热液的温度、压力、pH 值、Eh 值

是如何具体变化的呢?热液环境(参数)的变化,无疑又导致热液的组成成分、热液中铀搬运形式和沉淀机理的相应变化,成矿热液过程实际上是一个有待解剖的重要科学问题。

目前所获的相山矿田成矿压力数据较为有限,李子颖等(2014)根据流体包裹体的测试和密度式、等容式计算,显示压力变化较大,萤石、方解石、石英、硫化物包裹体压力值变化范围为 $5\sim 60\text{ MPa}$,方解石流体包裹体压力值变化范围为 $8\sim 58\text{ MPa}$ 。本文基于水力压裂铀成矿机制,铀矿脉是热液充填、交代作用的产物,矿脉的形成是从裂隙中心充填作用开始的,向两侧不断渗滤交代而结束,故推断成矿开始的瞬间,成矿压力很小,成矿压力是逐渐升高的过程,因为水力压裂(隐爆)突然形成局部低压空间(裂缝),流体或矿物充填后逐渐闭合,慢慢趋于地静压力,回到水力压裂(隐爆)前的静岩压力状态(p_0)(图7)。

热液萤石、方解石、石英、磷灰石流体包裹体的

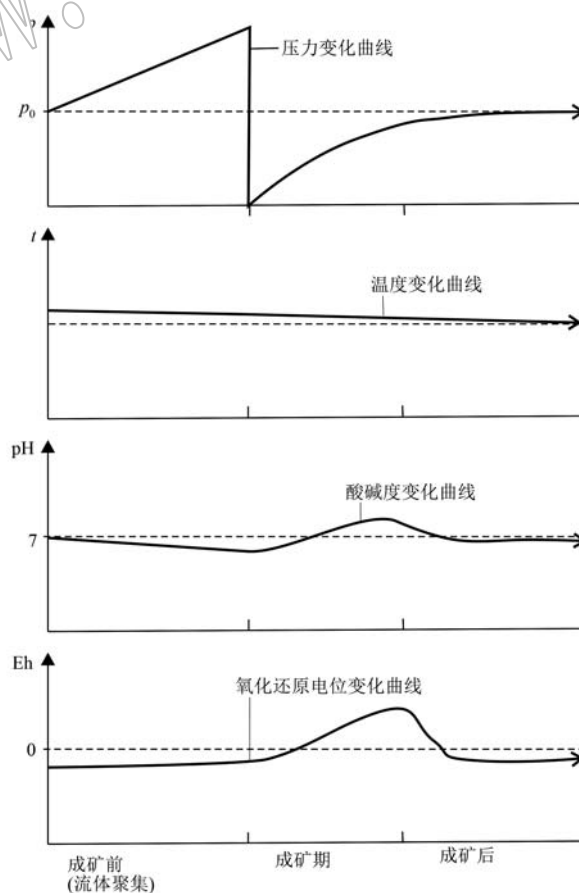


图7 成矿流体物化参数变化趋势图

Fig. 7 Trend of change of physicochemical parameters of ore-forming fluids

温度测定表明(张树明等, 2012; 李子颖等, 2014; 郭晶晶, 2021), 相山矿田成矿温度变化范围较大, 为 120~428℃。邱林飞等(2021)认为, 成矿温度可能不是中低温, 而是中高温, 流体包裹体相对较高的均一温度峰值段(240~360℃)可能指示了紫黑色萤石原生包裹体的形成温度。相山矿田是水力压裂铀成矿的产物, 压力的变化(突然降低)是引起铀成矿的关键因素, 故认为成矿温度的变化可能不大, 虽可能有缓慢降低趋势, 但降幅不大。

充填型矿石是成矿早期流体(包括碎屑流)充填作用的产物, 热液矿物包括萤石、水云母、黄铁矿等, 热液偏酸性; 交代型矿石是稍后交代作用的产物, 热液蚀变有钠长石化、绿泥石化、方解石化等, 热液性质偏碱性, 因此有理由推测, 成矿热液的酸碱度在成矿前可能有一个缓慢降低的过程(偏酸性流体聚集), 在成矿期, pH 值则呈逐渐升高的变化过程, 成矿末期或成矿后则呈下降直至流体聚集前的酸碱环境。

成矿热液的氧化还原电位(Eh)是成矿温度(t)、压力(p)和酸碱度(pH)的函数(刘斌, 2011):

$$Eh = -9.921 \times 10^{-5} t (\log f_{H_2} + 2 \text{ pH}) = -9.921 \times 10^{-5} t [0.5 \log K_1 - \log f_{O_2} + 2 \text{ pH}]$$

式中, t 为成矿温度(℃), K_1 为反应 $2 \text{ H}_2\text{O}(\text{aq}) = 2 \text{ H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ 的平衡常数, 可查表获得, $\log f_{H_2}$ 和 $\log f_{O_2}$ 也可由 K_1 计算获得。

在成矿热液温度变化不大的环境下, Eh 与 p 和 pH 值均成正比关系, 而 p 和 pH 都呈增高的变化趋势, 故 Eh 值在成矿期也是逐渐升高的, 但仍可能处在中等氧逸度的范围之内, 到成矿末期或成矿后才可能逐渐降低。云际矿床红矿石中有一定升高的 Y/Ho 值、 δEu 值以及 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 值暗示碱交代铀成矿流体氧逸度有增高现象(王勇剑等, 2022), 与此结论相符。华北克拉通南缘康山金多金属矿床黄铁矿中微量元素含量指示, 第 2 和第 3 阶段流体 f_{O_2} 比第 1 阶段高(张哲铭等, 2023), 也反映成矿流体向 Eh 值升高方向演化的规律。

7 结论

(1) 相山矿田铀成矿过程是: 流体超压→水力压裂(隐爆)→流体活化→萃取矿质→流体充填并向裂隙两侧渗滤交代成矿, 最终形成相山颇具特色的

充填+交代成矿形成的复合铀矿脉。

(2) 充填成矿形成充填型矿石, 成矿速度较快, 矿石品位高, 伴生组分复杂; 交代成矿形成交代型矿石, 成矿过程较缓慢, 矿石品位较低, 伴生组分简单。

(3) 铀成矿从充填成矿开始, 交代成矿结束, 成矿一气呵成, 成矿温度变化不大, 成矿压力逐渐升高, 成矿热液的酸碱度和氧化还原电位也逐渐升高, 但到成矿后期呈降低趋势。

References

- Bonnetti C, Liu X D, Cuney M, *et al.* 2020. Evolution of the uranium mineralisation in the Zoujiashan deposit, Xiangshan ore field: Implications for the genesis of volcanic-related hydrothermal U deposits in South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 122: 103514.
- Chen Diyun, Zhai Wenbin, Zhou Lumin, *et al.* 1993. Isotope geology of the Xiangshan uranium orefield[J]. *Mineral Deposits*, 12(4): 370~377 (in Chinese with English abstract).
- Chen Fanrong, Shen Weizhou, Wang Dezi, *et al.* 1990. Isotopic geochemistry of uranium ore-field No. 1220 and the implication to ore genesis[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 14(1): 69~77 (in Chinese with English abstract).
- Chen Fu. 2000. Genesis of acid ore-forming solutions and their evolution model[J]. *Geology-Geochemistry*, 28(1): 48~52 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhaobo. 1985. Some basic metallogenic aspects on Phanerozoic vein-type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 1(1): 1~16 (in Chinese with English abstract).
- China National Nuclear Corporation. 1996. Guidelines for Exploration of Volcanic Rock Uranium Deposits in the Nuclear Industry Standard of the People's Republic of China (EJ/T996-96)[S] (in Chinese).
- Chinnasamy S S and Mishra B. 2013. Greenstone metamorphism, hydrothermal alteration, and gold mineralization in the genetic context of the granodiorite-hosted gold deposit at Jonnagiri, eastern Dharwar craton, India[J]. *Economic Geology*, 108(5): 1 015~1 036.
- Du Letian and Wang Wenguang. 2009. Alkaline mantle fluids and alkali-rich hydrothermal metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 599~610 (in Chinese with English abstract).
- Fan Honghai, Ling Hongfei, Wang Dezi, *et al.* 2001. Ore-forming material sources for Xiangshan uranium ore-field in Jiangxi Province: Evidence from Nd-Sr-Pb isotopes[J]. *Geological Journal of China Uni-*

- versities, 7(2): 139~145(in Chinese with English abstract).
- Gao Haidong. 2021. The Geochemical Characteristics of Phosphorus and Its Significance to Uranium Mineralization in Xiangshan Uranium Ore-field[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology (in Chinese with English abstract).
- Guo Fusheng, Xie Caifu, Jiang Yongbiao, *et al.* 2017. Regional Geology and U-Polymetallic Mineralization Background in Xiangshan-Lugang Area, Jiangxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~353(in Chinese).
- Guo Jingjing. 2021. The Characteristics of Apatite Fluid Inclusions of the Ultra-rich Ore in Zoujiashan Uranium Deposit in Xiangshan Ore-field [D]. Fuzhou: East China Institute of Technology (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhizhang, Li Xiuzhen and Cai Genqing. 1999. Alteration Field and Type in Hydrothermal Uranium Deposits[M]. Beijing: Atomic Press, 1~173(in Chinese).
- Li Lirong, Wang Zhengqi and Xu Deru. 2021. Mineral assemblage characteristics of the Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong Province and its significance[J]. Acta Petrologica et Metallogica, 40(3): 513~524(in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Huang Zhizhang, Li Xiuzhen, *et al.* 2018. Pyrogeolysis and Uranium Metallogeny in Xiangshan Volcanic Basin, South China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~324(in Chinese).
- Lin Jinrong, He Zhihua, Wang Yongjian, *et al.* 2019. Ore-forming age and thermal history of uranium-polymetallic mineralization in Xiangshan uranium orefield[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(9): 2 801~2 816(in Chinese with English abstract).
- Liu Bin. 2011. Calculation of pH and Eh for aqueous inclusions as simple system[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(5): 1 533~1 542(in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Zhang Linkui, Huang Hanxiao, *et al.* 2020. Evolution of ore-forming fluids in the Luobuzhen epithermal gold-silver deposit in western Gangdisi: Fluid inclusion and H-O isotope evidence[J]. Earth Science Frontiers, 27(4): 49~65 (in Chinese with English abstract).
- Liu Long, Zhang Shuming, Wang Liling, *et al.* 2021. Mineral chemistry and geological significance of biotite and chlorite from granite porphyries in the northern Xiangshan uranium orefield[J]. Geochimica, 50(6): 550~561(in Chinese with English abstract).
- Luo Jincheng, Shi Shaohua, Chen Youwei, *et al.* 2019. Review on dating of uranium mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(2): 589~605(in Chinese with English abstract).
- Meng Yanning. 2012. Research on the Ore-Forming Mechanism of the Uranium Thorium Deposits in the Western Part of Xiangshan Ore Field[D]. Beijing: Beijing Institute of Geology for Nuclear Industry (in Chinese with English abstract).
- Nisbet H, Migdisov A A, Williams-Jones A E, *et al.* 2022. The solubility of thorium in carbonate-bearing solutions at hydrothermal conditions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 330: 80~92.
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 67(5): 551~578.
- Qiu Linfei and Pang Yaqing. 2021. Status and problems in the research on ore-forming fluids of hydrothermal uranium deposit in Southern China[J]. World Nuclear Geoscience, 38(4): 424~435(in Chinese with English abstract).
- Sun Zhanxue. 2004. Uranium sources of the Xiangshan uranium ore-field: Geochemical evidence[J]. Acta Mineralogica Sinica, 24(1): 19~24(in Chinese with English abstract).
- The Compilation Committee of the East China Uranium Geological Records by the China Nuclear Industry Geological Bureau. 2005. East China Uranium Geological Records[R] (in Chinese).
- Wang Y J, Fan H H, Qin K Z, *et al.* 2023. Mineralization age of the Xiangshan uranium ore field, South China redefined by hydrothermal apatite U-Pb geochronology [J]. Ore Geology Reviews, 160: 105586.
- Wang Yongjian, Nie Jiangtao, Lin Jinrong, *et al.* 2022. Mineralization characteristics and geochemical elements migration during alkali metasomatized hydrothermal process of Yunji deposit in Xiangshan uranium ore field[J]. Acta Petrologica Sinica, 38(9): 2 865~2 888(in Chinese with English abstract).
- Wen Zhijian, Du Letian, and Liu Zhengyi. 2000. Relationship between hydromineralization and uranium mineralization in the Xiangshan ore-field[J]. Mineral Deposits, 19(3): 257~263 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhichun, Guo Fusheng, Li Hualiang, *et al.* 2020. Application of principal component analysis in interpretation of alteration zone in the Xiangshan volcanic basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 44(3): 385~403(in Chinese with English abstract).
- Zeng Wenle, He Yuhua, Zhang Liugui, *et al.* 2010. A study on wall-rock alteration of uranium mineralization in Taoshan ore-field[J]. Geology and Exploration, 46(1): 1~9(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuming, Cao Shousun, Zeng Wenle, *et al.* 2012. Fluid inclusion characteristics of typical uranium deposits in Xiangshan orefield,

- Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 31(1): 65~82 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang. 2012. Progress and trend in the research on uranium geology in Xiangshan ore field[J]. Resources Survey & Environment, 33(1): 22~27 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang, Guo Fusheng and Chen Zhiping. 2021. Hydraulic Fracturing Uranium Mineralization: Taking Xiangshan Ore Field as An Example[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~132 (in Chinese).
- Zhang Wanliang, Li Ziyang, Que Zushuang, *et al.* 2017. Inspiration from hydraulic fracturing technology for the causes of the Xiangshan hydrothermal uranium deposit in Jiangxi[J]. Geoscience, 31(3): 521~533 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang, Liu Dechang and Zhang Jingbo. 2006. Alteration remote sensing anomalies of Xiangshan uranium field and its geological implications[J]. Remote Sensing Technology and Application, 21(3): 189~192, 169 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xuequan, Ji Shufan, Wang Silong, *et al.* 1982. Geochemical evolution of hydrothermal mineralization in Xiangshan ore field[J]. Uranium Geology, (5): 412~416 (in Chinese).
- Zhang Zheming, Zeng Qingdong, Wang Yongbin, *et al.* 2023. Metallogenic age and fluid evolution of the Kangshan Au-polymetallic deposit in the southern margin of the North China Craton: Constraints from monazite U-Pb age, *in situ* trace elements and S isotopes of pyrite[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(3): 865~885 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenqiang. 2001. Geochemical characteristics and metallogenic mechanism of No. 470 uranium deposit[J]. Volcanology & Mineral Resources, 22(3): 193~198 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Wenbin and Rao Bing. 1997. Experimental study of water-rock hydrogen and oxygen isotope exchange in the Xiangshan uranium ore-field[J]. Geological Review, 43(3): 322~327 (in Chinese with English abstract).
- 陈迪云, 周文斌, 周鲁民, 等. 1993. 相山铀矿田同位素地质学特征[J]. 矿床地质, 12(4): 370~377.
- 陈繁荣, 沈渭洲, 王德滋, 等. 1990. 1220 铀矿田同位素地球化学和矿床成因研究[J]. 大地构造与成矿学, 14(1): 69~77.
- 陈福. 2000. 酸性含矿热液的成因及成矿演化模式[J]. 地质地球化学, 28(1): 48~52.
- 陈肇博. 1985. 显生宙脉型铀矿床成矿理论的几个基本问题[J]. 铀矿地质, 1(1): 1~16.
- 杜乐天, 王文广. 2009. 碱型地幔流体与富碱热液成矿[J]. 矿床地质, 28(5): 599~610.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 等. 2001. 江西相山铀矿田成矿物质来源的 Nd、Sr、Pb 同位素证据[J]. 高校地质学报, 7(2): 139~145.
- 高海东. 2021. 相山铀矿田磷的地球化学特征及其铀成矿意义[D]. 抚州: 东华理工大学.
- 郭福生, 谢财富, 姜勇彪, 等. 2017. 江西相山-鹿冈区域地质及铀多金属成矿背景[M]. 北京: 地质出版社, 1~353.
- 郭晶晶. 2021. 相山铀矿田邹家山矿床特富矿石中磷灰石流体包裹体研究[D]. 抚州: 东华理工大学.
- 黄志章, 李秀珍, 蔡根庆. 1999. 热液铀矿床蚀变场及蚀变类型[M]. 北京: 原子能出版社, 1~173.
- 李丽荣, 王正其, 许德如. 2021. 粤北棉花坑铀矿床矿物共生组合特征及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 40(3): 513~524.
- 李子颖, 黄志章, 李秀珍, 等. 2014. 相山火成岩与铀成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1~324.
- 林锦荣, 胡志华, 王勇剑, 等. 2019. 相山铀矿田铀多金属成矿时代与成矿热历史[J]. 岩石学报, 35(9): 2 801~2 816.
- 刘斌. 2011. 简单体系水溶液包裹体 pH 和 Eh 的计算[J]. 岩石学报, 27(5): 1 533~1 542.
- 刘洪, 张林奎, 黄瀚霄, 等. 2020. 冈底斯西段罗布真浅成低温热液型金银矿的成矿流体演化: 来自流体包裹体、H-O 同位素的证据[J]. 地学前缘, 27(4): 49~65.
- 刘龙, 张树明, 王利玲, 等. 2021. 相山铀矿田北部花岗斑岩黑云母及绿泥石矿物化学特征与地质意义[J]. 地球化学, 50(6): 550~561.
- 骆金诚, 石少华, 陈佑伟, 等. 2019. 铀矿床定年研究进展评述[J]. 岩石学报, 35(2): 589~605.
- 孟艳宁. 2012. 相山矿田西部铀钍矿床的成矿机理研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 仇本良, 季树藩. 1980. 相山矿田硫同位素的初步研究及地质意义[R]. 核工业北京地质研究院内部资料.
- 邱林飞, 庞雅庆. 2021. 华南热液型铀矿成矿流体研究现状及存在问题[J]. 世界核地质科学, 38(4): 424~435.
- 孙占学. 2004. 相山铀矿田铀源的地球化学证据[J]. 矿物学报, 24(1): 19~24.
- 王勇剑, 聂江涛, 林锦荣, 等. 2022. 相山铀矿田云际矿床碱交代型铀矿化蚀变作用及组分迁移规律研究[J]. 岩石学报, 38(9): 2 865~2 888.

附中文参考文献

- 温志坚, 杜乐天, 刘正义. 2000. 相山矿田热液水云母化及其与铀矿化关系研究[J]. 矿床地质, 19(3): 257~263.
- 吴志春, 郭福生, 李华亮, 等. 2020. 主成分分析法在相山火山盆地蚀变分带解译中的应用[J]. 大地构造与成矿学, 44(3): 385~403.
- 曾文乐, 何育华, 张柳贵, 等. 2010. 桃山矿田铀矿化围岩蚀变研究[J]. 地质与勘探, 46(1): 1~9.
- 张树明, 曹寿孙, 曾文乐, 等. 2012. 江西相山矿田典型铀矿床流体包裹体特征及意义[J]. 矿床地质, 31(1): 65~82.
- 张万良. 2012. 相山矿田铀矿地质研究进展与趋势[J]. 资源调查与环境, 33(1): 22~27.
- 张万良, 郭福生, 陈志平. 2021. 水力压裂铀成矿作用: 以相山矿田为例[M]. 北京: 地质出版社, 1~132.
- 张万良, 李子颖, 阙足双, 等. 2017. 水力压裂技术对江西相山热液铀矿成因的启示[J]. 现代地质, 31(3): 521~533.
- 张万良, 刘德长, 张静波. 2006. 相山铀矿田蚀变遥感异常及地质意义[J]. 遥感技术与应用, 21(3): 189~192, 169.
- 张学权, 季树藩, 王思龙, 等. 1982. 相山矿田热液成矿作用的地球化学演化[J]. 放射性地质, 5(5): 412~416.
- 张哲铭, 曾庆栋, 王永彬, 等. 2023. 华北克拉通南缘康山金多金属矿床成矿时代及流体演化——来自独居石 U-Pb 年龄、黄铁矿微量元素和原位 S 同位素制约[J]. 岩石学报, 39(3): 865~885.
- 张振强. 2001. 470 铀矿床地球化学特征及成矿机理探讨[J]. 火山地质与矿产, 22(3): 193~198.
- 中国核工业地质局《华东铀矿地质志》编纂委员会. 2005. 华东铀矿地质志[R].
- 中国核工业总公司. 1996. 中华人民共和国核行业标准(EJ/T996-96)火山岩型铀矿找矿指南[S].
- 周文斌, 饶冰. 1997. 相山铀矿田水-岩氢、氧同位素交换的实验研究[J]. 地质论评, 43(3): 322~327.