

粤北棉花坑铀矿床矿物共生组合特征及其意义

李丽荣^{1,2}, 王正其^{1,2}, 许德如^{1,2,3}

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 3. 中国科学院 广州地球化学研究所, 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 基于棉花坑矿床不同类型铀矿石中矿物共生组合关系研究, 讨论了棉花坑矿床成矿作用过程中铀的沉淀富集机制。研究结果显示, 棉花坑矿床铀矿体主要呈脉状充填或细脉浸染状产出; 铀矿石类型包括萤石型、碳酸盐型、硅质脉型和红化型。虽然不同矿石类型中成矿期形成的脉石矿物种类存在差异, 但均表现出以下共性特点: 铀矿物赋存于脉状充填矿石的中心部位或两壁, 或与成矿期脉石矿物相间排列; 或呈细脉状、浸染状赋存于碎裂蚀变花岗岩内; 与成矿期脉石矿物(主要包括方解石、萤石、微晶石英)镶嵌生长; 铀矿物与黄铁矿以集合态或相对独立态密切共生, 两者之间及其与成矿期脉石矿物晶体之间界线平直, 晶形完好, 镶嵌生长。认为棉花坑矿床铀矿石中黄铁矿与铀矿物之间不存在先后的成生关系, 均为成矿流体共结晶产物; 铀沉淀成矿与氧化还原作用无关, 减压、温度下降以及成矿流体 pH 值、溶解度(饱和度)变化, 是制约铀矿物以及相关脉石矿物结晶沉淀的主要因素。

关键词: 花岗岩型铀矿; 矿物共生组合; 沉淀成矿机制; 棉花坑矿床

中图分类号: P619.14; P571

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)03-0513-12

Mineral assemblage characteristics of the Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong Province and its significance

LI Li-rong^{1,2}, WANG Zheng-qi^{1,2} and XU De-ru^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resource and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, CAS Key Laboratory of Mineral and Metallogeny, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on the relationship between uranium minerals and pyrite from different types of uranium ores in the Mianhuakeng deposit, the authors investigated the mechanism for the deposition and enrichment of uranium during the ore-forming process. The research shows that uranium orebodies in the Mianhuakeng deposit generally occur in vein-filling or vein-disseminated form. Uranium ore types include fluorite type, carbonate type, siliceous vein type and reddening type. Although different ore types have different gangue minerals formed in the mineralization period, they show common characteristics as follows: Uranium minerals in the central part or along the vein walls are alternatively arranged with gangue minerals or occur in veinlike or disseminated form in cataclastic altered granite and are inlaid with gangue minerals such as calcite, fluorite and microcrystalline quartz. Uranium minerals and pyrite are closely associated with each other in aggregate or relatively independent states, and the boundaries between them and gangue minerals in the mineralization period are straight, with good crystal type and inlaid growth form. The aforementioned evidence indicates that there is no sequential generative relationship between

收稿日期: 2020-10-30; 接受日期: 2021-03-05; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金(41040019); 核工业 290 研究所铀矿勘查研究基金

作者简介: 李丽荣(1989-), 女, 博士研究生, 研究方向为岩石成因与铀成矿作用, E-mail: 781893541@qq.com; 通讯作者: 王正其(1964-), 男, 教授, 研究方向为岩石成因与铀成矿作用, E-mail: 704983067@qq.com。

pyrite and uranium minerals, and that they are all co-crystalline products of ore-forming fluid. Uranium precipitation had nothing to do with redox reaction. In contrast, decrease of pressure and temperature and the change of pH and solubility were the main factors that triggered the precipitation of uranium and gangue minerals.

Key words: granite type uranium ore; mineral assemblage; precipitation mineralization mechanism; Mianhuakeng deposit

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41040019); Uranium Exploration Research Fund of 290 Research Institute of Nuclear Industry

20世纪80年代以来,随着花岗岩型、火山岩型铀矿找矿成果突破以及研究工作的深入,我国铀矿地质工作者在岩浆分异热液铀成矿说、热水汲取铀成矿说(上升说)、浅成低温热液改造成矿说、大陆风化铀成矿说(下降说)的基础上,先后提出了双混合铀成矿理论、热点铀成矿理论(李子颖等,1999)和壳幔作用源区控铀成矿理论等(王正其等,2013,2016),与花岗岩、火山岩相关的热液型铀成矿作用理论研究取得了重要进展。上述理论主要聚焦于对铀及其成矿流体来源的讨论,而对成矿流体中铀的运移方式以及铀从成矿流体中沉淀析出机制却少有专门讨论。

基于实验室常温、常压条件下研究成果,相关教材或著作在表述铀地球化学行为特点时,均传达了一种思想,即在自然界中铀主要有 U^{4+} 、 U^{6+} 两种价态; U^{6+} 具有可溶性, U^{4+} 是不可溶的;氧化条件下, U^{4+} 被氧化成 U^{6+} 随成矿流体迁移,当运移至还原环境时,成矿流体中的 U^{6+} 被还原为不可溶的 U^{4+} 而沉淀(Romberger, 1984; Dahlkamp, 1993; Castor and Henry, 2000; Chabiron *et al.*, 2003; 余达淦等, 2005)。受上述思想影响,铀矿地质工作者长期认为花岗岩型铀成矿过程中铀的运移与沉淀受氧化-还原作用控制(Parks and Pohl, 1988; 胡瑞忠等, 1990; Dahlkamp, 1993; 杜乐天, 2001; 邓平等, 2003; 凌洪飞, 2011; 许健俊等, 2015; Montreuil *et al.*, 2015; 李延河等, 2016; 吴德海等, 2019)。然而,随着花岗岩型铀成矿特征与物质来源示踪研究的深入,一方面发现众多地质事实难以用还原沉淀成矿理论合理解释,另一方面,众多地球化学证据显示花岗岩型铀成矿作用与幔源流体作用有关(杜乐天, 2001; 姜耀辉等, 2004; 商朋强等, 2006; 王正其等, 2007, 2013, 2016; 张国全等, 2008, 2010; 沈渭洲等, 2009)。幔源流体具有还原属性以及花岗岩型铀成矿过程具有从相对封闭的深部向相对开放的浅部环境的作用特点已是共性认识(杜乐天,

1996; 张鸿翔等, 2000; 毛景文等, 2005),因此,幔源流体的还原属性以及成矿流体作用过程、能否支持热液型铀成矿作用中氧化迁移-还原沉淀的观点以及是否适用花岗岩型铀成矿理论尚存争议。

本文以粤北地区棉花坑矿床为例,基于铀矿物赋存形式及其与黄铁矿、成矿期脉石矿物等的共生关系研究,探讨了花岗岩型铀成矿过程铀的沉淀成矿机制,以期深化花岗岩型铀成矿作用理论。成矿作用过程、铀的沉淀成矿机制及其相应的制约因素是花岗岩型铀成矿理论的重要内容,并直接制约着花岗岩型铀成矿预测与找矿潜力评价的工作思路,对其展开深入研究与讨论,具有重要的理论与实践意义。

1 矿区地质背景

长江铀矿田位于华南板块北部之闽赣后加里东隆起西南缘与湘、桂、粤北海西-印支拗陷结合部东南缘的诸广岩体内。诸广岩体是一个侵入于寒武系和泥盆系中的多期多阶段巨型复式岩体,岩浆活动频繁,主要由加里东期、海西期、印支期和燕山早期形成的花岗岩构成,其中又以印支期和燕山期花岗岩为主体。长江铀矿田是我国南岭花岗岩型铀成矿带的重要组成部分,也是诸广地区花岗岩型铀成矿区的典型代表。

长江铀矿田范围及其东部区域,地表大面积发育印支期中细粒二云母花岗岩(γ_5^{1-3})(图1),成岩年龄为 232 ± 4 Ma(黄国龙等, 2014)。矿田外围及矿床深部则主要为燕山早期中粗粒(似斑状)黑云母花岗岩(γ_5^{2-1})、中粒(似斑状)二云母花岗岩(γ_5^{2-2}),成岩年龄为 164~155 Ma;印支期和燕山早期花岗岩中有北东向、北西向和近东西向的基性岩脉侵入(110~90 Ma)(黄国龙等, 2014)。区内断裂构造活动强烈,主要发育有 NE 向、NNE 向和近 SN 向 3 组,其中,NE 向构成矿区主干断裂,以硅化带形式产出,具

有规模大、贯穿全区的特点；近 SN 向断裂相对规模较小，延伸长度 3 ~ 10 km 不等，是矿区主要含矿构造。

长江铀矿田业已探明长排、棉花坑和书楼丘等 3 个铀矿床(图 1)。空间上，书楼丘矿段矿体分布于

棉花坑断裂的北侧，而棉花坑矿段和长排矿段则分布于棉花坑断裂的南侧。其中棉花坑铀矿床是长江矿田乃至我国华南花岗岩型铀矿床中规模最大、埋藏较深及矿化垂幅较大的矿床之一，受到广泛关注，其成矿地质特征具有广泛的代表性。

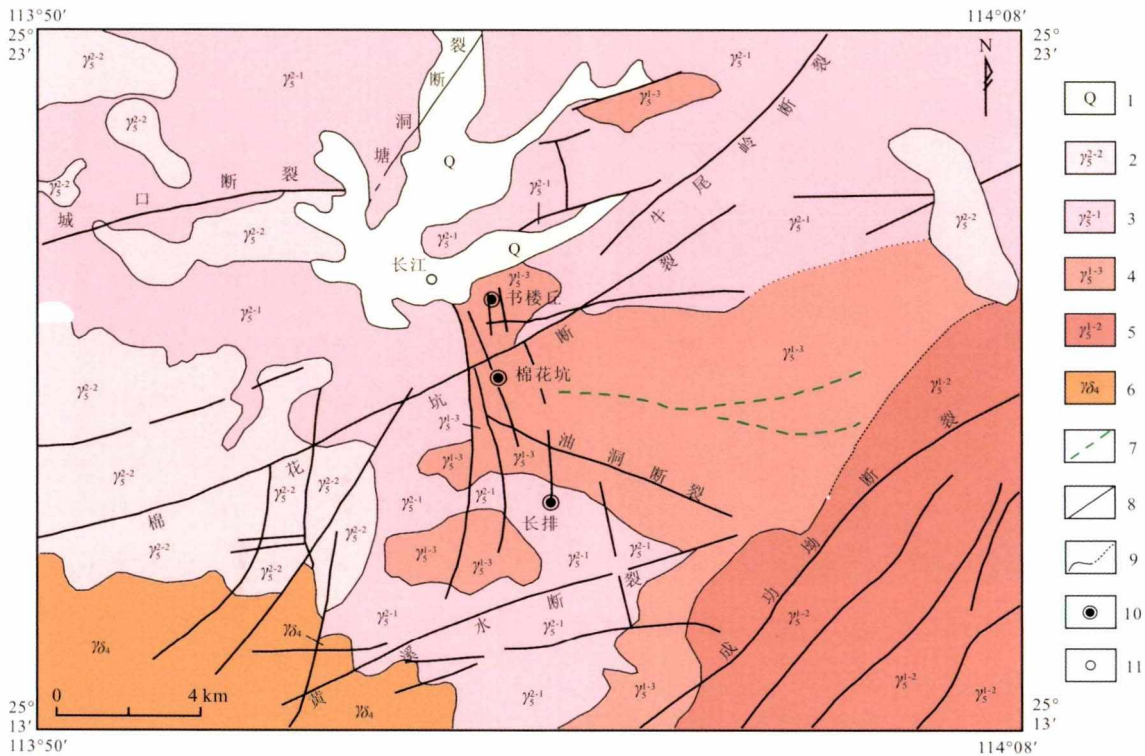


图 1 长江铀矿区地质略图(据黄国龙等, 2014)

Fig. 1 Sketch geological map of the Changjiang uranium ore district (after Huang Guolong *et al.*, 2014)

1—第四系；2—中粒似斑状二云母花岗岩；3—中粗粒似斑状黑云母花岗岩；4—中细粒二云母花岗岩；5—中粒黑云母花岗岩；6—花岗闪长岩；7—辉绿岩；8—断裂构造；9—实测与推测地质界线；10—铀矿床；11—地名标记

1—Quaternary；2—medium-grained porphyritic biotite-muscovite granite；3—medium-coarse grained porphyritic biotite granite；4—medium-fine grained biotite-muscovite granite；5—medium-grained (porphyritic) biotite granite；6—granodiorite；7—diabase；8—fault；9—measured and inferred geological boundaries；10—uranium deposit；11—place mark

2 矿体地质与铀矿石类型

棉花坑铀矿床定位于长江矿田近 SN 向断裂构造蚀变带内。铀矿体多呈近直立的隐伏脉状、透镜状产出，现探明的矿体垂幅约从海拔+500 m 至-647 m。赋矿围岩包括印支期中细粒二云母花岗岩和燕山早期中粗粒似斑状黑云母花岗岩。除红化、硅化、萤石化、碳酸盐化、黄铁矿化等近矿蚀变外，铀矿体周缘发育规模较矿体规模大得多、产状与含矿构造带相吻合的绿色蚀变带。绿色蚀变带以伊利石化或绿泥石化导致围岩花岗岩颜色变为特征性绿色为特征，蚀变过程形成较多的黄铁矿，蚀变带表现出由矿体为中心向两侧绿色蚀变强度逐渐递减的对称性分

布特点，铀成矿年龄约 75 ~ 65 Ma(张国全等, 2008；黄国龙等, 2010；钟福军等, 2019)。

按照矿石结构构造和典型脉石矿物组成，棉花坑矿床铀矿石包含脉状充填型铀矿石和碎裂蚀变岩型铀矿石两大类。其中，脉状充填型铀矿石可进一步划分为碳酸盐型(图 2)、萤石型(图 3)和硅质脉型(或硅化带型)(图 4) 3 种亚型，它们分别以成矿作用过程形成的方解石、萤石、玉髓状或微晶石英为典型脉石矿物，通常呈脉状、网脉状充填形式产出，具脉状构造或角砾状构造。3 种亚型矿石类型在矿体中往往表现出“一体定位”的相互叠加或过渡特点。碎裂蚀变岩型铀矿石(又称红化型)以呈特征性暗红色或深棕红色、碎裂状或角砾状构造、原岩花岗结构大致能够分辨为特点(图 5)，产于脉状充填型铀矿

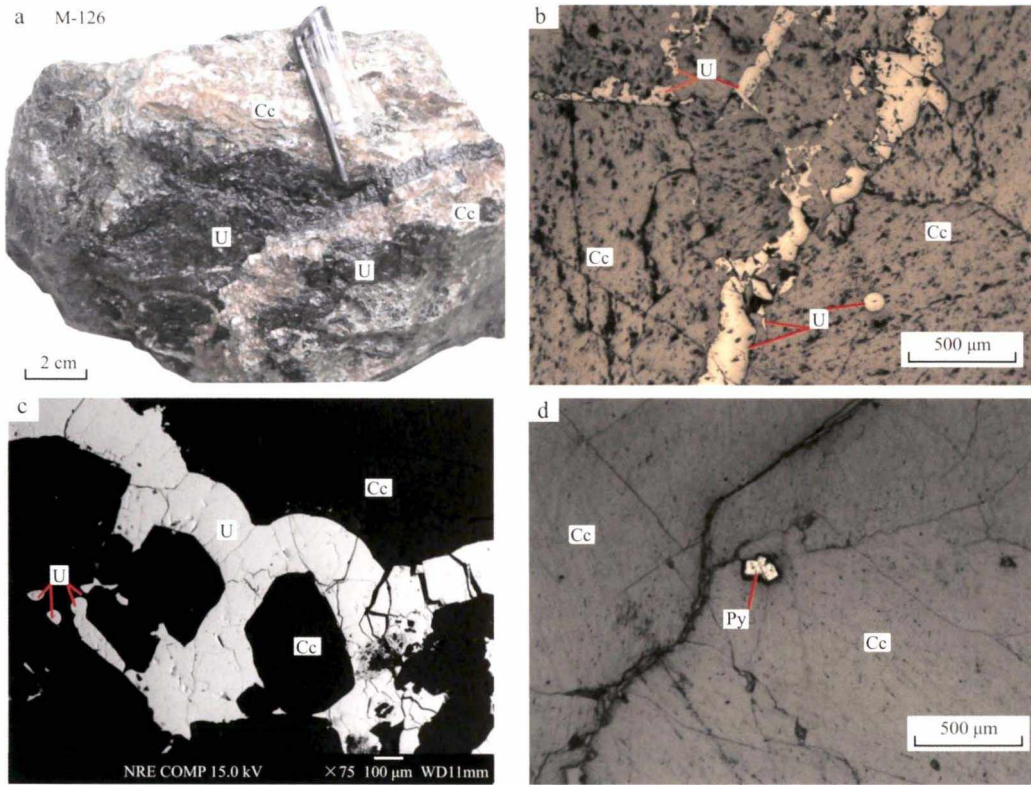


图2 碳酸盐型铀矿石(M-126)显微特征

Fig. 2 Microscopic characteristics of carbonate type uranium ore (M-126)

a—沥青铀矿赋存于脉状矿体脉壁或脉体中间,与碳酸盐矿物呈带状相间构造; b,c—沥青铀矿分布于方解石晶体间或晶体内,沥青铀矿与方解石矿物晶体界线清晰平整; d—晶形良好的黄铁矿集合体包裹于方解石矿物内; Cc—方解石; U—沥青铀矿; Py—黄铁矿
 a—pitchblende occurring in the vein wall or in the middle of a vein body and forming a banded structure with carbonate minerals; b and c—pitchblende occurring in or between calcite crystals, the crystal boundaries between pitchblende and calcite minerals being clear and straight; d—pyrite aggregates with good crystalline morphology encapsulated in calcite minerals; Cc—calcite; U—pitchblende; Py—pyrite

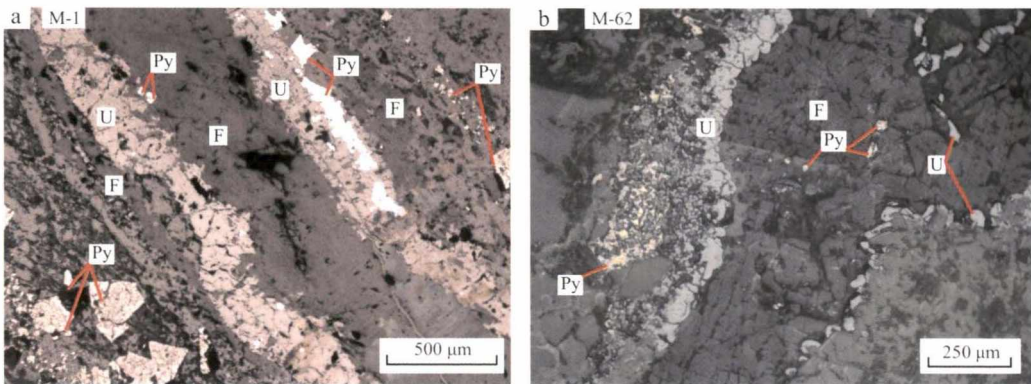


图3 萤石型铀矿石(M-62)显微特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of fluorite type uranium ore (M-62)

a—脉体内沥青铀矿与萤石呈对称状相间分布,中心主要为萤石,两侧依次出现沥青铀矿、萤石、黄铁矿,其中黄铁矿主要分布于矿脉外侧,晶形完好,与脉体展布趋势一致; b—沥青铀矿主要产于脉体两壁,晶形好的黄铁矿主要分布于矿脉外侧,与脉体展布趋势一致,也可见生长于脉体内的萤石颗粒间; F—萤石; U—沥青铀矿; Py—黄铁矿

a—pitchblende and fluorite symmetrically distributed in the vein, the center being mainly fluorite, and pitchblende, fluorite and pyrite appearing successively on both sides, pyrite with good crystalline morphology mainly distributed outside the vein, which is consistent with the distribution trend of vein body; b—pitchblende mainly produced in two walls of vein; pyrite with good crystalline morphology mainly distributed outside the vein, which is consistent with the distribution trend of vein body, and pyrite growing between fluorite particles of the vein body; F—fluorite; U—pitchblende; Py—pyrite

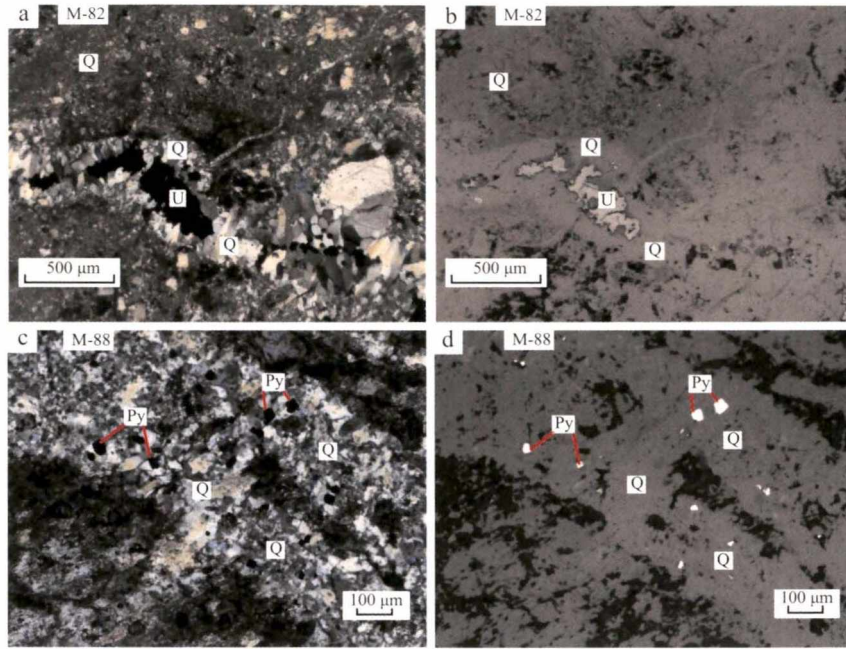


图4 硅质脉型铀矿石(M-88)显微特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of siliceous vein type uranium ore (M-88)

a、b—沥青铀矿赋存于微晶梳状石英脉的中间部位；c、d—黄铁矿以良好的立方体晶形镶嵌于石英晶体间；Q—石英；U—沥青铀矿；Py—黄铁矿
 a, b—pitchblende occurring in the middle of the microcrystalline comb-like quartz vein; c, d—pyrite with a good cubic shape embedded between quartz crystals; Q—quartz; U—pitchblende; Py—pyrite

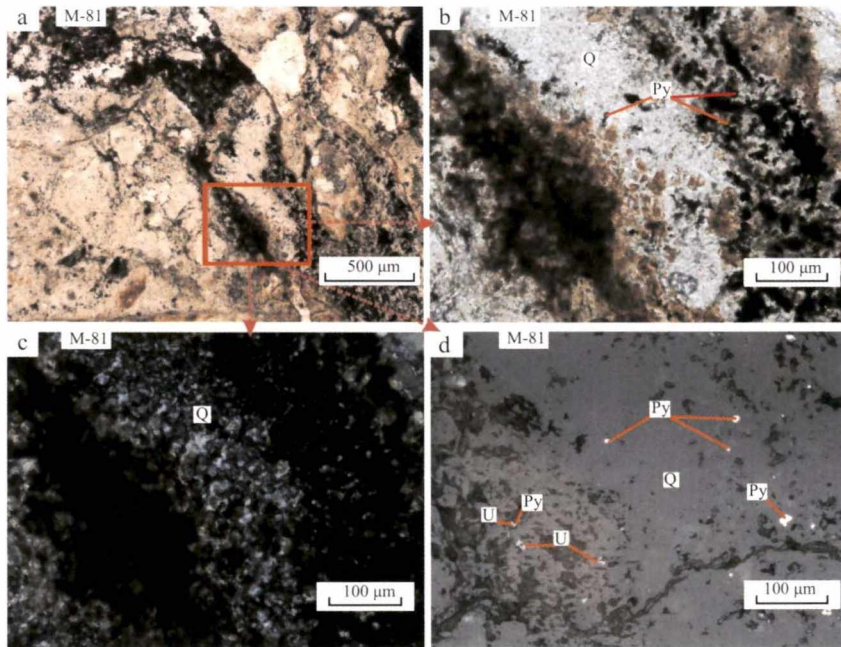


图5 碎裂蚀变花岗岩型铀矿石(M-81)显微特征

Fig. 5 Microscopic characteristics of cataclastic altered granite type uranium ore (M-81)

a—角砾之间充填的玉髓状微晶石英脉体；b~d—玉髓状微晶石英脉体主要由微晶石英、粉末状岩石碎屑、黄铁矿和铀矿物组成，铀矿物周边粉末状岩石碎屑呈现出“红晕”现象，“红晕”内部及微晶石英颗粒间发育颗粒细微晶形完好的黄铁矿；Q—石英；U—沥青铀矿；Py—黄铁矿
 a—chalcedony microcrystalline quartz veins filled between breccias; b~d—chalcedony microcrystalline quartz veins mainly composed of microcrystalline quartz, powdered rock debris, pyrite and uranium mineral; the powder rock debris around uranium minerals exhibiting a “red halo” phenomenon, pyrite with good crystalline morphology developing the “red halo” internally and between microcrystalline quartz grains; Q—quartz; U—pitchblende; Py—pyrite

石的两侧。

碎裂蚀变岩型铀矿石外侧与绿色蚀变围岩之间呈渐变关系。结合蚀变围岩由矿体为中心向两侧蚀变强度逐渐递减的对称性分布特点,可推断成矿流体具有由深部沿断裂带充填并向外围碎裂花岗岩逐渐渗入、交代的成矿作用特点。

3 铀矿石中矿物共生组合关系

基于宏观与显微观察,结合扫描电镜手段,对棉花坑矿床不同类型铀矿石铀矿物与黄铁矿成生关系

展开了细致研究。扫描电镜 X 射线能谱分析结果列于表 1,相应的背散射图像见图 6。

碳酸盐型铀矿石(图 2)的成矿期新生脉石矿物主要为方解石,金属矿物主要为铀矿物、黄铁矿等。宏观上,当碳酸盐型铀矿石呈独立脉状形式产出时,通常表现出两壁为方解石,中心为沥青铀矿,或方解石与沥青铀矿呈带状相间分布的特点(图 2a)。微观研究发现,沥青铀矿通常产于方解石矿物晶粒间,或被方解石矿物包裹(图 2b、2c),与方解石矿物晶体之间界线清晰平整,也可见晶形完整的黄铁矿晶体被方解石矿物包裹(图 2d),两者表现出共结晶生长特点。

表 1 矿物化学成分扫描电镜 X 射线能谱分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Scanning electron microscope X-ray energy spectrum analysis results of mineral chemical composition

测点	样号	U	O	Si	Ca	S	Fe	Al	As	total	矿物
1	M-1	72.49	20.27	2.34	4.90					100	沥青铀矿
2	M-1					54.52	45.48			100	黄铁矿
3	M-1	61.40	26.40	9.97	1.50			0.72		100	沥青铀矿
4	M-62	73.73	18.81	2.05	5.42					100	沥青铀矿
5	M-62					52.99	45.79		1.22	100	黄铁矿
6	M-82	65.03	24.87	7.97	1.53			0.61		100	沥青铀矿
7	M-88	73.38	20.22	2.53	3.87					100	沥青铀矿
8	M-88					53.03	46.97			100	黄铁矿
9	M-88	62.87	25.64	9.01	1.76			0.72		100	沥青铀矿
10	M-81	65.22	23.43	3.72	2.05	2.13	2.78	0.68		100	沥青铀矿
11	M-81					54.04	45.96			100	黄铁矿
12	M-81	62.96	27.89	7.46	0.97			0.72		100	沥青铀矿
13	M-81					53.97	46.03			100	黄铁矿
14	M-81	56.26	32.62	8.25	1.95			0.92		100	沥青铀矿
15	M-5					53.44	46.56			100	黄铁矿
16	M-5					55.18	44.82			100	黄铁矿

萤石型铀矿石的成矿期脉石矿物主要为晶体细小的萤石(图 3),常可见石英、方解石等脉石矿物与其共生(图 6a、6b、6c),金属矿物主要包括铀矿物(沥青铀矿、铀石、钛铀矿等)、黄铁矿等。显微观察显示,铀矿物主要产于独立的萤石型矿脉的两壁,脉体中心部位以脉石矿物萤石为主,也可见其中混生有铀矿物、黄铁矿;黄铁矿主要呈良好的晶形分布于两壁铀矿物的外侧,与脉体平行展布,也可见产于脉体中心(图 3a、3b)。扫描电镜结果表明,沥青铀矿与黄铁矿或一起生长于萤石颗粒间(图 6a),或各自相对独立生长于脉石矿物萤石与石英颗粒之间(图 6b、6c),沥青铀矿周缘通常被石英薄膜包裹(图 6a)。沥青铀矿与黄铁矿之间、沥青铀矿或黄铁矿与萤石、石英等成矿期脉石矿物之间界线平直、镶嵌共生,喻示铀矿物、黄铁矿与脉石矿物三者为同期共结

晶的成因关系。

硅质脉型铀矿石的成矿期脉石矿物主要为结晶程度不一的微晶或玉髓状石英(图 4a、4c),往往可见方解石或萤石等脉石矿物与其共生,金属矿物主要为铀矿物(沥青铀矿、铀石、钛铀矿等)、黄铁矿等。显微与扫描电镜研究表明,在脉体中,沥青铀矿或生长于含矿脉体的中间,两壁为微晶石英(图 4a、4b)或与黄铁矿各自呈独立态(表 1,图 4c、4d,图 6d)或沥青铀矿与黄铁矿呈集合态(图 6e)共生长于石英颗粒间,与石英晶体颗粒平整接触(图 6d);含矿脉体中黄铁矿晶形完好(图 4c、4d,图 6d),且与沥青铀矿之间,或与微晶石英晶体之间,同样表现出相互间平直接触的共生长属性。

碎裂蚀变岩型铀矿石(红化型)以赋矿岩性为碎裂状(或碎砾状、碎粉状)花岗岩、具特征性暗红色为

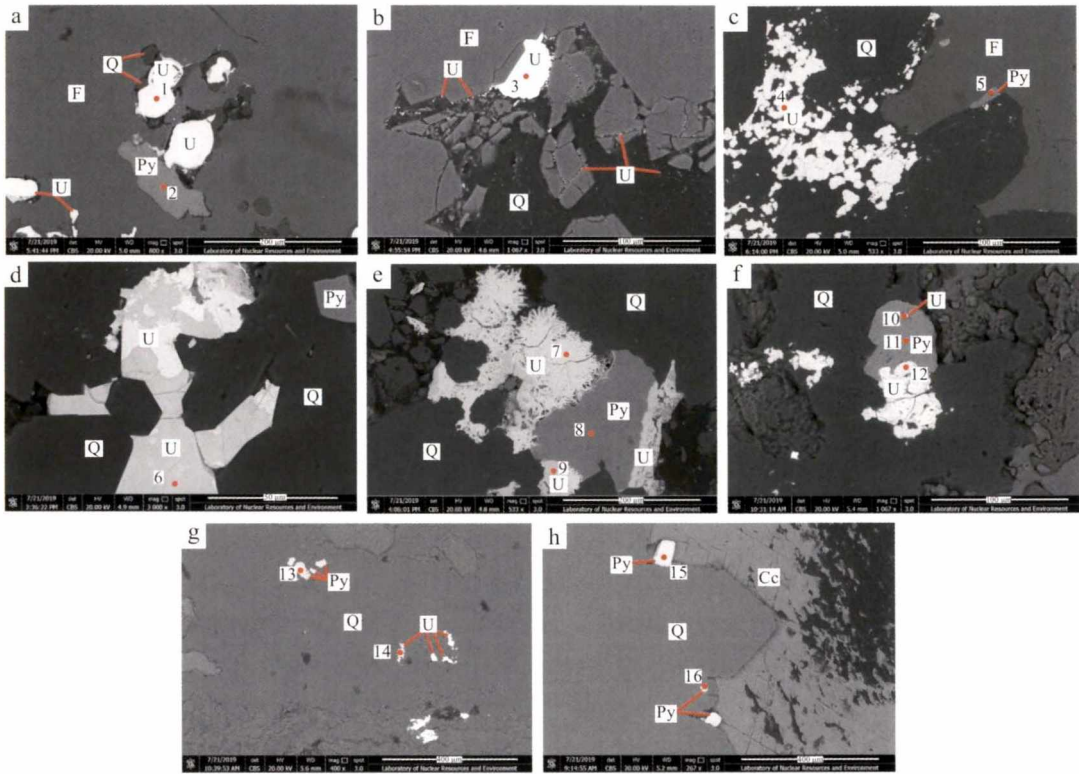


图 6 棉花坑铀矿石扫描电镜背散射特征

Fig. 6 Scanning electron microscope backscattering characteristics of uranium ore in Mianhuakeng

a—萤石型铀矿石中沥青铀矿、黄铁矿共结晶于萤石晶体间,沥青铀矿外围有微晶石英薄膜包裹,样品号 M-1; b—生长于萤石与石英晶体之间的沥青铀矿与黄铁矿,样品号 M-62; c—生长于萤石与石英晶体之间的黄铁矿,样品号 M-62; d—硅质脉型铀矿石中独立态的沥青铀矿和黄铁矿镶嵌于微晶石英间,沥青铀矿与黄铁矿、石英晶体间界线清晰、平整,样品号 M-82; e—沥青铀矿与黄铁矿集合体镶嵌于微晶石英晶体间,边界清晰平直,沥青铀矿、黄铁矿、石英晶体间界线清晰、平整,样品号 M-88; f、g—蚀变岩型铀矿石中,沥青铀矿与黄铁矿镶嵌生长或各自独立态分布于微晶石英脉中,样品号 M-81; h—结晶于成矿期石英与方解石矿物间的晶形完整的黄铁矿,样品号 M-5; F—萤石; Q—石英; U—沥青铀矿; Py—黄铁矿; Cc—方解石; 1~16—测量点编号

a—pitchblende and pyrite co-crystallizing between fluorite crystals, and the pitchblende surrounded by microcrystalline quartz film in fluorite type uranium ore, sample M-1; b—pitchblende and pyrite growing between fluorite and quartz crystals, sample M-62; c—pyrite growing between fluorite and quartz crystals, sample M-62; d—independent pitchblende and pyrite embedded between microcrystalline quartz grains in the siliceous vein type uranium ore, sample M-82; e—pitchblende and pyrite aggregates embedded between microcrystalline quartz crystals, the boundaries between pitchblende, pyrite and quartz crystals being clear and straight, sample M-88; f, g—pitchblende and pyrite embedded or independently distributed in microcrystalline quartz veins in altered rock type ores, sample M-81; h—pyrite with good crystal type crystallized between quartz and calcite minerals in the mineralization stage, sample M-5; F—fluorite; Q—quartz; U—pitchblende; Py—pyrite; Cc—calcite; 1~16—measuring point number

特点(图 5)。碎裂状花岗岩强烈遭受成矿流体作用(硅化、萤石化或碳酸盐化、黄铁矿化和伊利石化、绿泥石化等),角砾之间被成矿流体形成的微晶石英、萤石、方解石等脉石矿物充填。显微研究发现,矿石呈特征性暗红色主要是因蚀变长石颗粒内部或粉末状岩石碎屑被云雾状红色浸染所致(图 5a、5b)。铀矿物既可呈细脉状、浸染状赋存于岩石角砾的裂隙内,也可与充填于角砾之间的微晶石英、萤石、方解石等脉石矿物密切共生。需要特别说明的,红色区域也是微细颗粒的铀矿物密集分布的区域(图 5d)。

扫描电镜分析清晰表明,在红色区域以及成矿流体成因的微晶石英、萤石、碳酸盐矿物充填细脉内均分布有晶形完好的黄铁矿(图 5d,图 6f、6g、6h);铀矿物既可包裹于黄铁矿内部,或与黄铁矿镶嵌共生(图 6f),也可见呈各自独立态分布于微晶石英、萤石、方解石矿物颗粒间(图 6g),或包裹于脉石矿物颗粒内部(图 6f)。

基于上述研究,棉花坑矿床铀矿物与黄铁矿共生关系可概括如下:铀矿物或赋存于脉状充填矿石的中心部位,或赋存于脉状充填矿石的两壁,或与成

矿期脉石矿物相间排列;或呈细脉状、浸染状赋存于碎裂蚀变花岗岩内;或与成矿期脉石矿物(包括方解石、萤石、微晶石英)镶嵌生长;铀矿物与黄铁矿以集合态或相对独立态密切共生,两者之间及其与成矿期脉石矿物晶体之间界线平直,晶形完好,镶嵌生长,喻示矿石中黄铁矿与铀矿物均为成矿流体作用产物,具有同源流体共结晶特点。

4 铀沉淀成矿方式探讨

按照传统理论观点,花岗岩型铀矿沉淀成矿作用的方式是铀在成矿流体中以6价态铀酰络合物形式搬运和迁移的,当遇到还原物质时,6价态铀被还原成4价态铀,进而流体态铀被沉淀固定、富集成矿。

依据化学理论,还原与被还原作用过程的成立,是建立在包含还原剂的物质体系与被还原的物质体系属于两个独立体系的基础上,即包含还原剂的物质体系先存在,当相对氧化的物质体系遇到包含还原剂、先期形成的物质体系时,两体系之间发生氧化还原反应,结果导致氧化体系中的氧化态物质被还原体系中的还原剂还原,同时还原体系中的还原剂由于还原作用需提供电子而自身受到一定程度的氧化。

依据棉花坑矿床赋矿地质环境以及赋矿围岩为印支或燕山期花岗岩的地质事实,可推断在棉花坑花岗岩型铀矿床成矿作用过程中,唯一可能将成矿流体中6价态铀还原为4价态铀的还原物质应该是黄铁矿。换言之,当具有富含6价态铀离子的氧化态成矿流体,沿断裂破碎带进入富含黄铁矿还原剂的花岗岩体系时,两体系之间发生氧化还原反应,结果导致成矿流体中6价态铀离子被黄铁矿还原,而黄铁矿在将6价态铀还原为4价态铀的过程,由于自身需提供电子而受到一定程度的氧化。

据此推理,如果传统的花岗岩型铀矿中铀的还原沉淀成矿机制成立,那么需满足以下条件:首先,导致棉花坑矿床铀成矿作用的成矿流体应属于氧化性质;其次,成矿流体的运移过程应该是由“相对开放的氧化体系”运移至“先期存在的相对还原体系”;再其次,铀矿体赋存的原始周边环境(即赋矿围岩环境)在成矿作用发生之前应该属于相对封闭的还原体系;最后,作为还原剂黄铁矿需形成于成矿流体之外的还原体系,其形成时间要明显早于成矿流体

及铀沉淀成矿期,铀成矿期应是还原体系中黄铁矿的消耗期,成矿期不应该形成新生黄铁矿。

近年来,众多学者对华东南地区与花岗岩或火山岩相关的热液型铀成矿流体来源开展了深入研究与探讨,不同角度获得的相关地球化学证据与地质事实表明成矿流体来自地壳深部,或与壳幔作用源区或地幔物质密切有关的认识,已逐渐成为广大铀矿地质工作者的共识(Pirajno, 2000; 杜乐天, 2001; 范洪海等, 2001; 姜耀辉等, 2004; 毛景文等, 2005; Jiang *et al.*, 2006; 李子颖, 2006; Hu *et al.*, 2009; 王正其等, 2013, 2007; 张涛等, 2020)。

相关学者对棉花坑矿床铀成矿流体开展了示踪研究。张国全等(2008)、朱捌(2010)依据成矿期方解石碳同位素研究结果($\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-9.3\text{‰} \sim -5.3\text{‰}$),认为矿化剂 ΣCO_2 主要源自岩石圈伸展导致的地幔去气。沈渭洲等(2010)研究认为,棉花坑矿床成矿流体的氢同位素($\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值平均为 -75‰)、氧同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值平均为 3.9‰)、碳同位素($\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-8.4\text{‰} \sim -5.3\text{‰}$)以及成矿期脉石矿物萤石的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值(0.714 74~0.716 97)一致反映成矿流体主要由地幔流体组成。张国全等(2010)测得成矿期萤石、方解石流体包裹体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为0.03~0.57 Ra, 庞雅庆等(2019)基于成矿期萤石、方解石和黄铁矿流体包裹体测得 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为0.021~1.543 Ra, 两者结果均高于地壳 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 特征值(0.01~0.05 Ra),显示棉花坑矿床铀成矿流体中有地幔流体的参与。此外,高翔等(2011)对该矿床的围岩蚀变开展了岩石地球化学分析,蚀变带岩石的稀土元素总量(173.2×10^{-6})高于赋矿围岩长江岩体的稀土元素总量(160.2×10^{-6}),提出成矿流体可能是由富含 ΣCO_2 的地幔流体组成。上述认识与仅仅依赖大气降水或壳源热液难以支持铀矿石中发育大量的萤石、方解石和磷灰石等的地质事实相互印证。

壳幔作用源区或岩石圈地幔位于岩石圈下部,是一个相对封闭的还原体系。基于上述棉花坑铀矿床成矿流体与深部壳幔作用源区或岩石圈地幔相关的研究成果,有理由推断棉花坑矿床成矿流体更可能具有还原性质。这也可以从成矿流体包裹体中含有 CO 、 CH_4 、 H_2 等还原性气体组分得到佐证(倪师军等, 1994; 欧光习等, 2000)。由此认为,支撑棉花坑矿床中铀还原沉淀富集成矿机制成立的第1个要素条件不具备。

第2,基于棉花坑矿床铀成矿流体与地幔流体相

关的认识以及铀矿体赋存于地壳浅部近乎直立断裂带中的地质特征,可确定成矿流体运移过程是由深部(幔源或壳幔作用源区)走向浅部(现今矿体赋存部位),也即是一个由相对还原的封闭环境走向浅部相对开放环境的过程。显然,这个过程与传统铀还原沉淀成矿机理需要满足“相对氧化的成矿流体体系”运移至“先期存在的相对还原体系”的条件(第2个要素条件)是相矛盾的。

第3,基于花岗岩中通常含有一定含量黄铁矿的地质事实,就一定程度而言,可以在成矿流体进入之前的花岗岩区域归属于相对还原体系。此属性似乎与前述的第3个要素条件相吻合。但分析认为,由于第1个要素条件不具备,该要素条件的意义显得无足轻重。何况,成矿流体主要通过断裂或裂隙带由深部向上运移和充填,这些位于地壳浅部的断裂与裂隙更可能具有一定程度的开放性。虽然花岗岩本身可能具有还原属性,但流体运移的通道及其附近(断裂带、裂隙带内及其附近)区域则有可能因为来自地表潜水的下渗而体现出相对开放的氧化环境属性。

第4,棉花坑矿床铀矿体周围通常发育特征的伊利石化、绿泥石化蚀变带,蚀变带内往往发育大量的黄铁矿,且表现出蚀变越强,黄铁矿含量越多,说明蚀变带内发育的大量黄铁矿是成矿流体作用导致围岩蚀变过程形成,也即这些黄铁矿是成矿流体作用的产物,而非成矿流体作用之前原始花岗岩的产物。此外,前文表明,棉花坑矿床不同类型铀矿石中,铀矿物或赋存于脉状充填矿石的中心部位,或赋存于脉状充填矿石的两壁,或与成矿期脉石矿物相间排列,或呈细脉状、浸染状赋存于碎裂蚀变花岗岩内,或与成矿期脉石矿物(包括方解石、萤石、微晶石英)镶嵌生长。黄铁矿与铀矿物以集合态或相对独立态密切共生,两者之间及其与成矿期脉石矿物晶体之间界线平直,晶形完好,镶嵌生长,黄铁矿未表现出因还原六价态铀需要提供电子而自身被氧化的痕迹。据此,可确定铀矿石中存在的大量黄铁矿与成矿期形成的方解石、萤石和微晶石英以及铀矿物等,均为成矿流体同期共结晶的产物,而非属于两个相对独立的物质体系,两者不存在先后关系。由此可见,前述需具备的第4个要素条件也不具备。

综上所述,传统的花岗岩型铀矿中铀还原沉淀成矿机制成立需具备的4个要素条件,在棉花坑铀矿床成矿体系中均不具备。既然黄铁矿与沥青铀矿

均为成矿流体的产物,两者的形成不存在先后关系,自然也就不存在还原与被还原的关系;花岗岩型铀成矿作用过程中铀沉淀成矿主要受氧化还原作用制约的观点值得商榷。

棉花坑矿床铀成矿流体成分上以富含F、C、S、Si、P等溶剂组分为特点,依赖表生流体深循环过程难以形成上述组分特点的成矿流体,并且示踪研究显示其来源与地幔流体密切相关。地幔流体通常具有高温、高压、超临界性质和还原属性,此条件下,铀元素很难被氧化并以 U^{6+} 形式迁移。超临界态流体具有独特的溶解、萃取和输运能力。处于超临界态成矿流体中的铀地球化学行为与常规温度、压力条件下的实验研究和热力学计算结果势必存在偏差,因此基于常规温度、压力试验条件下获得的“铀6价态迁移,4价态沉淀成矿”基础理论难以适用于与地幔流体相关的花岗岩型铀成矿作用。

还原条件下4价铀的溶解性问题,有学者开展过基于不同条件的实验研究。Timofeev等(2018)实验表明,在酸性卤水(主要成分NaCl)、温度大于 $100^{\circ}C$ 和饱和水蒸气压力条件下,铀可以 UCl_4 络合物形式在还原性流体中溶解,并随着温度依次升至 250 和 $350^{\circ}C$,溶液中 UCl_4 浓度明显升高。Romberger(1984)实验证明,在含有 CO_2 和F组分的溶液中,当pH值低于5且 f_{O_2} 极低状态下,溶液中可以形成稳定的4价铀的氟配合物(UF_2^{2+} 或 UF_4)。 UF_4 虽然是难溶的,但 UF_4 和碳酸盐作用能生成易溶络合物 $[UF_2(CO_3)_3]^{4-}$ (张景廉等,2005)。Giblin和Appleyard(1987)研究也表明,在无氧供给、较高温度下,沥青铀矿可以在卤水溶液中溶解。刘正义等(1982)将晶质铀矿置于pH=1.15的KCl+Al(OH)₃溶液中,在 $400^{\circ}C$ 、40 MPa条件下,溶液中U含量可达 130×10^{-6} ,表明较高温度、压力条件下,含碱金属及铝的卤化物的酸性溶液对铀的活化迁移是非常有利的。Liu(1989)实验发现,在 $200^{\circ}C$ 、25 MPa含铀的碳酸盐-硫化物热液和碳酸盐-硫化物-硅酸盐热液中,当热液中 CO_2 浓度降低到一定程度时,沥青铀矿沉淀明显增强,表明含铀热液适度的减压沸腾对铀成矿是有利的。

基于棉花坑矿床铀矿物与黄铁矿及方解石、萤石、微晶石英等脉石矿物共结晶特点和上述实验认识,提出花岗岩型铀沉淀成矿的可能机制是:与壳幔作用源区或岩石圈地幔相关的成矿流体,通常具有超临界性质和还原属性,成分上以富含F、C、Si等溶

剂组分为特点;超临界流体中铀元素可以4价铀形式与上述溶剂形成络合物活化、迁移;当成矿流体自深部运移到地壳浅部一定的构造部位时,或由于与表生下渗水混合,或由于成矿流体的沸腾隐爆作用,诱发温度、压力等物化条件发生显著变化,成矿流体中方解石、萤石及石英等矿物结晶致使成矿流体过饱和,导致铀矿物、黄铁矿等组分结晶沉淀;减压、温度下降导致成矿流体pH值、溶解度(饱和度)变化,是制约相关脉石矿物以及铀矿物、黄铁矿等相继结晶沉淀的主要因素;铀沉淀成矿与氧化还原作用无关。

5 结论

棉花坑矿床不同类型铀矿石中,铀矿物、黄铁矿与方解石、萤石、微晶石英等成矿期脉石矿物均表现出相似的镶嵌共生关系,为成矿流体共结晶产物;认为以地幔等深部流体为主的花岗岩型铀矿成矿作用中,铀沉淀成矿与氧化还原作用无关,减压、温度下降以及成矿流体pH值、溶解度(饱和度)变化,是制约铀矿物以及相关脉石矿物结晶沉淀的主要因素。

References

- Castor S B and Henry C D. 2000. Geology, geochemistry and origin of volcanic rock-hosted uranium deposits in northwestern Nevada and southeastern Oregon[J]. *Ore Geology Reviews*, 16: 1~40.
- Chabiron A, Cuney M, Poty B, *et al.* 2003. Possible uranium sources for the largest uranium district associated with volcanism — The Strel'tsovka caldera (Transbaikalia Russia) [J]. *Mineralium Deposita*, 38 (2): 127~140.
- Dahlkamp F J. 1993. *Uranium Ore Deposits* [M]. Verlag Heidelberg: Springer, 118~122.
- Deng Ping, Shen Weizhou, Ling Hongfei, *et al.* 2003. Uranium mineralization related to mantle fluid: A case study of the Xianshi deposit in the Xiangzhaung uranium orefield[J]. *Geochemica*, (6): 520~528 (in Chinese with English abstract).
- Du Letian. 1996. *Geochemistry of Mantle Fluids and Asthenosphere (Asthenoliths)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~16 (in Chinese with English abstract).
- Du Letian. 2001. The Basic Metallogenic Criteria of Hydrothermal Uranium Deposits in China and the General Hydrothermal Metallogeny [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 57~110, 151~237 (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]. *University Geological Journal*, (2): 139~145 (in Chinese with English abstract).
- Gao Xiang, Shen Weizhou, Liu Lili, *et al.* 2011. Geochemical characteristics and causes of wall rock alteration in the No. 302 uranium deposit, northern Guangdong [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30 (1): 71~82 (in Chinese with English abstract).
- Giblin A M and Appleyard E C. 1987. Uranium mobility in non-oxidizing brines: Field and experimental evidence [J]. *Applied Geochemistry*, 2: 285~295.
- Hu R Z, Burnad P G, Bi X W, *et al.* 2009. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China; Evidence from He, Ar and C isotopes [J]. *Chemical Geology*, 266: 86~95.
- Hu Ruizhong and Jin Jingfu. 1990. Mechanism of the migration and deposition of uranium in ascending hydrothermal solutions—Evidence from the Xiwang uranium deposit [J]. *Geological Review*, 36(4): 317~325 (in Chinese with English abstract).
- Huang Guolong, Liu Xinyang, Sun Liqiang, *et al.* 2014. Zircon U-Pb dating, geochemical characteristic and genesis of the Changjiang granite in northern Guangdong [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(5): 836~849 (in Chinese with English abstract).
- Huang Guolong, Yin Zhengping, Ling Hongfei, *et al.* 2010. Formation age, geochemical characteristics and genesis of pitchblende from No. 302 uranium deposit in northern Guangdong [J]. *Mineral Deposits*, 29 (2): 352~360 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong and Ling Hongfei. 2004. Mantle-derived fluids and uranium mineralization [J]. *Earth Science Frontiers*, 11 (2): 491~499 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Y H, Ling H F and Jiang S Y. 2006. Trace element and Sr-Nd isotope geochemistry of fluorite from the Xiangshan uranium deposit southeast China [J]. *Economic Geology*, 101(8): 1 613~1 622.
- Li Yanhe, Duan Chao, Zhao Yue, *et al.* 2016. The role of oxidizing reducing barrier in mineralization of hydrothermal uranium ore [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 201~218 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyong. 2006. Hostspot uranium metallogenesis in South China [J]. *Uranium Geology*, 22 (2): 65~69 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyong, Li Xiuzhen and Lin Jinrong. 1999. On the meso-cenozoic mantle plume tectonics, its relationship to uranium metallogenesis and prospecting directions in south China [J]. *Uranium Geology*, 15(1): 9~17 (in Chinese with English abstract).
- Ling Hongfei. 2011. Origin of hydrothermal fluids of granite-type uranium

- deposits; Constraints from redox conditions[J]. *Geological Review*, 57(2): 193~206(in Chinese with English abstract).
- Liu Z Y. 1989. Experiment on concentration mechanism of uranium in hydrothermal solutions[A]. *Progress in Geosciences of China (1985~1988)-Paper to 28th IGC[C]*. V, II: 29~34.
- Liu Zhengyi, Liu Jifang, Zhang Xuezhi, *et al.* 1982. Activation of uranium and its prospecting significance in hydrothermal uranium deposit [J]. *Radioactive Geology*, (6): 488~494(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Li Xiaofeng, Zhang Ronghua, *et al.* 2005. Deep Fluid Metallogenic System[M]. Beijing: China Land Press, 199~218(in Chinese with English abstract).
- Montreuil J F, Corriveau L and Potter E G. 2015. Formation of albitite-hosted uranium within IOCG systems; The Southern Breccia, Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada [J]. *Mineral Deposit*, 50: 293~325.
- Ni Shijun, Hu Ruizhong and Jin Jingfu. 1994. A vertical zoning model generated by the mixing and boiling of hydrothermal solution for uranium deposit No. 302[J]. *Uranium Geology*, 10(2): 70~77(in Chinese with English abstract).
- Ou Guangxi, Chen Anfu, Cui Jianyong, *et al.* 2000. Uranium metallogenic model related to CO₂ and hydrocarbon in granite type uranium deposits[A]. *China Nuclear Science & Technology[C]*. 1~16 (in Chinese with English abstract).
- Pang Yaqing, Fan Honghai, Gao Fei, *et al.* 2019. Helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions and tracing to the source of ore-forming fluids for the southern Zhuguang uranium ore field in northern Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2765~2773(in Chinese with English abstract).
- Parks G A and Pohl D C. 1988. Hydrothermal solubility of uraninite[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 863~875.
- Pirajno F. 2000. *Ore Deposit and Mantle Plumes*[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 556.
- Romberger S B. 1984. Transport and deposition of uranium in hydrothermal systems at temperatures up to 300, geochemical implications[A]. Devivo B. *Uranium Geochemistry, Mineralogy, Geology, Exploration and Resources*, IMM[C]. 12~17.
- Shang Pengqiang, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, *et al.* 2006. Study on carbon and oxygen isotopes in granite-type hydrothermal uranium deposits: A case of the Xia Zhuang uranium orefield in northern Guangdong [J]. *J. Mineral Petrol.*, 26(3): 71~76 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Ling Hongfei, Deng Ping, *et al.* 2010. Study on isotope geochemistry of uranium deposit 302 in northern Guangdong Province [J]. *Uranium Geology*, 26(2): 80~87 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Ling Hongfei, Sun Tao, *et al.* 2009. Mantle fluid metallogeny of granite-type uranium deposits in northern Guangdong[A]. *Progress Report on China Nuclear Science & Technology[C]*. 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Timofeev A, Migdisov A A, Williams-Jones A E, *et al.* 2018. Uranium transport in acidic brines under reducing conditions[J]. *Nature Communications*, 9(1): 1469.
- Wang Zhengqi and Li Ziyong. 2007. Discussion on mantle-derived uranium mineralization[J]. *Geological Review*, 53(5): 608~615 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengqi and Li Ziyong. 2016. The Mesozoic Magmatism and Its Constrains on Uranium Metallogenesis in XinLu Volcanic Basin, Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 104~105 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengqi, Li Ziyong and Tang Jiangwei. 2013. Deep geodynamic mechanism of the volcanic-type uranium mineralization in XinLu Basin, Western Zhejiang Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(5): 703~714(in Chinese with English abstract).
- Wu Dehai, Xia Fei, Pan Jiayong, *et al.* 2019. Characteristics of hydrothermal alteration and material migration of Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2745~2764 (in Chinese with English abstract).
- Xu Junjian and Shao Feihua. 2015. Review of study on transportation and deposition mechanisms of re-forming element for granite type uranium deposit in South China[J]. *World Nuclear Geoscience*, 32(2): 132~138 (in Chinese with English abstract).
- Yu Dagan, Wu Rengui and Chen Peirong. 2005. *Uranium Geology*[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 300~350(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guoquan, Hu Ruizhong, Jiang Guohao, *et al.* 2010. Mantle derived volatile components involved in uranium mineralization; Evidence from He isotopes of the No. 302 uranium deposit [J]. *Geochimica*, 39(4): 386~395(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guoquan, Hu Ruizhong, Shang Pengqiang, *et al.* 2008. Study on the C-O isotopic composition of calcites and metallogenic dynamics background in the No. 302 uranium deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(4): 413~420(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongxiang, Xu Zhifang, Huang Zhilong, *et al.* 2000. The primary characters and origin of mantle fluids[J]. *Geology-Geochemistry*, 28(2): 1~5(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinglian, Zhou Lumin and Huang Keling. 2005. *Uranium Mineral-Solution Equilibrium* [M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 55~124(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tao, Huang Hongye, Li Jie, *et al.* 2020. In situ micro-determina-

- tion on ore-bearing minerals, geochemical characteristics of REE and their constraints on ore-forming fluids in the Xiangyangping uranium deposit, northern Guangxi[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(4): 423~440(in Chinese with English abstract).
- Zhong Fujun, Yan Jie, Xia Fei, *et al.* 2019. In-situ U-Pb isotope geochronology of uraninite for Changjiang granite-type uranium ore field in northern Guangdong, China: Implications for uranium mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2 727~2 744(in Chinese with English abstract).
- Zhu Ba. 2010. The Study of Mantle Liquid and Uranium Metallogenesis-take Uranium Ore Field of South Zhuguang Mountain as An Example [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 86 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 邓平, 沈渭洲, 凌洪飞, 等. 2003. 地幔流体与铀成矿作用: 以下庄矿田仙石铀矿床为例[J]. *地球化学*, (6): 520~528.
- 杜乐天. 1996. 地幔流体与软流层(体)地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 10~16.
- 杜乐天. 2001. 中国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学[M]. 北京: 原子能出版社, 57~110, 151~237.
- 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*, (2): 139~145.
- 高翔, 沈渭洲, 刘莉莉, 等. 2011. 粤北302铀矿床围岩蚀变的地球化学特征和成因研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(1): 71~82.
- 胡瑞忠, 金景福. 1990. 上升热液浸取成矿过程中铀的迁移沉淀机制探讨——以希望铀矿床为例[J]. *地质论评*, 36(4): 317~325.
- 黄国龙, 刘鑫扬, 孙立强, 等. 2014. 粤北长江岩体的锆石U-Pb定年、地球化学特征及其成因研究[J]. *地质学报*, 88(5): 836~849.
- 黄国龙, 尹征平, 凌洪飞, 等. 2010. 粤北地区302矿床沥青铀矿的形成时代地球化学特征及其成因研究[J]. *矿床地质*, 29(2): 353~360.
- 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): 491~496.
- 李延河, 段超, 赵悦, 等. 2016. 氧化还原障在热液铀成矿中的作用[J]. *地质学报*, 90(2): 201~218.
- 李子颖. 2006. 华南热点铀成矿作用[J]. *铀矿地质*, 22(2): 65~69.
- 李子颖, 李秀珍, 林锦荣. 1999. 试论华南中生代地幔柱构造、铀成矿作用及其找矿方向[J]. *铀矿地质*, 15(1): 9~17.
- 凌洪飞. 2011. 论花岗岩型铀矿床热液来源: 来自氧逸度条件的制约[J]. *地质论评*, 57(2): 193~206.
- 刘正义, 刘吉芳, 张学志, 等. 1982. 热液铀矿床中铀的活化及其找矿意义[J]. *放射性地质*, (6): 488~494.
- 毛景文, 李晓峰, 张荣华, 等. 2005. 深部流体成矿系统[M]. 北京: 中国大地出版社, 199~218.
- 倪师军, 胡瑞忠, 金景福. 1994. 302铀矿床热液的混合和沸腾垂直分带模式[J]. *铀矿地质*, 10(2): 70~77.
- 欧光习, 陈安福, 崔建勇, 等. 2000. 花岗岩型铀矿床中碳氢化合物的铀成矿模式[A]. 中国核科技报告[C]. 1~16.
- 庞雅庆, 范洪海, 高飞, 等. 2019. 粤北诸广南部铀矿田流体包裹体的氦同位素组成及成矿流体来源示踪[J]. *岩石学报*, 35(9): 2 766~2 772.
- 商朋强, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 2006. 花岗岩型热液铀矿床C、O同位素研究——以粤北下庄铀矿田为例[J]. *矿物岩石*, 26(3): 71~76.
- 沈渭洲, 凌洪飞, 邓平, 等. 2010. 粤北302铀矿床同位素地球化学研究[J]. *铀矿地质*, 26(2): 80~87.
- 沈渭洲, 凌洪飞, 孙涛, 等. 2009. 粤北花岗岩型铀矿的地幔流体成矿作用[A]. 中国核科学技术进展报告[C]. 1~12.
- 王正其, 李子颖. 2007. 幔源铀成矿作用探讨[J]. *地质论评*, 53(5): 608~614.
- 王正其, 李子颖. 2016. 浙江新路盆地中生代岩浆作用于铀成矿深部动力学过程[M]. 北京: 地质出版社, 104~105.
- 王正其, 李子颖, 汤江伟. 2013. 浙西新路盆地火山岩型铀成矿的深部动力学机制[J]. *地质学报*, 87(5): 703~714.
- 吴德海, 夏菲, 潘家永, 等. 2019. 粤北棉花坑铀矿床热液蚀变与物质迁移研究[J]. *岩石学报*, 35(9): 2 745~2 764.
- 许健俊, 邵飞华. 2015. 华南花岗岩型铀成矿元素运移及沉淀机理研究综述[J]. *世界核地质科学*, 32(2): 132~138.
- 余达淦, 吴仁贵, 陈培荣. 2005. 铀资源地质学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 102.
- 张国全, 胡瑞忠, 蒋国豪, 等. 2010. 幔源挥发性组分参与302铀矿床成矿作用的氦同位素证据[J]. *地球化学*, 39(4): 386~395.
- 张国全, 胡瑞忠, 商朋强, 等. 2008. 302铀矿床方解石C-O同位素组成与成矿动力学背景研究[J]. *矿物学报*, 28(4): 413~420.
- 张鸿翔, 徐志方, 黄智龙, 等. 2000. 地幔流体基本特征及成因[J]. *地质地球化学*, 28(2): 1~5.
- 张景廉, 周鲁民, 黄克玲. 2005. 铀矿物-溶液平衡[M]. 北京: 原子能出版社, 55~124.
- 张涛, 黄宏业, 李杰, 等. 2020. 桂北向坪铀矿床矿石矿物LA-ICP-MS原位稀土元素地球化学特征及其对成矿流体的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 39(4): 423~440.
- 钟福军, 严杰, 夏菲, 等. 2019. 粤北长江花岗岩型铀矿田沥青铀矿原位U-Pb年代学研究及其地质意义[J]. *岩石学报*, 35(9): 2 727~2 744.
- 朱捌. 2010. 地幔流体与铀成矿作用研究——以诸广山南部铀矿田为例[D]. 成都: 成都理工大学, 86.