

DOI:10.3969/j.issn.1000-0658.2023.39.001

# 华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿 共性特征与形成机制

林锦荣<sup>1</sup>,李子颖<sup>1</sup>,胡志华<sup>1</sup>,兰青<sup>2</sup>,王勇剑<sup>1</sup>,陶意<sup>3</sup>,刘政国<sup>1</sup>

(1.核工业北京地质研究院 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室,北京 100029; 2.中国科学院 地球化学研究所,贵州 贵阳 550081; 3.中广核铀业发展有限公司,北京 100029)

**[摘要]** 文章通过相山矿田火山岩型、诸广地区花岗岩型热液铀矿成矿特征、成矿流体成分、成矿条件、成矿时代、铀矿成因、控矿因素等综合对比研究,总结了华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿成矿的异同,认为火山岩型与花岗岩型热液铀矿具有相似的成矿特征、相似的成矿流体成分、相似的成矿条件、相近的成矿时代、相同的成因、相似的控矿因素等共性特征,热液型铀矿成矿具有深源性,深源成矿流体为还原性成矿流体;火山岩型、花岗岩型热液铀矿差异性特征主要表现在围岩成分的不同,蚀变元素组合和成矿元素组合的差异性;火山岩型、花岗岩型热液铀矿同属于华南中-新生代岩浆作用、构造活动、热液铀成矿系统,铀成矿作用形成于华南中-新生代统一的深部地球动力学大地构造背景,具有统一的形成机制。

**[关键词]** 火山岩型铀矿; 花岗岩型铀矿; 共性特征; 形成机制; 深源性

**[文章编号]** 1000-0658(2023)01-0001-15 **[中图分类号]** P619.14 **[文献标志码]** A

华南热液铀矿主要为火山岩型、花岗岩型和碳硅泥岩型等3种类型,火山岩型铀矿床是指在成因上、时间上和空间上与火山岩密切相关的热液铀矿床<sup>[1]</sup>,可产于火山盆地及其基地围岩中;花岗岩型铀矿床是指与花岗岩体有紧密空间关系和成因关系的热液铀矿床<sup>[1]</sup>,可产于花岗岩体内、外带和上叠盆地中。华南地区发育有大量火山岩型和花岗岩型铀矿(图1)。

华南火山岩型铀矿田包括相山矿田、盛源矿田、大洲矿田、仁差矿田、白面石矿田、河草坑矿田等,华南花岗岩型铀矿田包括诸广山复

式岩体南部矿田、鹿井矿田、下庄矿田、河源矿田、桃山矿田、苗儿山矿田、大湾矿田等。相山矿田、诸广地区是华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿的典型代表。目前,华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿成矿地质特征、形成构造背景等方面已有大量研究<sup>[2-8]</sup>,但关于这两种类型的共性特征及统一形成机制研究较少。

笔者以相山矿田火山岩型、诸广地区花岗岩型铀矿为例,通过对比研究,探讨华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿共性特征与成矿机制,为热液铀矿成矿理论研究,火山岩型、花岗岩型铀资源预测评价提供依据。

**[基金项目]** 国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0602600、2017YFC0602601)和国家自然科学基金面上项目(编号:41573051)联合资助。

**[收稿日期]** 2022-03-20 **[改回日期]** 2022-10-02

**[作者简介]** 林锦荣(1963—),男,高级工程师(研究员级),从事铀矿床研究和铀资源预测评价。E-mail: linjr86@163.com

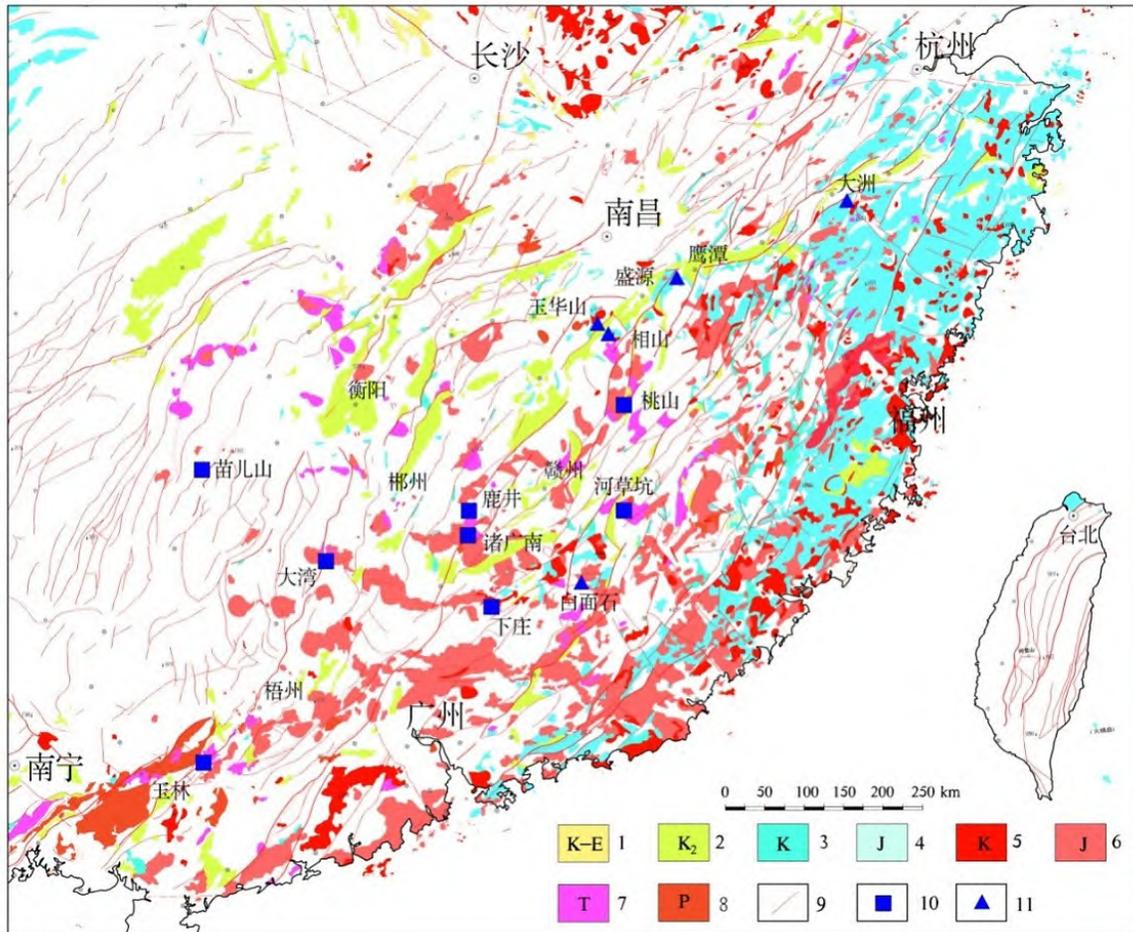


图 1 华南花岗岩型与火山岩型铀矿区域分布图

Fig. 1 Regional distribution of granite rock type and volcanic type uranium deposits in South China

1—白垩纪-古近纪红盆；2—晚白垩世红盆；3—白垩纪火山岩；4—侏罗纪火山岩；5—白垩纪花岗岩；6—侏罗纪花岗岩；7—三叠纪花岗岩；8—二叠纪花岗岩；9—断裂构造；10—花岗岩型铀矿田；11—火山岩型铀矿田。

## 1 区域地质背景

### 1.1 相山矿田

相山矿田已发现铀矿床 25 个,铀矿化普遍伴生有钍、钼、铅、锌、银、铜、金等多金属矿化,铀矿床主要分布在相山火山盆地北部和西部地区。

相山矿田位于北东向赣杭铀成矿带的西南段,中-新生代形成的总体呈北东向的赣杭火山岩成矿带与北北东向展布的大王山-于山花岗岩成矿带的交汇部,北东向抚州-永丰深断裂与北北东向宜黄-安远深断裂及北西向断裂带交汇部。相山火山盆地总体为三层结构,基底主要为中元古界变质岩,部分为下石炭统、上三叠统砂砾岩;基底之上为火山盆地下

白垩统火山岩;盆地北西侧火山岩之上为上白垩统红层覆盖。盆地火山岩主要包括流纹英安岩、碎斑流纹岩,还发育有花岗斑岩、英安斑岩、霏细斑岩、石英二长斑岩,及煌斑岩脉、辉绿岩脉等。流纹英安岩、碎斑流纹岩为相山矿田西部铀矿床铀矿主要围岩,花岗斑岩为相山矿田北部铀矿床铀矿主要围岩。外带基底变质岩、地层也赋矿。相山矿田构造格架由基底构造体系、盖层火山构造体系和盖层断裂构造体系复合构成。基底构造体系主要由北东向、北西向、东西向、南北向 4 组构造组成。盖层火山构造体系由火山机构和火山断陷构造构成。盖层断裂构造体系划分为早期压扭性、成矿期张扭性和晚期压性断裂构造,火山构造体系为叠加于火山机构(组间界面、基底界面等)之上

的早期构造。

## 1.2 诸广地区

诸广地区铀矿床分布于诸广山复式岩体南部和北部(诸广南部矿田和鹿井矿田)。诸广山复式岩体南部矿田内已发现棉花坑、书楼丘、澜河、东坑、城口、塘湾、中村东、中村西等18个铀矿床,诸广山复式岩体北部鹿井矿田内已发现鹿井、黄蜂岭、高昔、沙坝子、牛尾岭等10多个铀矿床。

诸广地区位于桃山-诸广铀成矿带西南段,在大地构造上属于华南板块之华夏地块的中西部,武夷-云开-台湾造山系中的罗霄-云开弧盆系内部的罗霄岩浆弧;区域上处于闽赣后加里东隆起与湘桂粤北海西-印支凹陷的结合部,南北向万祥-诸广、东西向九峰-大余和北东向万长山构造岩浆活动带的交汇部位。区域地层发育比较齐全,除志留系、新近系和大部分地区下泥盆统缺失外,从上元古界至第四系均有出露,其中震旦系、寒武系、泥盆系、石炭系分布较为广泛。该区属于南岭东西向骑田岭-九峰山花岗岩带的一部分,为岩浆多期多阶段活动的巨型复式岩体,为从加里东期到燕山晚期岩浆侵入活动的产物,且以中酸性岩浆活动为主,同时也发育基性岩浆活动。复式岩体主体岩浆岩岩性有黑云母花岗岩、二云母花岗岩、二长花岗岩、云辉二长岩等,基性岩岩性有辉绿岩、煌斑岩、拉辉煌斑岩、辉绿玢岩、闪长玢岩等。诸广山复式岩体初始形成于加里东期,印支期-燕山早期侵入活动达到高峰,构成岩体之主体。燕山晚期主要为少量酸性岩脉和广泛分布的基性岩脉。岩浆岩可划分为加里东期、海西期、印支期、燕山早期和燕山晚期等5期。印支期和燕山期花岗岩与铀矿化关系最为密切,空间上铀矿主要与这两期花岗岩有关。花岗岩为诸广地区铀矿主要围岩。外带基底变质岩、地层也赋矿。

诸广地区铀矿床主要分布在近南北向修水-桂东(万洋山-诸广山)地幔拗陷区及近东西向南岭复杂地幔构造区与北北东-近南北向南昌-赣州地幔隆起区的过渡地带。这些过渡带往往是深大断裂的发育带,也是地幔流体相对发育和活动的地带。这一特殊的大地构造

位置,既是地壳结构的“变异区(带)”,又是铀及其他元素活化迁移的地球化学“变异区(带)”,为花岗岩体形成、演化与构造的发生与发展,铀元素的活化迁移与成矿作用创造了有利的条件。

岩体内断裂构造具有多向性、规模大、活动频繁、性质多变和等间距分布的特点。主要断裂构造有南北向、北西向和北东东向3组。北东东的南雄、塘洞、牛澜、热水断裂、黄坳断裂和北东东向城口断裂,控制了南雄、百顺断陷带和长江、城口复合断陷区、丰州断陷以及桂东断陷的发生和发展,也控制了铀矿的分布。

## 2 火山岩型、花岗岩型热液铀矿共性特征

### 2.1 相似的成矿特征

火山岩型、花岗岩型热液铀矿具有相同铀矿化类型、相同的铀矿化蚀变矿物组合、相似的矿石矿物组合和矿体特征。

#### 2.1.1 铀矿化类型

相山矿田火山岩型热液铀矿矿化类型有碱性铀矿化、酸性铀矿化两种类型<sup>[7,9]</sup>,其中酸性铀矿化划分为萤石型、硅化型<sup>[10]</sup>。诸广地区花岗岩型热液铀矿矿化类型有碱性铀矿化、酸性铀矿化两种类型<sup>[11]</sup>,其中酸性铀矿化划分为红色微晶石英脉型和灰色微晶石英脉型两种类型<sup>[12]</sup>。由此可见,火山岩型、花岗岩型热液铀矿具有相同矿化类型,均可划分为碱性铀矿化、酸性铀矿化两种类型。

#### 2.1.2 蚀变类型及蚀变矿物组合

相山矿田火山岩型热液铀矿铀矿化蚀变可划分为碱性和酸性蚀变两种类型。碱性蚀变矿物组合为钠长石、赤铁矿、绿泥石、碳酸盐;酸性蚀变矿物组合中萤石型酸性铀矿化蚀变组合为水云母、萤石、绿泥石、黄铁矿,硅化型酸性铀矿化蚀变矿物组合为微晶石英、水云母、黄铁矿<sup>[13-18]</sup>。诸广地区花岗岩型热液铀矿铀矿化蚀变可划分为碱性和酸性两种类型。碱性蚀变矿物组合为钠长石、赤铁矿、绿泥石、碳酸盐;酸性蚀变矿物组合中红色微晶石英脉型铀矿化蚀变矿物组合为红色微晶石英、水云

母、绿泥石、赤铁矿,灰色微晶石英脉型铀矿化蚀变矿物组合为灰色微晶石英、水云母、绿泥石、萤石、黄铁矿<sup>[19-20]</sup>。

### 2.1.3 矿石矿物组合

相山矿田火山岩型热液铀矿主要矿石矿物组合为沥青铀矿、钛铀矿、铀石、铀钍石、方钍石<sup>[9-10]</sup>,诸广地区花岗岩型热液铀矿主要矿石矿物组合为沥青铀矿、铀石、铀钍石、方钍石<sup>[21]</sup>。

### 2.1.4 矿体特征

相山矿田火山岩型热液铀矿矿体主要为脉状、细脉状、群脉状<sup>[5,22]</sup>。诸广地区花岗岩型热液铀矿矿体主要为大脉状、细脉状、群脉状<sup>[21]</sup>。两种类型热液铀矿矿体特征相似,均受断裂构造、裂隙构造控制。

## 2.2 相似成矿流体成分

相山矿田灰绿色酸性铀矿化成矿流体气相组分主要为 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub><sup>[5,18,23]</sup>。诸广地区红色微晶石英脉型铀矿化成矿流体气相组分主要为 O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub>,灰色微晶石英脉型铀矿化成矿流体气相组分主要为 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub><sup>[24-25]</sup>。红色微晶石英脉型铀矿化成矿流体气相组分含 O<sub>2</sub>,是由于深源还原性成矿流体在近地表混合了部分氧化性大气降水所致;灰色微晶石英脉型铀矿化成矿流体气相组分富含 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等还原性气体,说明深源成矿流体为还原性成矿流体。由此可见,火山岩型、花岗岩型热液铀矿具有相似成矿流体成分,深源成矿流体为还原性成矿流体。

## 2.3 相似的成矿条件

火山岩型、花岗岩型热液铀矿相似的成矿条件表现在相似的成矿温度、盐度和相同的氧化还原条件。

### 2.3.1 成矿温度、盐度

相山矿田红色碱性铀矿化成矿温度为 240~295 °C,盐度为 6.1%~16.4% NaCl<sub>eqv</sub>;灰绿色酸性铀矿化成矿温度为 167~356 °C,盐度为 2.15%~14.67% NaCl<sub>eqv</sub><sup>[5,18,23]</sup>。诸广地区红色微晶石英脉型铀矿化成矿温度为 163~359 °C,盐度为 2.07%~11.95% NaCl<sub>eqv</sub>;灰色微晶石英脉型铀矿化成矿温度为 148~386 °C,盐度为 0.67%~

10.74% NaCl<sub>eqv</sub><sup>[24-25]</sup>。火山岩型、花岗岩型铀矿成矿流体均为中低温、中低盐度流体。

### 2.3.2 氧化还原条件

通过不同矿化类型铀矿物稀土、微量元素地球化学研究,相山矿田灰绿色酸性铀矿化、诸广地区灰色微晶石英脉型铀矿化均形成于还原条件,蚀变矿物组合中含黄铁矿;相山矿田红色碱性铀矿化、诸广地区红色微晶石英脉型铀矿化均形成于氧化条件,蚀变矿物组合中含赤铁矿<sup>[26]</sup>。

研究表明, Eu、Ce 还原条件下主要以 Eu<sup>2+</sup>、Ce<sup>3+</sup> 形式存在,氧化环境下主要以 Eu<sup>3+</sup>、Ce<sup>4+</sup> 存在,介质环境的氧化还原条件差异导致 Eu、Ce 的富集或亏损<sup>[27]</sup>。相山矿田碱性和酸性铀矿化矿石中铀矿物 U-δEu、U-δCe 关系研究表明(图 2),早期红色碱性铀矿化 Eu 负异常较大、Ce 正异常较大,晚期灰绿色酸性铀矿化 Eu 负异常较小、Ce 正异常较小,反映早期碱性铀矿化成矿条件为氧化条件,氧逸度较高;而晚期酸性铀矿化成矿条件为还原条件,氧逸度较低。诸广地区棉花坑矿床红色微晶石英脉型铀矿化和灰色微晶石英脉型铀矿化矿石中沥青铀矿 U-δEu、U-δCe 关系研究表明(图 3),早期红色微晶石英脉型铀矿化 Eu 负异常较大、Ce 正异常较大,晚期灰色微晶石英脉型铀矿化 Eu 负异常较小、Ce 正异常较小,反映早期红色微晶石英脉型铀矿化成矿条件为氧化条件,氧逸度较高;而晚期灰色微晶石英脉型铀矿化成矿条件为还原条件,氧逸度较低。

火山岩型、花岗岩型热液铀矿形成具有相似的氧化、还原条件。相山矿田、诸广地区铀成矿氧化还原条件研究表明,热液型铀矿并非只能形成于强还原环境中,也可形成于氧化环境中。深部还原环境更有利于铀的富集沉淀,形成富大铀矿。铀成矿氧化条件是因为深源还原性成矿流体上升到地壳表层混合了部分氧化性大气降水所致。相山矿田的云际矿床主要发育红色赤铁矿化蚀变,指示相对氧化的环境,矿床品位较低、规模较小;邹家山矿床发育黄铁矿化蚀变,指示相对还原的环境,矿床品位高、规模大,形成富大铀矿。

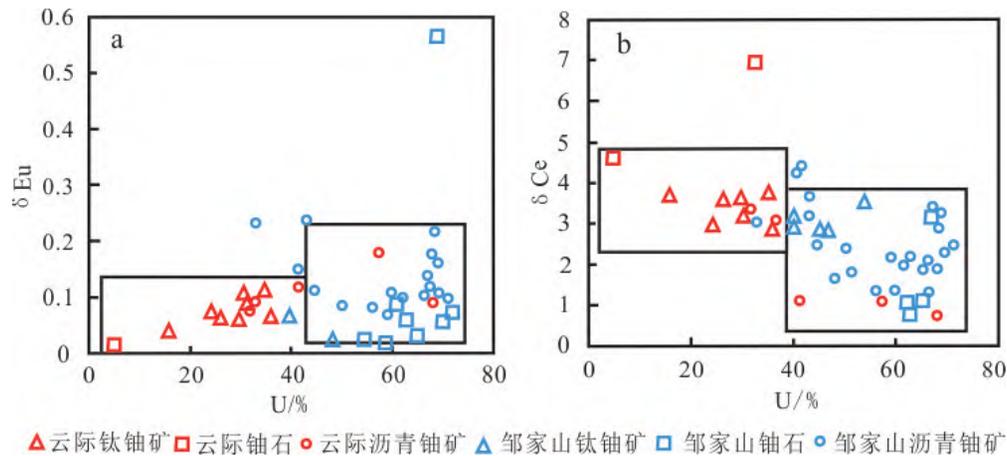


图2 相山矿田铀矿物 U-δEu(a)和 U-δCe(b)图解

Fig. 2 Relation between U-δEu (a) and U-δCe (b) of uranium mineral in Xiangshan ore field

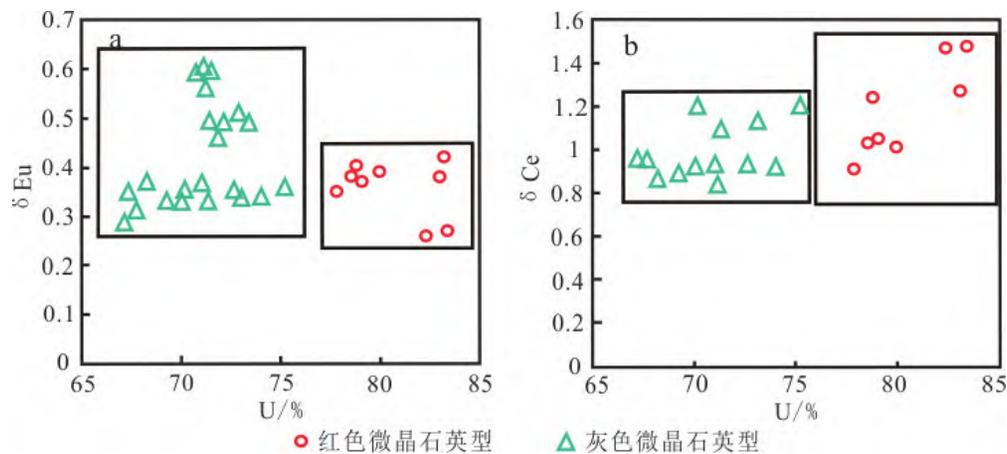


图3 诸广地区沥青铀矿 U-δEu(a)和 U-δCe(b)图解

Fig. 3 Relation between U-δEu (a) and U-δCe (b) of pitchblende in Zhuguang area

### 2.4 相近的成矿时代

相山矿田热液铀矿可划分为3个成矿阶段: 121 Ma、99~97.5 Ma、79.6~66.4 Ma<sup>[7,10,28-29]</sup>。诸广地区热液铀矿可划分为6个成矿阶段: 127 Ma、91.13 Ma、85~80 Ma、75.46~62 Ma、54~51.86 Ma、47 Ma, 主成矿阶段为 127 Ma、85~80 Ma、75.46~62 Ma<sup>[30]</sup>。火山岩型、花岗岩型热液铀矿具有相近的成矿时代, 成矿作用具有对应性。

### 2.5 相同的成因

He-Ar、H-O 同位素研究表明, 相山矿田、诸广地区铀成矿流体具有深源性, 且均主要来源于地壳, 部分来源于地幔, 在地壳表层混合了部分大气降水。

#### 2.5.1 He、Ar 同位素特征

在 <sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He、<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar-Rc/Ra 同位素演化图

解中(图4), 相山矿田主要矿床红色碱性铀矿化、灰绿色酸性铀矿化的方解石、萤石、黄铁矿成矿流体数据点部分在地壳范围, 部分高于地壳范围, 但又低于地幔, 处于地壳与地幔过渡带, 靠近地壳范围。说明相山矿田铀成矿流体主要来源于地壳, 部分来源于地幔, 混合了部分大气降水<sup>[31-32]</sup>。相山矿田铀成矿流体具有深源性特征, 热液型铀矿成矿具有深源性。

从诸广地区 <sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He、<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar-Rc/Ra 图解可见(图5), 诸广地区主要铀矿床萤石、黄铁矿成矿流体数据点主要投在地壳与地幔过渡带, 部分投在地壳范围内。表明诸广地区铀成矿流体主要来源于地壳, 部分来源于地幔, 成矿流体中有大气降水的混合。诸广地区铀成矿流体具有深源性特征, 热液型铀矿成矿具有深源性<sup>[21,33-34]</sup>。

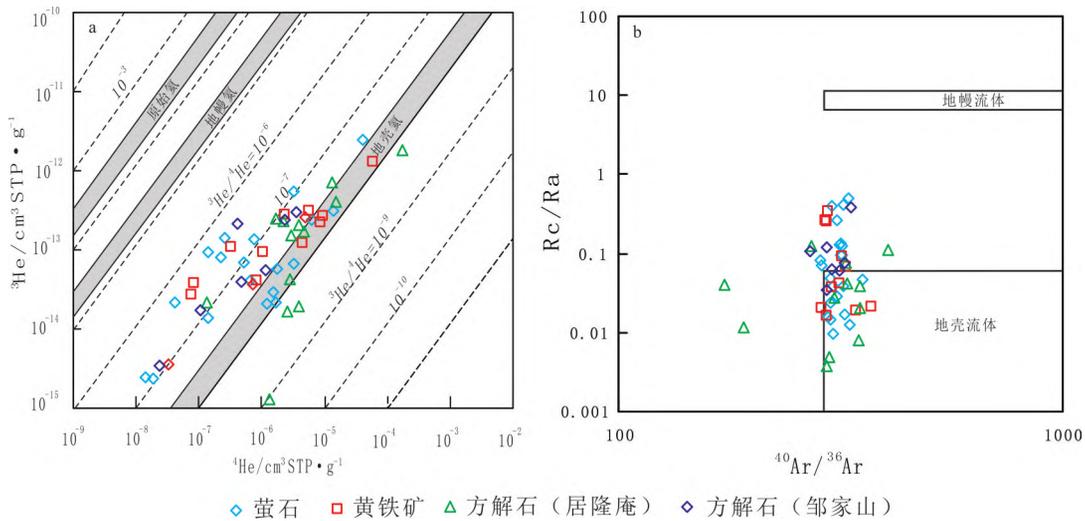


图 4 相山矿田流体包裹体的 He 同位素组成 (a) 和  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Rc/Ra (b) 图解 (底图据文献 [35])

Fig. 4 He isotope composition of fluid inclusions (a) and  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Rc/Ra (b) diagram in Xiangshan ore field (base map after reference [35])

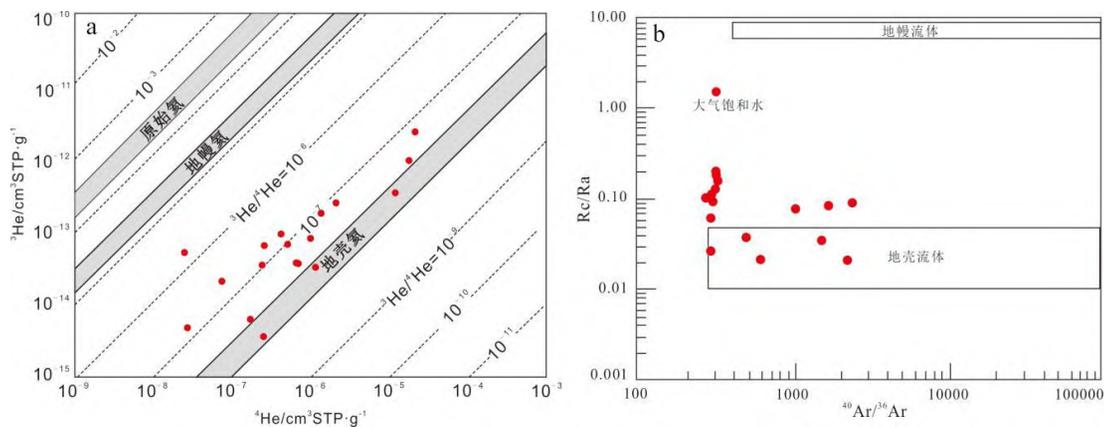


图 5 诸广地区流体包裹体的 He 同位素组成 (a) 和  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Rc/Ra (b) 图解 (底图据文献 [35])

Fig. 5 He isotope composition of fluid inclusions (a) and  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Rc/Ra (b) diagram in Zhuguang area (base map after reference [35])

火山岩型、花岗岩型热液铀矿成矿流体具有相似的 He-Ar 同位素特征,热液型铀矿成矿流体主要来源于地壳,部分来源于地幔,铀成矿流体具有深源性特征,热液型铀矿成矿具有深源性。

### 2.5.2 H、O 同位素特征

对相山矿田铀矿石中脉石矿物石英的 H、O 同位素分析结果显示,成矿早期石英的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}$  值为 9.7‰~15.3‰,对应的同位素达到平衡时的成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为 8.2‰~9.1‰,成矿流体的  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为 -86.3‰~-79.5‰,指示该成矿阶段成矿流体主要来自于岩浆水。在主成矿期, $\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}$  值为 6.5‰~13.1‰,平均值为 10.7‰,对应的成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为 -2.3‰~

6.5‰,  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为 -64.8‰~87.5‰。矿后期石英中 H、O 同位素明显偏负,指示有大量的大气降水混入 (图 6a)。因此相山矿田铀成矿早期以岩浆水为主,主成矿阶段直到成矿后阶段,大气降水混入逐渐增多。

诸广地区铀矿石中石英的 H、O 同位素分析表明,成矿期及成矿前后各阶段的 H、O 同位素组成范围基本一致。矿前期石英中的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为 0.4‰~14.3‰,  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为 -104.4‰~13.1‰。成矿期红色微晶石英脉型铀矿石中石英脉的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为 -1.2‰~11.4‰,  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$  值为 -139.2‰~11.2‰,灰色微晶石英脉型铀矿石中石英脉的  $\delta^{18}\text{O}$  值为 1.5‰~8.8‰,  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$  值

为  $-138.3\% \sim 14.1\%$ 。矿后期石英脉中的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值和  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$  值分别为  $-9.5\% \sim 12.3\%$  和  $-84.2\% \sim 13.3\%$ 。石英的 H、O 同位素投图显示(图 6b), 其点落于原生岩浆水附近, 处于原生岩浆水与雨水线之间, 显示铀成矿流体来源具有深源性, 在上升至近地表时与大气降水混合。成矿期红色微晶石英脉型铀矿石中石

英脉的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值较灰色微晶石英脉型更接近大气降水线, 且红色微晶石英脉型铀矿石中石英脉的流体包裹体比灰色微晶石英脉型更加富集 O 同位素, 表明红色微晶石英脉型铀矿化阶段成矿流体中混有更多的大气降水。

综上所述, 火山岩型、花岗岩型热液铀矿成矿流体具深源性, 在地壳表层混合了部分大气降水。

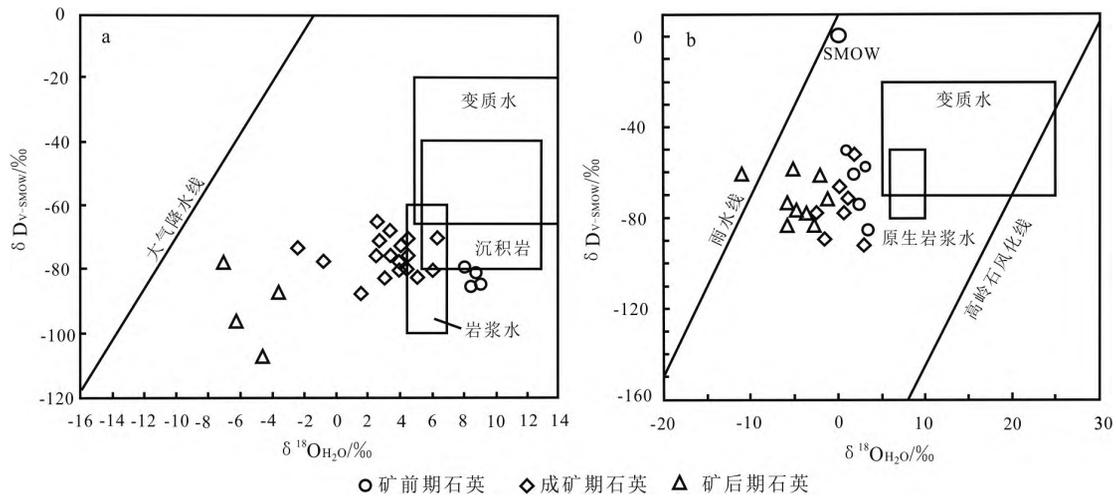


图6 相山矿田(a)、诸广地区(b)流体包裹体H-O同位素组成图解(底图据文献[36])

Fig. 6 H-O isotopic composition of fluid inclusions in Xiangshan ore field (a) and Zhuguang area (b) (base map after reference[36])

## 2.6 相似的控矿因素

热液型铀矿控矿因素主要有断裂构造、火山岩组间界面、火山岩基底界面或花岗岩侵入界面、晚期岩脉等。相山矿田铀矿关键控矿因素为断裂构造、火山岩组间界面、火山岩基底界面、晚期岩脉<sup>[37-38]</sup>。诸广地区铀矿控矿主要受断裂构造、花岗岩侵入界面、晚期岩脉控制。故火山岩型、花岗岩型热液铀矿具有相似的控矿因素。

华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿共性特征由下列因素决定: 华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿是华南中-新生代地幔隆升引发的大规模富铀岩浆作用、深源断裂构造活动、幔源基性岩浆活动和流体成矿作用的产物, 同属于华南中-新生代岩浆作用、构造活动、热液铀成矿系统。火山岩型、花岗岩型热液铀矿形成于华南中-新生代统一的深部地球动力学背景, 铀成矿与区域构造活动相耦合, 具有统一的成矿机制。

## 3 火山岩型、花岗岩型热液铀矿差异性特征

### 3.1 围岩的不同

火山岩型铀矿赋矿围岩主要为火山岩, 花岗岩型铀矿赋矿围岩主要为花岗岩, 也可变质岩、沉积岩等其他围岩, 深源成因热液型铀矿对赋矿围岩没有选择性。

相山矿田热液铀矿赋矿围岩主要为火山岩(流纹岩、英安岩和花岗斑岩), 外带基底变质岩、地层也赋矿。诸广地区热液铀矿赋矿围岩主要为花岗岩, 外带基底变质岩、地层也赋矿。

### 3.2 蚀变元素组合与成矿元素组合差异性

通过铀矿化蚀变岩石元素相关性分析获得了相山矿田火山岩型和诸广地区花岗岩型热液铀矿蚀变元素组合、成矿元素组合。

蚀变元素组合: 相山矿田火山岩型热液铀

矿蚀变元素组合为 CaO、MgO、MnO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O、Y、HREE、Rb、Sb、Th、Tl、Ni、Mo、Cr、Hf, 诸广地区花岗岩型热液铀矿蚀变元素组合为 CaO、K<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Rb、Tl、Th、Nb、Ta、Zr、Hf、Zn、Sb、Be。

成矿元素组合: 相山矿田火山岩型热液铀矿成矿元素组合为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Be、Sc、Mo、Sb、Pb、Th、Y、HREE、Sr、Cd、Tl, 诸广地区花岗岩型热液铀矿成矿元素组合为 W、Pb、Bi、Cd、Sb、Mo、Cu、Be、V、Zn、Ba、Co、Ni、Cr。

火山岩和花岗岩型热液铀矿蚀变元素组合、成矿元素组合具有一定差异性。该差异性是由于围岩成分不同所造成。深源成矿流体与不同成分围岩发生交代作用, 发生成矿流体与围岩成分的交流, 造成火山岩型、花岗岩型热液铀矿成矿元素组合、蚀变元素组合的差异。

相山矿田火山岩型、诸广地区花岗岩型热液铀矿成矿特征、成矿流体成分、成矿条件、成矿时代、铀矿成因、控矿因素等共性特征及差异性特征对比见表 1。

表 1 火山岩型、花岗岩型热液铀矿成矿特征对比表

Table 1 Comparison of metallogenic characteristics of volcanic rock type and granite type hydrothermal uranium deposits

成矿特征	火山岩型	花岗岩型	
矿化类型	碱性铀矿化、酸性铀矿化(萤石型、硅化型)	碱性铀矿化、酸性铀矿化(微晶石英脉型)	
蚀变矿物组合	碱性铀矿化: 钠长石、赤铁矿、绿泥石、碳酸盐; 酸性铀矿化: 萤石型-水云母、萤石、绿泥石、黄铁矿), 硅化型酸性铀矿化-微晶石英、水云母、黄铁矿	碱性铀矿化: 钠长石、赤铁矿、绿泥石、碳酸盐; 酸性铀矿化: 红色微晶石英脉型-微晶石英、水云母、绿泥石、赤铁矿, 灰色微晶石英脉型-微晶石英、水云母、绿泥石、萤石、黄铁矿	
矿石矿物组合	沥青铀矿、钍铀矿、铀石、铀钍石、方钍石	沥青铀矿, 铀石、铀钍石、方钍石	
成矿时代	121 Ma、99~97.5 Ma、79.6~66.4 Ma	主成矿阶段 127 Ma、85~80 Ma、75.46~62 Ma	
矿体特征	脉状、细脉状、群脉状	大脉状、细脉状、群脉状	
围岩岩性	火山岩(流纹岩、英安岩和花岗岩斑岩), 基底变质岩、地层	花岗岩, 基底变质岩、地层	
控矿因素	断裂构造、火山岩组间界面、火山岩基底界面、晚期岩脉	断裂构造、花岗岩侵入界面、晚期岩脉	
成矿元素组合	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、Be、Sc、Mo、Sb、Pb、Th、Y、HREE、Sr、Cd、Tl	W、Pb、Bi、Cd、Sb、Mo、Cu、Be、V、Zn、Ba、Co、Ni、Cr	
蚀变元素组合	CaO、MgO、MnO、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O、Y、HREE、Rb、Sb、Th、Tl、Ni、Mo、Cr、Hf	CaO、K <sub>2</sub> O、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Rb、Tl、Th、Nb、Ta、Zr、Hf、Zn、Sb、Be	
成矿流体成分	灰色酸性铀矿化 CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O, 少量 N <sub>2</sub> 和 CH <sub>4</sub>	红色微晶石英脉型	O <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O、CO <sub>2</sub>
		灰色微晶石英脉型	H <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、CO <sub>2</sub>
成矿温度	红色碱性铀矿化 240~295 °C 6.1%~16.4% NaCl <sub>eqv</sub>	红色微晶石英脉型	163~359 °C 2.07%~11.95% NaCl <sub>eqv</sub>
		灰绿色酸性铀矿化 167~356 °C 2.15%~14.67% NaCl <sub>eqv</sub>	灰色微晶石英脉型 148~386 °C 0.67%~10.74% NaCl <sub>eqv</sub>
氧化还原条件	红色碱性铀矿化	红色微晶石英脉型	氧化
	灰绿色酸性铀矿化	灰色微晶石英脉型	还原
成矿流体来源	主要来源于地壳, 部分来源于地幔, 混合了部分大气降水	主要来源于地壳, 部分来源于地幔, 混合了部分大气降水	

#### 4 火山岩型、花岗岩型热液铀矿形成机制

华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿成矿作用形成于中-新生代统一的深部地球动力学大地构造背景, 具有统一的形成机制, 铀成矿为大陆热点作用的产物<sup>[5]</sup>。华南中-新生代大规

模岩浆作用(火山作用和侵入作用)、构造活动、铀成矿作用等构成复杂的岩浆-热液演化系统。该岩浆-热液演化系统从早期到晚期, 地球深部热作用呈逐渐消减、脉动式活动的演化过程。岩浆作用由强变弱, 从早期大规模酸性岩浆活动到晚期小规模酸性、基性岩脉岩浆活动; 岩浆作用演变为流体作用, 从早期大规

模酸性岩浆活动,到晚期小规模酸性、基性岩脉岩浆活动,再到最后的铀成矿流体作用;脉动式活动使岩浆作用、流体作用具有多期多阶段特点,形成多期多阶段岩浆岩、多期多阶段铀矿化。

华南热液型铀矿田空间上受富铀岩浆活动中心(富铀火山盆地和花岗岩体)和红盆控盆深源断裂构造联合控制。

燕山早期一早白垩世,华南地幔上隆引起地壳热隆伸展<sup>[2,4]</sup>,地幔热隆使地壳发生大规模部分熔融,地壳部分熔融作用形成大规模花岗质岩浆。富铀地壳部分熔融形成富铀岩浆活动中心,富铀花岗质岩浆上升侵入形成富铀花岗岩体,喷发形成富铀火山岩盆地,相山火山盆地和诸广山复式岩体形成。热液型铀矿田空间分布受富铀岩浆活动中心相山火山盆地和诸广山复式岩体控制。

燕山晚期一喜山期,华南地幔热隆使地壳发生强烈拉张作用,源于地幔的红盆控盆深源断裂构造体系形成并进一步发育,引发晚期幔源基性岩浆和壳源酸性岩浆形成,沿深源断裂构造侵位形成晚期基性岩脉和酸性岩脉,相山火山盆地和诸广山复式岩体晚期酸性、基性岩脉形成;与此同时形成源于地幔的成矿流体,幔源成矿流体交代富铀地壳,形成富铀成矿流体,铀主要来源于富铀地壳,富铀成矿流体沿深源断裂构造上升到地壳表层沉淀富集成矿,相山矿田、诸广地区热液型铀矿形成。热液型铀矿田空间分布受红盆控盆深源断裂构造控制。

华南热液型铀矿体空间定位受断裂构造、火山岩组间界面、火山岩基底界面、花岗岩侵入界面、晚期岩脉等控制。沿深源断裂构造上升的铀成矿流体沿富铀火山岩盆地侵位形成火山岩型铀矿,断裂构造、火山岩组间界面、火山岩基底界面、晚期岩脉等控制相山矿田热液铀矿床(矿体)空间定位;铀成矿流体沿花岗岩体侵位形成花岗岩型铀矿,断裂构造、花岗岩侵入界面、晚期岩脉等控制诸广地区热液型铀矿床(矿体)空间定位。

铀成矿流体主要来源于地壳,部分来源于地幔,具有深源成因。深源成因铀成矿流体为

还原性成矿流体,铀可在还原条件下迁移。流体包裹体成分主要为 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 和 $\text{CH}_4$ ,其中 $\text{CO}_2$ 含量最高, $\text{CO}_2$ 在铀的迁移和沉淀过程中起着重要作用。成矿流体中铀可能主要以铀酰碳酸盐络合物 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ 、 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 和 $[\text{UF}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 等形式存在,在深部高温高压下铀能以铀酰碳酸盐络离子形式与 $\text{HS}^-$ 、 $\text{S}^{2-}$ 等还原剂一起在还原环境下迁移。铀成矿流体单一的铀酰碳酸盐络合物存在形式,无法解释热液型铀矿共伴生金属元素、脉石矿物类型多样性特征,故认为成矿流体中铀可以呈无机配合物、有机配合物、有机无机杂化配合物形式迁移,在近地表成矿流体因降温、减压铀沉淀富集成矿,形成类型多样的铀矿物及其他多金属矿物、脉石矿物<sup>[7]</sup>。

热液型铀矿成矿流体铀的沉淀富集控制因素为温度、压力、pH值等条件,而非氧化还原条件。富铀还原性成矿流体沿深源断裂构造上升到地壳表层,与大气降水混合,降温、减压及pH值等条件的改变使铀发生沉淀富集。还原性成矿流体向浅部的迁移,温度、压力的不断降低,富 $\Sigma \text{CO}_2$ 和U的成矿流体在温度降低,或压力骤降时,流体中的 $\Sigma \text{CO}_2$ 气体大量逸出,发生 $\Sigma \text{CO}_2$ 去气和流体沸腾作用,pH值发生显著变化,导致流体中的 $\text{CO}_3^{2-}$ 的活度急剧降低,铀酰碳酸盐络合物、有机无机复杂配合物等发生分解、沉淀,生成沥青铀矿、铀石、钛铀矿等铀矿物,黄铁矿等金属矿物,方解石、萤石等脉石矿物。与表生铀矿不同,氧化还原条件不是热液型铀矿迁移沉淀的决定性因素。热液型铀矿并非只能形成于强还原环境中,也可形成于氧化环境中。深部还原环境更有利于沥青铀矿富集沉淀,形成富大铀矿。由于地壳表层大气降水的混合作用,深源还原性成矿流体混合了较多的氧化地表水,在氧化条件下形成沥青铀矿、铀石、钛铀矿等铀矿物及赤铁矿、方解石等共生矿物;深源还原性成矿流体混合了较少的氧化地表水,成矿流体保持还原性,在还原条件下形成沥青铀矿、铀石、钛铀矿等铀矿物及黄铁矿、萤石等共生矿物。热液型铀矿并非只能形成于强还原环境中,也可形成于氧化环境中,深部还原条件更有利于铀的沉淀富

集,形成富大铀矿。

相山矿田火山岩型和诸广地区花岗岩型热液铀矿具有统一的形成机制,即经历富铀岩浆活动中心(火山岩盆地和复式岩体)形成阶段、红盆深源断裂构造活动及早期铀矿化形成阶段、红盆深源断裂构造活动及晚期铀矿化形成阶段、差异隆升-剥蚀阶段等 4 个成矿阶段。

#### 1) 相山矿田火山岩型热液铀矿形成机制

中生代地幔上隆使富铀地壳发生部分熔融形成中生代富铀岩浆岩(相山火山盆地);地幔上隆造成地壳强烈伸展拉张,形成深源断裂构造、断陷红盆,晚期酸性、基性岩脉形成,深源成矿流体沿深源断裂构造上升成矿。相山矿田为中生代富铀岩浆活动中心相山火山盆地和北东向典型红盆深源断裂构造体系复合控矿,深源断裂之次级断裂构造、火山构造、晚期岩脉等控制铀矿床(矿体)空间定位。不同成分深源还原性成矿流体沿深源断裂构造上升到地壳表层混合了部分氧化性大气降水,形成不同氧化还原条件铀矿化。相山矿田火山岩型热液铀矿形成机制总结如下。

早白垩世早期富铀岩浆活动中心火山岩盆地形成阶段:早白垩世早期地幔强烈上隆,相山地区富铀地壳发生大规模部分熔融作用形成中酸性岩浆岩,岩浆岩溢流、喷发形成相山火山盆地主体岩浆岩流纹英安岩、碎斑流纹岩、环形花岗斑岩,相山火山盆地打鼓顶组和鹅湖岭组形成,火山岩年龄为 140.7~132.4 Ma<sup>[30]</sup>。

早白垩世中期红盆深源断裂构造活动及碱性铀矿化形成阶段:相山火山盆地形成之后,壳幔上隆作用使抚州-永丰深断裂发生左行走滑作用,区域断陷红盆形成。相山火山盆地北部形成近东西-北西西向右旋压扭性的破碎带,整个相山火山盆地内形成北北东向左旋压扭性破碎带和北西-北北西向、近南北向的张-张扭性裂隙带,相山火山盆地深源断裂构造体系形成。深部地幔流体沿深断裂上升,交代富铀地壳萃取铀等成矿物质形成铀成矿流体,上升到地层表层,与大气降水混合,由于降温降压及 pH 值变化,在深源断裂之次级构造、裂隙带以及断裂带与火山构造、斑岩体内外接触带、爆发角砾岩筒复合等成矿有利部位沉

淀、富集成矿,形成铀矿化。早期铀成矿流体为碱性成矿流体,由于混合了较多的大气降水,铀成矿流体呈氧化性,铀矿化蚀变岩石呈红色,碱性铀矿化蚀变矿物组合为钠长石、赤铁矿、绿泥石、碳酸盐。碱性铀矿化主要分布于相山火山盆地北部,成矿年龄为 121 Ma<sup>[10]</sup>。早期碱性铀矿化之后,相山矿田还形成铅、锌、银、铜矿化和金矿化等多金属矿化<sup>[10,39-40]</sup>,多金属成矿年龄为 112.8~107.4 Ma<sup>[10]</sup>。相山火山盆地主体岩浆岩形成后,沿断裂构造侵入充填了晚期脉状花岗斑岩、煌斑岩及辉绿岩脉,年龄为 129.5~82.92 Ma<sup>[30,41]</sup>。晚期脉状酸性、基性岩脉与不同矿化类型、不同期次铀矿化时空关系密切。

早白垩世晚期-晚白垩世红盆断裂构造活动及酸性铀矿化形成阶段:早白垩世晚期-晚白垩世早期,壳幔上隆作用进一步加强,断陷盆地进一步扩张,在晚白垩世中后期演变为坳陷盆地,深源断裂深切地壳。相山火山盆地内断裂破碎带复活,早期形成的近东西-北西西向断裂呈现左旋张扭走滑,北北东向断裂破碎带为右旋压扭,同时形成了部分北东东走向的张扭性断裂破碎带。深部来源的还原性铀成矿流体上升到地壳表层,与大气降水混合,由于降温降压及 pH 值变化,在有利部位沉淀、富集成矿,形成两期酸性铀矿化(萤石型年龄为 99~97.5 Ma,硅化型年龄为 79.6~66.4 Ma<sup>[10]</sup>)。由于大气降水混合较少,该阶段成矿流体保留了还原性,酸性铀矿化蚀变矿物组合中萤石型蚀变矿物组合为水云母、萤石、绿泥石、黄铁矿,硅化型蚀变矿物组合为微晶石英、水云母、黄铁矿。还原条件形成的酸性铀矿化更富更大,深部还原环境更有利于沥青铀矿富集沉淀,形成富大铀矿。酸性铀矿化主要分布于相山火山盆地西部。

古近纪火山盆地差异隆升-剥蚀阶段:古近纪以来,区域构造以近南北向区域挤压作用为主。相山矿田各类含矿构造重新活动,发育断层泥,对早期的矿体具有一定程度的破坏,使相山矿田矿体强烈破碎(矿体叠加构造糜棱岩化)。同时,相山火山盆地发生差异隆升-剥蚀作用,火山盆地东部、北部地区普遍隆升,强

烈剥蚀,基底界面附近(碱性铀矿化)矿体剥蚀出露,组间界面(酸性铀矿化)矿体被剥蚀掉,如北部岗上英、横洞、沙洲等矿床;而西部剥蚀程度较低,组间界面(酸性铀矿化)矿体没有出露,基底界面附近(碱性铀矿化)矿体埋深较大,保存完好,如邹家山、居隆庵、石洞、河元背、牛头山等矿床。

## 2) 诸广地区花岗岩型热液铀矿形成机制

燕山早期(侏罗纪)地幔上隆使富铀地壳发生部分熔融形成不同期次富铀岩浆岩(诸广山复式岩体);地幔上隆造成地壳强烈伸展拉伸,形成深源断裂构造、断陷红盆,晚期酸性、基性岩脉形成,深源成矿流体沿深源断裂构造上升成矿。诸广地区铀矿田为中生代富铀岩浆活动中心诸广山复式岩体和北东向红盆控盆深源断裂构造体系复合控矿,深源断裂之次级断裂构造、花岗岩侵入界面、晚期岩脉等控制铀矿床(矿体)空间定位。不同成分深源还原性成矿流体沿深源断裂构造上升到地壳表层混合了部分氧化性大气降水,形成不同氧化还原条件铀矿化。诸广地区花岗岩型热液铀矿形成机制总结如下。

燕山早期(侏罗纪)富铀岩浆活动中心复式岩体形成阶段:由于深部地幔作用,富铀地壳发生部分熔融,形成不同期次花岗岩。侏罗纪深部地幔强烈隆升,形成中生代富铀活动中心,诸广地区加里东-燕山早期多期次花岗岩侵入,形成以印支期-燕山早期为主体的中生代富铀花岗岩体,即诸广山复式岩体。岩浆岩年龄为448~143.1 Ma<sup>[30]</sup>。

早白垩世红盆深源断裂构造活动、早期铀矿化形成阶段:诸广山复式岩体形成之后,壳幔上隆作用形成北东向深断裂构造体系,形成区域断陷带(南雄断陷红盆、百顺断陷带、长江复合断陷带、城口断陷带和丰州断陷红盆),区域断陷红盆形成。诸广地区形成以北东向为主,北西向、南北向等张-张扭性深源断裂构造体系。深部来源还原性铀成矿流体上升到地壳表层,与大气降水混合,由于降温降压及pH值变化,在深源断裂之次级构造、裂隙带以及不同期次花岗岩侵入界面、晚期岩脉等成矿有利部位沉淀、富集成矿。诸广地区早期铀矿化主要为碱性铀矿化,由于成矿流

体混合了较多的大气降水,呈氧化性,铀矿化蚀变岩石呈红色,碱性铀矿化蚀变矿物组合为钠(钾)长石、赤铁矿、绿泥石、碳酸盐。诸广地区早期碱性铀矿化分布较少,铀矿化年龄为127 Ma<sup>[30]</sup>。诸广山复式岩体形成后,沿断裂构造侵入充填了晚期煌斑岩脉、辉绿岩脉和花岗岩脉、花岗斑岩脉。晚期基性岩脉划分为5个侵入阶段,年龄为142.6~86.8 Ma<sup>[30]</sup>。晚期基性岩脉与不同矿化类型、不同期次铀矿化时空关系密切。早期铀矿化(127 Ma)与年龄为142.6~139 Ma基性岩脉侵入时间相近<sup>[30]</sup>,铀矿化略晚于基性岩脉形成。

晚白垩世红盆深源断裂构造活动、晚期铀矿化形成阶段:晚白垩世由于地幔强烈上隆作用,深源断裂、断陷作用进一步加强,早期形成的深源断裂构造体系进一步复活。深部来源的还原性铀成矿流体上升到地壳表层,与大气降水混合,由于降温降压及pH值变化,在有利部位沉淀、富集成矿,形成两期酸性铀矿化:红色微晶石英脉型、灰色微晶石英脉型。诸广地区铀矿主要为酸性铀矿化。由于大气降水混合程度不同,红色微晶石英脉型铀矿化形成于氧化条件,铀矿化蚀变矿物组合为红色微晶石英、水云母、绿泥石、赤铁矿;灰色微晶石英脉型铀矿化形成于还原条件,铀矿化蚀变矿物组合为灰色微晶石英、水云母、绿泥石、萤石、黄铁矿。还原条件形成的酸性灰色微晶石英脉型铀矿化更富更大,深部还原环境更有利于沥青铀矿富集沉淀,形成富大铀矿。晚期铀矿化与深源岩浆活动密切相关,铀矿略晚于基性岩脉形成。诸广地区晚期铀矿化具有多阶段性,年龄为127~47 Ma<sup>[30]</sup>。主要成矿阶段红色微晶石英脉型铀矿化年龄为85~80 Ma,灰色微晶石英脉型铀矿化年龄为75.46~62 Ma<sup>[30]</sup>。晚期铀矿化(85~80 Ma)与年龄为92.2~86.8 Ma基性岩脉侵入时间相近<sup>[30]</sup>,铀矿化略晚于基性岩脉形成。

始新世差异隆升-剥蚀阶段:始新世以来,早期区域构造仍以拉张裂陷为主,晚期诸广山复式岩体及断陷带挤压发生差异隆升,抬升剥蚀作用造成部分矿体剥蚀出露,矿体部分被剥蚀掉;而多数矿体没有出露地表,为隐伏矿体。

## 5 结论

1)通过总结华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿成矿异同,认为这两种类型热液铀矿具有相似的成矿特征、相似的成矿流体成分、相似的成矿条件、相近的成矿时代、相同的成因、相似的控矿因素等共性特征。火山岩型、花岗岩型热液铀矿差异性特征主要表现在围岩成分的不同,蚀变元素组合和成矿元素组合的差异性。

2)华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿成矿流体主要来源于地壳,部分来源于地幔,铀成矿流体具有深源特征,在地壳表层混合了部分大气降水。热液型铀矿成矿具有深源性,深源成矿流体为还原性成矿流体。

3)华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿同属于中-新生代岩浆作用、构造活动、热液铀成矿系统,铀成矿作用形成于华南中-新生代统一的深部地球动力学大地构造背景,具有统一的形成机制。

4)华南火山岩型、花岗岩型热液铀矿经历富铀岩浆活动中心(火山盆地和复式花岗岩体)形成阶段、红盆深源断裂构造活动及早期铀矿化形成阶段、红盆深源断裂构造活动及晚期铀矿化形成阶段、差异隆升-剥蚀阶段等4个成矿阶段。

### [参考文献]

- [1] 余达淦,吴仁贵,陈培荣. 铀资源地质学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2004.
- [2] 陈跃辉,陈肇博,陈祖伊,等. 华东南中生代伸展构造与铀成矿作用[M]. 北京:原子能出版社,2000.
- [3] 余达淦. 华南中生代花岗岩型、火山岩型、外接触带型铀矿找矿思路(I)(II)[J]. 铀矿地质,2001,17(5):257-265.
- YU Dagan. Prospecting ideas for Mesozoic granite-type, volcanic-type, exocontact-type uranium deposits in South China(I)(II)[J]. Uranium Geology,2001,17(5):257-265(in Chinese).
- [4] 胡瑞忠,毕献武,苏文超,等. 华南白垩第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J]. 地学前缘,2004,11(1):153-160.
- HU Ruizhong, BI Xianwu, SU Wenchao, et al. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in South China[J]. Earth Science Frontiers,2004,11(1):153-160(in Chinese).
- [5] 李子颖. 华南热点与铀成矿作用[J]. 铀矿地质,2006,22(2):65-69.
- LI Ziyang. Hotspot uranium metallogenesis in South China[J]. Uranium Geology,2006,22(2):65-69(in Chinese).
- [6] 李子颖. 南岭贵东岩浆岩与铀成矿作用[M]. 北京:地质出版社,2010.
- [7] 李子颖,黄志章,李秀珍,等. 相山火成岩与铀成矿作用[M]. 北京:地质出版社,2014.
- [8] 杜乐天. 中国热液铀成矿理论体系[J]. 铀矿地质,2011,27(2):65-68.
- DU Letian. On the theory system of hydrothermal uranium metallization in China[J]. Uranium Geology,2011,27(2):65-68(in Chinese).
- [9] 林锦荣,胡志华,王勇剑,等. 相山铀矿田矿石有用共生组分研究[J]. 铀矿地质,2017,33(6):340-345.
- LIN Jinrong, HU Zhihua, WANG Yongjian, et al. Characteristics of profitable elements in uranium ores in Xiangshan orefield[J]. Uranium Geology,2017,33(6):340-345(in Chinese).
- [10] 林锦荣,胡志华,王勇剑,等. 相山铀矿田铀多金属成矿时代与成矿热历史[J]. 岩石学报,2019,35(9):2801-2816.
- LIN Jinrong, HU Zhihua, WANG Yongjian, et al. Ore-forming age and thermal history of uranium-polymetallic mineralization in Xiangshan uranium orefield[J]. Acta Petrologica Sinica,2019,35(9):2801-2816(in Chinese).
- [11] 陶意,林锦荣,胡志华,等. 鹿井矿田酸碱两种类型交代作用特征对比[J]. 地质论评,2019,65(增刊):177-178.
- TAO Yi, LIN Jinrong, HU Zhihua, et al. The comparison of the features of two types of acid and alkali metasomatism in Lujing orefield[J]. Geological Review,2019,65(S1):177-178(in Chinese).
- [12] 李建红,夏宗强. 桃山-诸广山铀成矿带矿床类型和成矿特征及时空定位模式[J]. 矿物学报,2016,33(增刊):221-222.
- LI Jianhong, XIA Zongqiang. Ore deposit types,

- metallogenic characteristics and temporal and spatial positioning model of Taoshan Zhuguangshan uranium metallogenic belt [J]. *Journal of Minerals*, 2016, 33(S2): 221-222 (in Chinese).
- [13] 张玉燕, 李子颖, 曹寿孙. 居隆庵铀矿床蚀变分带及其地球化学特征 [J]. *铀矿地质*, 2011, 27(2): 95-102.  
ZHANG Yuyan, LI Ziyang, CAO Shousun. Alteration zone and its geochemical characteristics of Julong' an uranium deposit [J]. *Uranium Geology*, 2011, 27(2): 95-102 (in Chinese).
- [14] 吴玉, 周伟明. 江西相山铀矿田围岩蚀变特征及其与铀矿化关系 [J]. *科技视界*, 2012(24): 318-319, 390.  
WU Yu, ZHOU Weiming. Characteristics of wall rock alteration and its relationship with uranium mineralization in Xiangshan uranium ore field, Jiangxi province [J]. *Scientific and Technological Horizon*, 2012(24): 318-319, 390 (in Chinese).
- [15] 李子颖, 张万良. 江西相山矿田主要铀矿化类型及其地球化学特征对比研究 [J]. *现代地质*, 2016, 30(1): 1-16.  
LI Ziyang, ZHANG Wanliang. Main uranium mineralization types in Xiangshan ore field, Jiangxi [J]. *Geoscience*, 2016, 30(1): 1-16 (in Chinese).
- [16] 王运, 胡宝群, 孙占学, 等. 相山铀矿田邹家山矿床交代型矿石地球化学特征及其成矿意义 [J]. *铀矿地质*, 2012, 28(5): 281-289.  
WANG Yun, HU Baoqun, SUN Zhanxue, et al. Geochemical characteristics of alkali metasomatic ore in Zoujiashan deposit, Xiangshan uranium ore field and its metallogenic significance [J]. *Uranium Geology*, 2012, 28(5): 281-289 (in Chinese).
- [17] 刘军港, 李子颖, 黄志章, 等. 江西相山CUSD3钻孔铀矿化蚀变带元素活动性探讨 [J]. *地质学报*, 2017, 91(4): 896-912.  
LIU Jungang, LI Ziyang, HUANG Zhizhang, et al. Discussion on element activity of uranium mineralization alteration zone in Xiangshan CUSD3 borehole, Jiangxi province [J]. *Journal of Geology*, 2017, 91(4): 896-912 (in Chinese).
- [18] 孟艳宁. 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, 2012.
- [19] 高飞, 林锦荣, 钟启龙, 等. 302铀矿床围岩蚀变分带性及地球化学特征 [J]. *铀矿地质*, 2011, 27(5): 274-281.  
GAO Fei, LIN Jinrong, ZHONG Qilong, et al. Zonation and geochemical characteristics of wall rock alteration in No. 302 uranium deposit [J]. *Uranium Geology*, 2011, 27(5): 274-281 (in Chinese).
- [20] 吴德海, 夏菲, 潘家永, 等. 粤北棉花坑铀矿床热液蚀变与物质迁移研究 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(9): 2745-2764.  
WU Dehai, XIA Fei, PAN Jiayong, et al. Characteristics of hydrothermal alteration and material migration of Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(9): 2745-2764 (in Chinese).
- [21] 庞雅庆, 范洪海, 高飞, 等. 粤北诸广南部铀矿田流体包裹体的氦氩同位素组成及成矿流体来源示踪 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(9): 2765-2773.  
PANG Yaqing, FAN Honghai, GAO Fei, et al. He-Ar isotopic composition of fluid inclusions in the southern Zhuguang uranium ore field, northern Guangdong Province and tracing of ore-forming fluid sources [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(9): 2765-2773 (in Chinese).
- [22] 张万良. 相山铀矿田矿体形态分类及成因意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(5): 844-854.  
ZHANG Wanliang. Morphological classification of ore bodies in Xiangshan uranium ore field and its genetic significance [J]. *Geotectonics and Metallogeny*, 2015, 39(5): 844-854 (in Chinese).
- [23] 张树明, 曹寿孙, 曾文乐, 等. 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*, 2012, 31(1): 65-82.  
ZHANG Shuming, CAO Shousun, ZENG Wenle. Fluid inclusions characteristics of typical uranium deposits in Xiangshan orefield, Jiangxi Province [J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(1): 65-82 (in Chinese).
- [24] 徐浩, 张闯, 庞雅庆, 等. 广东长排铀矿床成矿流体特征 [J]. *现代地质*, 2018, 32(5): 902-912.  
XU Hao, ZHANG Chuang, PANG Yaqing, et al. Characteristics of ore forming fluids of the Changpai uranium deposit in Guangdong province [J]. *Geoscience*, 2018, 32(5): 902-912 (in Chinese).
- [25] 郭国林, 刘晓东, 潘家永, 等. 粤北302铀矿床流体包裹体研究 [J]. *铀矿地质*, 2010, 26(6): 350-368.  
GUO Guolin, LIU Xiaodong, PAN Jiayong, et al. Study of fluid inclusion from uranium deposit No. 302 in north Guangdong [J]. *Uranium Geology*,

- 2010, 26(6): 350-368 (in Chinese).
- [26] 陶意, 林锦荣, 胡志华, 等. 热液型铀成矿氧化还原条件研究: 来自特征矿物的指示[J]. 铀矿地质, 2020, 36(3): 156-166.
- TAO Yi, LIN Jinrong, HU Zhihua, et al. Study on redox conditions of hydrothermal uranium ore formation: Indication of characteristic minerals [J]. Uranium Geology, 2020, 36 (3) : 156-166 (in Chinese).
- [27] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [28] 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 等. 相山铀矿田成矿机理研究[J]. 铀矿地质, 2003, 19(4): 208-213.
- FAN Honghai, LING Hongfei, WANG Dezi, et al. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan uranium ore-field [J]. Uranium Geology, 2003, 19 (4): 208-213 (in Chinese).
- [29] 林锦荣, 胡志华, 陶意, 等. 相山矿田邹家山铀矿床成矿热事件的锆石裂变径迹年龄响应[J]. 铀矿地质, 2019, 35(4): 193-198.
- LIN Jinrong, HU Zhihua, TAO Yi, et al. The response of zircon fission track age on the metallogenetic thermal events of Zoujiashan uranium deposit in Xiangshan orefield [J]. Uranium Geology, 2019, 35(4): 193-198 (in Chinese).
- [30] 林锦荣, 胡志华, 王勇剑, 等. 岩浆-热液演化与铀成矿相对“独立性”、“滞后性”探讨: 以相山矿田、诸广地区铀成矿为例[J]. 铀矿地质, 2022, 38(3): 373-391.
- LIN Jinrong, HU Zhihua, WANG Yongjian, et al. Magma-hydrothermal evolution and its “independence” and “hysteresis” relative to uranium mineralization: Taking uranium mineralization in Xiangshan and Zhuguang ore districts for example [J]. Uranium Geology, 2022, 38(3): 373-391 (in Chinese).
- [31] 严冰, 严寒, 魏文凤, 等. 江西相山沙洲铀矿床 He、Ar 同位素特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2014, 60(3): 624-634.
- YAN Bing, YAN Han, WEI Wenfeng, et al. Helium-Argon isotopic characters and geology significance of the Shazhou uranium deposit, Xiangshan orefield, Jiangxi province [J]. Geological Review, 2014, 60 (3): 624-634 (in Chinese).
- [32] 王峰, 林锦荣, 胡志华, 等. 相山云际矿床铀成矿流体同位素特征及成因[J]. 世界核地质科学, 2017, 34(1): 9-13.
- WANG Feng, LIN Jinrong, HU Zhihua, et al. Isotopic characteristics of metallogenetic fluid and its genesis in Yunji uranium deposit of Xiangshan [J]. World Nuclear Geoscience, 2017, 34 (1) : 9-13 (in Chinese).
- [33] 刘成东, 李志文, 刘江浩, 等. 地幔流体参与铀成矿作用的研究进展: 以粤北花岗岩型铀矿集区为例[J]. 铀矿地质, 2016, 32(4): 193-199.
- LIU Chengdong, LI Zhiwen, LIU Jianghao, et al. Progress in the study of mantle fluid involvement in uranium mineralization: A case study of granite type uranium ore concentration area in north Guangdong [J]. Uranium Geology, 2016, 32(4): 193-199 (in Chinese).
- [34] 姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞. 地幔流体与铀成矿作用[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 491-498.
- JIANG Yaohui, JIANG Shaoyong, LING Hongfei. Mantle-derived fluids and uranium mineralization [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11 (2) : 491-498 (in Chinese).
- [35] MAMYRIN B A, TOLSTIKHIN L N. Helium isotopes in seawater [J]. Developments in Geochemistry, 1984, 3: 193-202.
- [36] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用: 金属活化热液成矿作用及找矿[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1983.
- [37] 林锦荣, 胡志华, 王勇剑, 等. 相山火山盆地铀矿床空间定位式与预测评价模型[J]. 铀矿地质, 2015, 31(增刊): 293-300.
- LIN Jinrong, HU Zhihua, WANG Yongjian, et al. Spatial position and prediction-evaluation models of uranium deposit in Xiangshan volcanic basin [J]. Uranium Geology, 2015, 31(S1): 293-300.
- [38] 林锦荣, 胡志华, 谢国发, 等. 相山火山盆地组间界面、基底界面特征及其对铀矿的控制作用[J]. 铀矿地质, 2014, 30(3): 135-140.
- LIN Jinrong, HU Zhihua, XIE Guofa, et al. The characteristics of interfaces between formation and basement in Xiangshan volcanic basin and their controls on uranium deposits [J]. Uranium Geology, 2014, 30(3): 135-140 (in Chinese).
- [39] 刘军港. 相山西部地区铀-铅锌多金属成矿作用研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2017.
- [40] 聂江涛, 李子颖, 王健, 等. 江西相山矿田多金属成矿流体特征与成矿作用[J]. 地质通报, 2015, 34(增刊): 535-547.
- NIE Jiangtao, LI Ziyang, WANG Jian, et al.

- Characteristics of polymetallic ore-forming fluid and metallogenesis of the Xiangshan ore-field in Jiangxi [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34 (Z1) : 535-547(in Chinese).
- [41] 王勇剑, 林锦荣, 胡志华, 等. 相山铀矿田邹家山矿床英安斑岩脉锆石 U-Pb 年代学、地球化学、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *地球科学*, 2021, 46(1):35-46.
- WANG Yongjian, LIN Jinrong, HU Zhihua, et al. Zircon U - Pb geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of dacitic porphyry in Zoujiashan deposit of Xiangshan uranium orefield and its geological implication [J]. *Earth Science*, 2021, 46(1):35-46(in Chinese).

## Common Characteristics and Formation Mechanism of Volcanic Rock Type and Granite Type Hydrothermal Uranium Deposits in South China

LIN Jinrong<sup>1</sup>, LI Ziyang<sup>1</sup>, HU Zhihua<sup>1</sup>, LAN Qing<sup>2</sup>,  
WANG Yongjian<sup>1</sup>, TAO Yi<sup>3</sup>, LIU Zhengguo<sup>1</sup>

(1. *CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China*; 2. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081, China*; 3. *CGN Uranium Industry Development Co., Ltd., Beijing 100029, China*)

**Abstract:** Based on the comprehensive comparison on the metallogenic characteristics, fluid composition, metallogenic conditions, metallogenic epoch, uranium genesis, ore control factors of Xiangshan volcanic rock type and Zhuguang granite type hydrothermal uranium deposits, the similarities and differences between volcanic rock type and granite type hydrothermal uranium deposits were summarized. It was recognized that volcanic rock type and granite type hydrothermal uranium deposits were similar in metallogenic characteristics, fluid composition, and metallogenic conditions, metallogenic epoch, ore controlling factors, genesis and other characteristics, which were the product of hydrothermal uranium mineralization with deep source and ore-forming fluid of reductivity. The difference between volcanic rock type and granite type hydrothermal uranium deposits is wall rock composition, the difference of altered element association and ore-forming element association. It was believed that volcanic rock type and granite type hydrothermal uranium deposits belong to the Mesozoic-Cenozoic magmatism, tectonic activity and hydrothermal uranium mineralization system in South China. Uranium mineralization was formed in the unified deep geodynamic geotectonic background of the Mesozoic-Cenozoic in South China, with a unified formation mechanism.

**Keywords:** volcanic rock type uranium deposit; granite type uranium deposit; common characteristics; formation mechanism; deep source