

# 湖南诸广山复式岩体与铀成矿作用

肖振华, 杨忠鼎, 刘学文, 李春华

湖南省核工业地质局三〇二大队, 湖南 郴州  
Email: 1440446845@qq.com

收稿日期: 2021年1月14日; 录用日期: 2021年2月19日; 发布日期: 2021年2月26日

## 摘要

诸广山复式岩体地处湘赣粤三省交界, 为我国重要的铀多金属成矿岩体、成矿带, 内含著名的鹿井铀矿田。岩体内产出的铀矿床均属花岗岩中低温热液型铀矿床, 铀矿床成因和空间上均与花岗岩体有着密切的关系。诸广山复式岩体规模巨大, 为多期次、多阶段的复式岩基, 热液活动十分强烈。铀成矿作用主要与印支-燕山期岩浆岩活动有关。铀矿床属于地幔流体成矿作用范畴。与铀矿化有关的热液活动大体可分矿前期、成矿期、矿后期。成矿流体中的铀主要来源于地幔流体在上升过程中与地壳岩石相互作用过程中的浸取。铀矿田均处于区域深大断裂交汇区, 铀矿床定位于主干构造交汇处, 铀矿体多赋存于次级构造产状的变异部位。在总结该区铀矿床产出的地质背景、铀成矿基本特征和主要控矿因素的基础上, 总结了区内铀矿成矿模式, 指出了区内主要的铀矿找矿标志和找矿方向, 为区内下一步铀矿勘查工作提供借鉴。

## 关键词

诸广山复式岩体, 铀成矿作用, 成矿模式, 找矿标志

# Zhuguangshan Composite Rock Mass and Uranium Mineralization in Hunan Province

Zhenhua Xiao, Zhongding Yang, Xuewen Liu, Chunhua Li

No. 302 Brigade, Hunan Nuclear Industry Geology Bureau, Chenzhou Hunan  
Email: 1440446845@qq.com

Received: Jan. 14<sup>th</sup>, 2021; accepted: Feb. 19<sup>th</sup>, 2021; published: Feb. 26<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Zhuguangshan composite rock mass is located at the junction of Hunan, Jiangxi and Guangdong provinces. It is an important uranium polymetallic metallogenic rock mass and metallogenic belt in China, containing the famous Lujing uranium ore field. The uranium deposits in the rock mass belong to granite medium-low temperature hydrothermal type uranium deposits. The genesis and

space of uranium deposits are closely related to granite bodies. Zhuguangshan complex rock mass is a large-scale, multi-stage, multi-stage complex rock base, hydrothermal activity is very strong. Uranium mineralization is mainly related to Indosinian-Yanshanian magmatic activities. The uranium deposit belongs to the category of mantle fluid mineralization. Hydrothermal activities related to uranium mineralization can be roughly divided into pre-mineralization, mineralization and post-mineralization. Uranium in ore-forming fluids mainly comes from the leaching of mantle fluids in the process of interaction with crustal rocks during the ascending process. Uranium ore fields are located in the intersection area of regional deep faults. Uranium ore deposits are located at the intersection of main structures, and uranium ore bodies are mostly located in the variation part of secondary structural occurrence. On the basis of summarizing the geological background, basic characteristics of uranium mineralization and main ore-controlling factors of uranium deposits in the area, the uranium metallogenic model in the area is summarized, and the main prospecting indicators and prospecting directions of uranium deposits in the area are pointed out, which provides reference for the next uranium exploration work in the area.

## Keywords

Zhuguangshan Complex Rock Mass, Uranium Mineralization, Metallogenic Model, Prospecting Signs

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

湖南诸广山岩体地处湘赣粤三省交界, 内含著名的鹿井铀矿田, 为我国重要的铀资源基地之一。区内铀矿床均属花岗岩中低温热液型铀矿床, 成因和空间上均与花岗岩体有着密切的关系。上世纪鹿井矿田内就已探明了 1 个大型、4 个中型、7 个小型共 12 个铀矿床, 提交铀资源量超万吨。以往南京大学、核工业北京地质研究院、核工业二三〇研究所、中国地质科学院地质研究所、核工业中南地勘局三〇二大队等主要针对该区某一个(种)岩体做了铀含量、定年、矿物、同位素特征研究等基础科研工作, 较少系统论述复式岩体与铀成矿的关系[1] [2] [3] [4] [5]。近 20 年来, 302 大队、230 所、306 大队、东华理工大学、核工业北京地质研究院等持续在该区开展铀矿地质工作。特别是针对“湖南省诸广山岩体中部铀多金属矿整装勘查区”开展了关键基础地质研究、专项填图与技术应用示范、矿产调查与找矿预测、铀矿地质调查等基础地质科研工作[6]-[13]。随着勘探的继续, 区内铀矿资源量还在不断上升。总结近 20 年来区内铀矿找矿成果和经验, 分析探讨岩体活动与铀成矿作用, 对该区今后铀矿勘查工作具有重要意义[14]。

## 2. 区域地质背景

研究区位于南岭成矿带的北缘, 诸广山铀成矿带的中段, 大地构造位于华南造山带粤湘赣早古生代沉陷带炎陵-汝城冲断褶隆带东部隆起区[15] [16]。区内地层出露基本齐全, 震旦-寒武系构成的加里东褶皱基底直接与诸广山岩体接触并被重熔。震旦-寒武系沉积厚度 5~13 km, 为一套含铀的黑色岩系, 平均铀含量  $8 \times 10^{-6}$ , 其中震旦系中上部和寒武系下部铀含量  $(11.3 \sim 16.4) \times 10^{-6}$  [17], 是区内主要含铀层位。

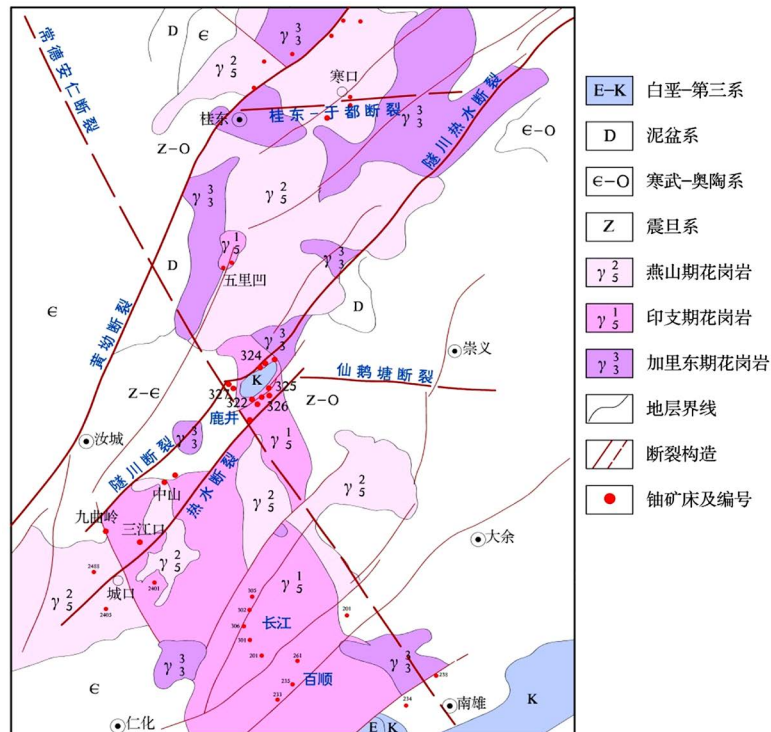
诸广山岩体侵入时代最早为加里东期, 随后为海西期、印支期、燕山期, 侵入的高峰期为印支-燕山期, 经过多次重熔改造、分异演化, 形成规模巨大的含铀复式岩体, 其岩性复杂, 酸性岩类、中酸性岩类, 中基性岩类均有发育。印支-燕山期岩体平均铀含量  $18.35 \times 10^{-6}$ , 燕山早期岩体平均铀含量高达  $20.20 \times 10^{-6}$  (表 1、图 1), 印支-燕山期花岗岩富硅、偏碱且富含挥发份, 对形成铀多金属矿床十分有利。

区内断裂构造发育，主要为NE向、NNE向、NEE向、NW向、近SN向及近EW向断裂。NE向黄坳断裂、遂川-热水断裂形成的断陷带主要控制了区内铀矿及其他多金属矿产[18]。NW向常德-安仁基底隐伏断裂通过研究区中部。EW向桂东-于都断裂穿过研究区北部寒口一带；EW向仙鹅塘断裂通过鹿井矿田东部。主断裂的次级构造发育，为铀成矿提供了良好的构造条件(图 1) [19]。

**Table 1.** U and Th content of subgranites of various stages in central Zhuguangshan pluton  
**表 1.** 诸广山岩体中段各期次花岗岩 U、Th 含量

侵入时代			样品数	铀含量		钍含量		钍铀比值
期	阶段	代号		变化范围 ( $\times 10^{-6}$ )	平均值 ( $\times 10^{-6}$ )	变化范围 ( $\times 10^{-6}$ )	平均值 ( $\times 10^{-6}$ )	
燕山晚期	第一阶段	$\gamma_5^{3-1}$	5	6~29	15.6	3~6	4.5	0.29
	第三阶段	$\gamma_5^{2-3}$	15	7~45	20.5	10~63	37.8	1.84
燕山早期	第二阶段	$\gamma_5^{2-2}$	4	14~29	20.5	8~34	23.3	1.14
	第一阶段	$\gamma_5^{3-1}$	56	8~38	19.6	27~60	41.7	2.13
印支期	第三阶段	$\gamma_5^{1-3}$	3	4~21	14.3	4~5	4.3	0.30
	第二阶段	$\gamma_5^{1-2}$	68	4~38	19.6	8~44	20.6	1.05
加里东期	第三阶段	$\gamma_3^3$	10	4~17	7.1	16~20	17.8	2.51

资料来源：三 0 二大队. 1988；二 三 0 研究所. 1998；北京地质研究院. 1991。内部资料。



**Figure 1.** Regional geological map of middle-north section of Zhuguangshan rock mass  
**图 1.** 诸广山岩体中北段区域地质略图

### 3. 诸广山复式岩体特征

诸广山复式岩体是规模巨大、多阶段、多期次的复式岩基(图 1), 岩浆活动频繁, 从加里东期至燕山晚期均有岩浆侵位, 岩性复杂, 既有酸性岩类、中酸性岩类, 又有中性、基性岩类。根据岩体与围岩接触关系、岩体之间接触关系及同位素年龄资料, 诸广山岩体中北段岩浆活动期次可分为加里东期、印支期、燕山早期及燕山晚期, 各阶段岩体中又有多期次的补充侵入体发育, 构成较完整的构造 - 岩浆旋回(表 2) [20]。

**Table 2.** Division table of intrusion periods of middle-north section of Zhuguangshan rock mass  
**表 2.** 诸广山岩体中北段岩体侵入期次划分表

期	阶段	代号	主要岩性	代表性岩体	同位素年龄(ma)
燕山晚期		$\beta_5^3 \cdot \chi_5^3$	辉绿岩、煌斑岩	官昌、庙背岩脉	
		$\tau_5^3 \cdot \rho_5^3$	细晶岩、伟晶岩	九岭、院中坑、牛尾岭小岩体	
		$\gamma\pi_5^3 \cdot \lambda\pi_5^3$	花岗斑岩、石英斑岩	蔡家、沙坝子、鹿井小岩体	
		$\gamma_5^3$	细粒白(二)云母花岗岩	算坪山	b105-128
燕山早期	第三阶段	$\gamma_5^{2-3}$	细粒黑(二)云母二长花岗岩	中棚	b140-143
	第二阶段	$\gamma_5^{2-2}$	中细粒二云母花岗岩	乐洞、鹅形、谭官坝、下洞	b152, w157, Zr160
	第一阶段	$\gamma_5^{2-1}$	中粗粒斑状黑云母二长花岗岩	九峰	Zr169, W172, b168
印支期	第三阶段	$\gamma_5^{1-3}$	中粒白(二)云母二长花岗岩 中细粒二云母二长花岗岩	洲田、小坑	b199
	第二阶段	$\gamma_5^{1-2}$	中粗粒黑云母二长花岗岩	热水-文英、长垌、大窝子	b219
	第一阶段	$\gamma_5^{1-1}$	中细粒白(二)云母花岗岩		
加里东期		$\gamma O_3^3$	黑云母花岗闪长岩	寨前、桂东、上堡	358-388
		$\delta O_3^3$	石英闪长岩	汤湖、益将、流溪	418-427

同位素年龄测定方法: Zr-锆, W-全岩, b-黑云母。

研究区中部和南部主要为印支 - 燕山期岩体, 北部广泛出露加里东期花岗岩。其中印支 - 燕山期岩体与铀成矿关系密切, 铀含量高达  $(14.3 \sim 20.5) \times 10^{-6}$ , 为花岗岩类岩石平均铀含量的 4~5 倍。印支期岩体以黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩为主, 燕山期岩性变化范围大、演化充分, 晚期有很多花岗岩株、岩脉侵入早期岩体中。

加里东期岩体主要为上堡岩体、益将岩体及流溪岩体。上堡岩体为中细粒黑云母花岗闪长岩; 益将、流溪岩体主要为石英闪长岩, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $424 \pm 3 \text{ Ma}$  [3], 局部为石英辉长岩、英云闪长岩和花岗闪长岩。

印支期岩体由白云圩、热水 - 文英、长垌和新坊等岩体组成南北向花岗岩带。热水 - 文英岩体呈“入”字型岩基产出, 面积  $241 \text{ km}^2$ 。主体过渡相为中粗粒黑云母(二长)花岗岩, 中心相及边缘相不发育, 岩性分别为粗粒似斑状黑云母花岗岩、中细粒似斑状白(二)云母花岗岩。小坑岩体分布于本区北部, 呈南北向展布, 呈小岩株产出, 为中粒含电气石白(二)云母二长花岗岩、中细粒二云母二长花岗岩, 其边缘相变为细粒电气石二云母二长花岗岩, 与印支期第二阶段岩体呈侵入接触。

燕山期岩体以九峰岩体、乐洞岩体及中棚岩体为代表。九峰岩体为中粗粒斑状黑云母二长岩，次为中粒角闪石黑云母二长花岗岩；乐洞岩体为中细粒二云母花岗岩，与热水-文英岩体、九峰岩体呈超动接触关系；中棚岩体呈岩基产出，为细粒黑(二)云母二长花岗岩，与九峰岩体、文英岩体呈侵入接触。燕山晚期有呈岩瘤、岩枝、岩脉产出的酸性岩类及中基性岩类。

研究区内辉绿岩分布广泛，北部长垄-桂花树下辉绿岩脉呈近东西向分布；中部沿高排、棉家洞、官昌一带呈北西向分布，长 9.15 km，宽数米至 40 m，为区内规模最大的基性岩；在东南部西坑辉绿岩脉呈北西向断续分布；在南部庙背辉绿岩脉呈近东西向展布，此外从文英至乐洞、西坑一线辉绿岩脉呈北北东向断续分布。

区内晚侏罗世火山岩在汝城县横山盆地呈北东向层状出露，岩性为玄武质沉积火山角砾岩、玄武岩。此外在丰州盆地下部灰色层中见玻屑晶屑凝灰岩，凝灰质晶屑砂砾岩等。

区内地壳经历多次构造-岩浆活动，铀元素的分异富集较为充分；铀成矿作用主要与地洼阶段的印支-燕山期岩浆岩活动有关，且在其补充侵入体期次多的繁杂地段更为有利；构造-岩浆活动越充分越有利于铀的分异富集。区内印支-燕山期岩体内各种小岩株、岩脉及交代蚀变带发育，如花岗斑岩脉、石英斑岩脉、正长石脉、辉绿岩脉、煌斑岩脉及石英硅化带(图 2) [21]；绿泥石化、绢英岩化、水云母化、赤铁矿化、黄铁矿化、萤石化、钾长石化、钠长石化、电气石化等热液交代蚀变发育地段更有利于铀成矿(图 3) [22] [23]。它表明区内不仅构造-热液活动强烈，还反映可能有深幔源物质参与。多期的热液蚀变作用表明有多期次铀成矿的前后累积叠加的可能性。如果在岩体出露的繁杂区又出现铀地球化学偏高场、高场，则是岩体地质特征与铀成矿的直接联系标志。

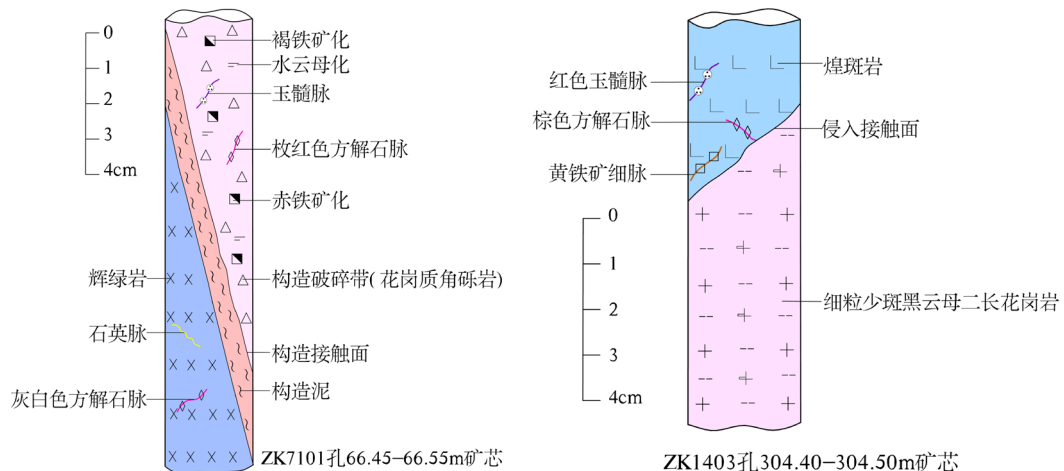
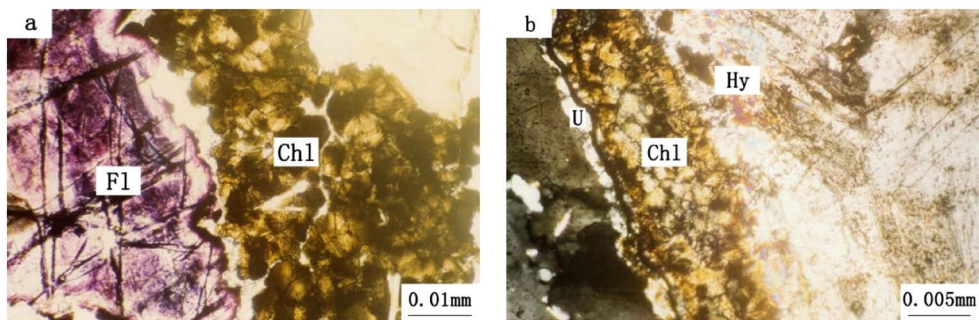
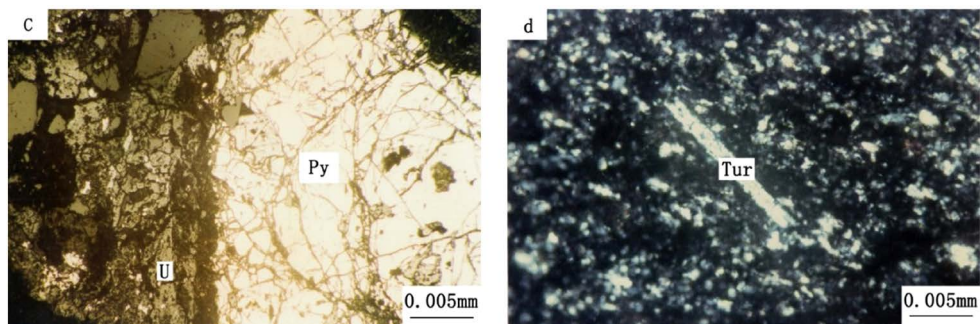


Figure 2. A sketch of the ore in borehole of Miaobeilong deposit

图 2. 庙背垅矿床钻孔矿石素描图







a.绿泥石化 - 萤石化; b.绿泥石化 - 水云母化; c.沥青铀矿沿黄铁矿边缘发育; d.含炭板岩。Chl.绿泥石; Fl.萤石; Hy.水云母; Py.黄铁矿; Tur.电气石

Figure 3. Micrograph of altered minerals in the study area

图 3. 研究区蚀变矿物显微照片

## 4. 复式岩体与铀成矿

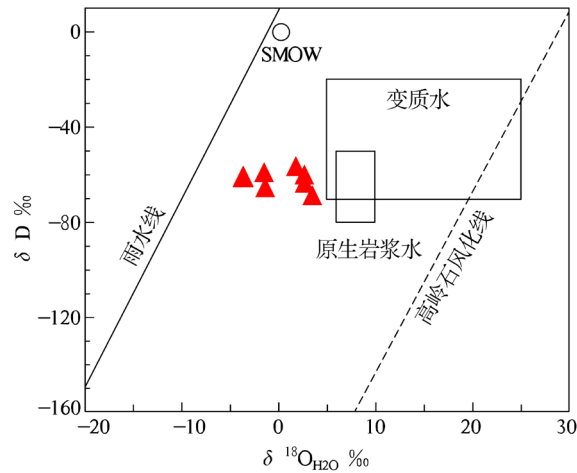
### 4.1. 成矿流体来源

研究区内矿床不同成矿期石英的氢氧同位素分析结果见表 3 [20], 由表可见, 矿前期石英的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  都为正值, 其变化范围为(2.39~7.50)‰; 成矿期  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值下降, 一部分转化为负值(0.03~-1.49)‰; 到了矿后期  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值进一步下降, 全为负值。原生包体中的水常常代表了原始成矿溶液, 其氧同位素由于易和周围含氧矿物中的氧进行同位素交换, 通常较难准确反映成矿溶液原始氧同位素特征。而岩石和矿物中氢的含量比水中的氢含量小得多, 同位素交换对包体水的氢同位素组成影响很小, 因此可利用包体水的氢同位素值, 结合矿物石英的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值, 判断成矿热液来源。成矿期  $\delta\text{D}_{\text{水}} = -50.9\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = (0.03\sim-1.49)\text{‰}$ , 位于典型岩浆水和大气降水( $\delta\text{D}_{\text{水}} = -45\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = -8.2\text{‰}$ )氢氧同位素之间。根据以上氢氧同位素分析结果和 H-O 同位素图(图 4) [20], 并结合地质概况, 认为矿床成矿前的热液主要为岩浆热液, 这种岩浆热液并不是指岩浆结晶分异到晚期富含挥发分的残余岩浆, 而是指结晶分异结束后, 残余在结晶矿物颗粒之间裂隙中的裂隙溶液在晚期各种脉岩侵入和构造活动过程中重新汇聚而形成的热液。成矿期热液主要来自岩浆热液和大气降水的混合热液。矿后期主要来自大气降水。

Table 3. Table of H and O isotope analysis results of quartz in each stage of the study area

表 3. 研究区内各期次石英的 H、O 同位素分析结果表

矿化期次		测定矿物	温度(°C)	$\delta^{18}\text{O}$ 石英‰ (SMOW)	$\delta^{18}\text{O}$ 水‰ (SMOW)
氧同位素	矿前期	石英	300	10.9	4.34
		石英	297	9.3	2.64
		石英	310	13.72	7.5
		石英	290	9.3	2.39
	成矿期	灰色石英	279	5.83	-1.49
		灰色石英	283	7.2	0.03
		梳状石英	150	7.2	-10.61
		梳状石英	220	4.41	-8.02
矿后期	梳状石英	217	5.22	-7.39	
	梳状石英	217	5.22	-7.39	
矿化期次		测定矿物	温度(°C)	矿物包裹体 $\delta\text{D}$ ‰ (SMOW)	
氢同位素	矿前期	石英	290	-62.7	
	成矿期	石英	210	-50	



**Figure 4.** Hydrogen-oxygen isotopic composition of fluid in the study area  
**图 4.** 研究区内流体氢-氧同位素组成

#### 4.2. 成矿物质来源

硫同位素组成对研究成矿物质来源和探讨矿床成因具有重要的指示意义，内生热液矿床中硫的来源主要有 3 类：幔源硫、壳源硫和混源硫。幔源硫的同位素组成十分稳定，变化范围很窄，其  $\delta^{34}\text{S}$  值一般在零附近，且随酸度的增大，其绝对值在一定范围内有变宽的趋势；壳源硫的同位素组成不稳定，变化范围均非常广，如来自大洋水和海水蒸发盐类一般以强烈富集重硫为特征，沉积来源硫则多为负值；混源硫即自然界中各种硫源的硫混合所成，其同位素组成特征由于不同硫源的种类和含量差异而无固定的范围。

通过野外和显微镜下观察已知，鹿井铀矿床矿石中的硫化物组合简单，主要为黄铁矿，次为极少量的方铅矿、黄铜矿和闪锌矿，未见硫酸盐矿物和磁黄铁矿，因此可以利用黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  近似代表鹿井铀矿床成矿流体的硫同位素组成。通过对鹿井矿床内矿石共生的黄铁矿 S 同位素测试(表 4) [20]，鹿井铀矿床矿石中的黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  值在(-14.4~+13.9)‰之间，均值为-3.9‰，均一化程度较低，分布区间较大，因此鹿井铀矿床成矿物质来源具有多重来源。进一步比较后发现矿石中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值与区内寒武系浅变质岩和重熔改造型印支期花岗岩的  $\delta^{34}\text{S}$  范围大致相同(表 5) [20]，说明与铀矿物共生黄铁矿中的硫主要是由这两者所提供的，继而说明成矿物质也可能是来自于这两者。

**Table 4.** Sulfur isotope composition of symbiotic pyrite in Lujing deposit

**表 4.** 鹿井矿床共生黄铁矿的硫同位素组成

序号	样号	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ (‰)
1	LK-8	黄铁矿	1.6
2	LJ14-17	黄铁矿	-2.8
3	LJ14-12	黄铁矿	-3.5
4	LJ14-11	黄铁矿	-3.6
5	LJ14-15	黄铁矿	-3.9
6	LJ14-14	黄铁矿	-6
7	LJ-6	黄铁矿	-7.7
8	LJ-9	黄铁矿	-12.9
9	LF-3	黄铁矿	13.9
10	LF-1	黄铁矿	-14.4

**Table 5.** Sulfur isotope composition of pyrite in rocks and ores of Lujing deposit  
**表 5.** 鹿井矿床岩石与矿石中黄铁矿的硫同位素组成

样品岩性/种类	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)		样品个数	数据来源
		范围	平均值		
矿石	黄铁矿	-14.4~+13.9	-3.9	10	吴治南等, 2016 [20]
寒武系浅变质岩	黄铁矿	-9.2~+4.4	-8.6	6	王明太等, 1999 [4]
前中生代花岗岩		-9.1~+13.4	-1.28	14	
下寒武统浅变质岩	未知	-19.9~+1.8	-8.34	5	沈吉等, 1991 [5]
印支期花岗岩		-12.4~+4.3	-1.95	10	
燕山期花岗岩		-1~+1.3	+0.24	5	

### 4.3. 矿化剂( $\text{CO}_2$ )来源

结合鹿井矿田内的矿石类型, 研究区内矿化剂主要是  $\text{CO}_2$ , 其在热液中的存在和迁移形式为  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  和  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_4^{4-}$  络合物。通过鹿井矿田内矿石样分析测试其 C、O 同位素组成(表 6) [20], 矿石中方解石的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值为(-8.75~1.40)‰, 平均值为-5.41‰, 但两个主要区间为(-7.05~-8.75)‰和(-2.06~-1.40)‰, 前者 6 个方解石样品的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值落入深部岩浆或地幔脱气作用范围内, 后者 3 个样品的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值落入海相沉积碳酸盐岩范围内;  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  值为 5.45~18.62, 变化范围较大, 平均值为 13.02‰。将样品数据投影在  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  图解上发现, 有 6 件样品的投影点位于地幔多相体系和花岗岩区域, 其中 4 件受到低温蚀变作用影响, 另有 3 件样品的投影点位于海相碳酸盐岩区域并受到碳酸盐溶解作用的影响, 表明鹿井铀矿床成矿流体中的碳主要来自深部岩浆或地幔, 部分来自沉积碳酸盐岩。

**Table 6.** Carbon and oxygen isotope composition of calcite in Lujing deposit  
**表 6.** 鹿井矿床方解石碳氧同位素组成

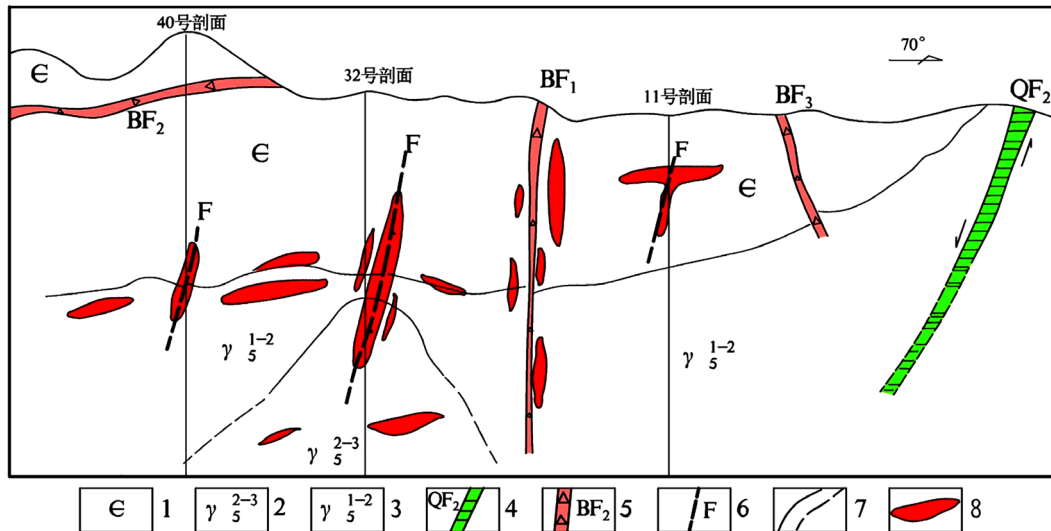
样品编号	测试矿物	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$
LK-12	方解石	-8.75	-17.59	12.78
LK-7-1	方解石	-8.66	-17.67	12.69
LK-7-2	方解石	-8.24	-24.7	5.45
1003	方解石	-8.00	-18	12.35
1001	方解石	-7.10	-17.41	12.96
LK-16	方解石	-7.05	-21.74	8.50
LJ-8	方解石	-2.06	-16.12	14.29
LJ-4	方解石	-0.23	-11.92	18.62
LJ-9	方解石	1.40	-13.04	17.47

研究区内大量的基性岩脉出露, 可能为本区提供了幔源的矿化剂。由此看来, 成矿热液中的矿化剂  $\text{CO}_2$  主要是来自地幔脱气作用, 可能微量由海相碳酸盐岩所提供。晚白垩世( $\text{K}_2$ )至渐新世( $\text{E}_2$ ), 区内由挤压作用为主转变为拉张作用为主, 主要控矿构造遂川-热水走滑断裂就是在此背景下由压扭性走滑断层逐渐转变为张扭性走滑断层[24], 并产生了大量的张性裂隙, 此次构造事件持续时长与鹿井矿田的成矿年龄十分接近, 因此矿化剂  $\text{CO}_2$  很有可能是通过岩石圈伸展拉张导致的地幔脱气作用而加入到成矿流体中的。



#### 4.4. 铀矿化定位

多期次岩浆活动中心, 不同期次岩浆侵入接触部位, 不同岩性接触部位及细粒花岗岩与粗粒花岗岩圈围部位等, 是成矿最有利部位, 也是寻找大型矿床的有利部位(图 5) [20]。岩浆活动中心产生的自交代白云母化、碱交代作用, 热液蚀变形成的绢云母化、水云母化、绿泥石化、长石红化、赤铁矿化等相互迭加部位、蚀变强烈、分布范围宽广地段, 是矿化有利的地段。蚀变强烈部位且又存在成矿期构造是矿化最有利的地段。区内铀矿床内围岩蚀变水平分带现象明显, 往往中心具强硅化, 两侧发育红化、赤铁矿化、水云母化、绿泥石化、碱交代等, 且从中心向两侧由强到弱, 其中心的硅化岩及硅化碎裂岩是矿体的赋存部位。



1.寒武系; 2.燕山早期第三阶段细粒少斑黑云母花岗岩; 3.印支期第二阶段中粗粒似斑状黑云母花岗岩; 4.石英硅化带; 5.角砾岩带; 6.隐伏断层; 7.地质界线; 8.铀矿体

Figure 5. Schematic diagram of longitudinal section of Lujing deposit

图 5. 鹿井矿床纵剖面示意图

良好的还原环境是铀成矿必须具备的条件, 区内富铀花岗岩体是富含还原气体的岩体, 且晚期小岩体中还原气液包裹体中有大量  $H_2$ 、 $CO$  存在, 氢、烃还原气体有助于铀的还原沉淀和富集成矿。此外本区富铀矿多产于绿泥石化蚀变带和中基性岩脉发育部位, 这些部位的围岩中常含有较多的  $Fe^{2+}$ , 因而也为铀成矿提供了丰富的还原剂。绿泥石化在化学成分上的变化主要是岩石的硫化和水化, 其副矿物中的黄铁矿含量显著增加, 因此, 绿泥石化带本身又可起到还原障的作用, 这对于铀成矿无疑是十分有利的地球化学背景场。

### 5. 成矿模式

根据诸广山地区花岗岩型铀矿床产出的地质背景、铀成矿基本特征和主要控矿因素, 判定该区花岗岩型铀矿床的形成, 是在有利的大地构造和深部构造背景的条件下, 在地幔热流的作用下, 以地幔流体作用等综合地质作用的产物。

#### 5.1. 铀源

形成铀矿床的铀主要来源于富铀花岗岩活化的铀, 部分铀也可能来自地幔流体从深部地壳和上部地壳中萃取的铀, 及燕山晚期酸性岩浆熔体结晶过程中分离进入流体的铀。

## 5.2. 铀成矿热液

在地质环境比较封闭条件下的铀成矿早期，成矿热液以岩浆残留流体或幔源碱质流体为主的内生热液。在半封闭半开放地质环境条件下的铀成矿中期，成矿热液以岩浆残留流体、地幔碱质流体与大气降水不同程度相混合的混合热液为主。在地质环境趋向开放的铀成矿晚期，大气降水下渗作用更加剧烈，成矿热液以加热大气降水为主。铀成矿热液中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  等挥发性组份，主要来自燕山晚期的基性岩浆和幔源碱质流体。

## 5.3. 铀的迁移沉淀

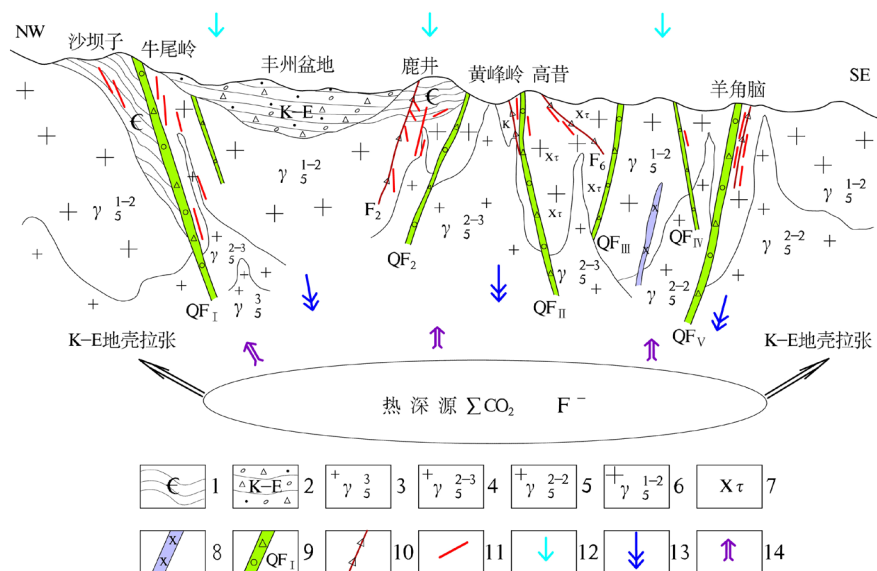
铀在成矿溶液中主要以二碳酸铀酰离子 ( $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ ) 形式搬运，部分以  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 、 $(\text{UOF}_4^{2-})^{2-}[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2]^{2-}$  形式等搬运。铀从热液中沉淀的方式，主要是由于热液体系的压力骤然降低，热液中  $\text{CO}_2$  逸出或  $\text{CO}_3^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  的结合，致使碳酸铀酰离子分解，从而导致铀从溶液中沉淀成矿。花岗岩型铀矿的成因类型应属于地幔热液作用过程中以地幔流体作用为主因的复成因热液型铀矿床。

## 5.4. 铀矿床形成的过程

1) 在地幔热柱的地幔流体参与作用下，含铀或富铀古陆壳(前寒武纪变质基底)重熔上侵形成印支期—燕山早期富铀花岗岩体，经岩体的自变质、它变质作用的改造，岩石的部分稳定铀转化为活性铀。

2) 燕山晚期，地壳伸展减薄、拉张断陷的强烈构造活动时期，地幔碱质流体上升，壳源或壳幔混合的酸性岩浆和幔源基性岩浆上侵，不仅使早期岩体岩石中的铀进一步遭受它变质作用、碱质交代作用、构造热液作用等强烈改造与活化，而且为铀成矿直接提供了丰富的热能、热流体和矿化剂。

3) 燕山晚期，岩浆残留体、幔源碱质流体、或两者的热能与含铀大气降水相混合而成的混合流体，伴随断裂构造与深部热动力的驱动，在花岗岩等围岩中渗流汲取铀，并在有利于铀沉淀的物理化学条件下最终富集沉淀形成铀矿床(图 6) [20]。



1.寒武系浅变质岩; 2.白垩纪岩层; 3.燕山晚期细粒二云母花岗岩; 4.燕山早期第三阶段细粒少斑状黑云母花岗岩; 5.燕山早期第二阶段中细粒二云母花岗岩; 6.印支期第二阶段中粗粒似斑状黑云母花岗岩; 7.碱交代; 8.基性岩脉; 9.硅化断裂带; 10.角砾糜棱岩带; 11.铀矿体; 12.大气降水; 13.深循环流体; 14.成矿流体

Figure 6. Uranium mineralization model map of Lujing ore field

图 6. 鹿井矿田铀矿成矿模式图

## 6. 找矿标志与找矿方向

### 6.1. 找矿标志

- 1) 多向多组构造交汇部位。
- 2) 张扭性断裂构造带。成矿构造带的力学性质以张扭性为主，早期为压性、压扭性，成矿期主要为张性、张扭性迭加，且成矿深度较大，是深部找隐伏矿的重要标志。
- 3) 热液蚀变发育地段。矿前期发育白云母化、碱交代绢云母化等各种面型蚀变；成矿带则发育水云母化、红化、绿泥石化等蚀变，与铀成矿关系密切的赤铁矿化，胶状黄铁矿化、紫黑色萤石化、红色微晶石英、棕红色玉髓等发育地段，是直接的找矿标志。当有多期热液活动叠加时，铀矿化规模更大，品位更富。
- 4) 中基性岩脉、碱交代岩发育地段并有构造穿切交汇部位。
- 5) 不同岩体(岩性)接触部位，特别是富铀花岗岩体接触部位。区内发现的铀矿体多在铀含量高的印支期—燕山期的花岗岩体内，且在岩体接触部位有较好的铀矿体产出。
- 6) 构造蚀变带深部，且具有一定规模、延伸稳定、并有弱还原弱碱性环境地段。
- 7) 物化探成矿信息明显地段。面积大、连续性好的铀分量、土壤热释光、伽玛能谱异常区；复合构造蚀变带深部低电阻率带区；电磁法测量具有一定规模、延深较大、且地表物化探异常显示良好的构造带。

### 6.2. 找矿方向

诸广山铀成矿带位于华夏陆块的粤湘赣早古生代沉陷带的炎陵—汝城冲断褶隆带，北北东向断裂带是主要控矿构造，三叠纪—侏罗纪花岗岩是重要的产铀岩体，矿床、矿体受断裂构造控制。该区成矿地质条件十分优越，已发现的矿床矿点较多，许多放射性异常(矿化)点晕尚未深入工作，是湖南省寻找热液型铀矿最具潜力区，近年来铀矿找矿也取得较大突破。该区找矿应以热液型花岗岩型铀矿为主攻目标，进一步找寻鹿井式、沙坝子式、黄峰岭式、羊角脑式铀矿床，积极探索铀矿脉与暗色岩墙交点型—下庄式铀矿床、高温绢英岩化蚀变碎粉岩带型—石土岭式铀矿床，并在区内寻找与岩浆作用有关的稀有、稀土和有色金属矿床。

## 7. 结论

诸广山复式岩体产出的铀矿床均属花岗岩中低温热液型铀矿床，铀矿床成因和空间上均与花岗岩体有着密切的关系。诸广山复式岩体规模巨大，为多期次、多阶段的复式岩基，热液活动十分强烈。铀成矿作用主要与印支—燕山期岩浆岩活动有关。铀矿床属于地幔流体成矿作用范畴。与铀矿化有关的热液活动大体可分矿前期、成矿期、矿后期。成矿流体中的铀主要来源于地幔流体在上升过程中与地壳岩石相互作用过程中的浸取。铀矿田均处于区域深大断裂交汇区，铀矿床定位于主干构造交汇处，铀矿体多赋存于次级构造产状的变异部位。在总结该区铀矿床产出的地质背景、铀成矿基本特征和主要控矿因素的基础上，总结了区内铀矿成矿模式，指出了区内主要的铀矿找矿标志和找矿方向，为区内下一步铀矿勘查工作提供借鉴。

## 致 谢

文中引用的一些数据、成果，主要来自近年湖南省核工业地质局三〇二大队(东华理工大学、核工业北京地质研究院)承担的有关科研、地质调查及矿产勘查项目，主要成果是项目组集体智慧的结晶。在此表示感谢。

## 基金项目

中国地质调查局发展研究中心整装勘查区关键基础地质研究、整装勘查区专项填图与技术应用示范项目(编码: 12120114052301)。

## 参考文献

- [1] 张万良, 何晓梅, 吕川, 韦金文. 鹿井铀矿田成矿地质特征及控矿因素[J]. 铀矿地质, 2011, 27(2): 81-87.  
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-0658.2011.02.004>
- [2] 张金带, 李子颖, 蔡煜琦, 郭庆银, 李友良, 韩长青. 全国铀矿资源潜力评价工作进展与主要成果[J]. 铀矿地质, 2012, 28(6): 321-326. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-0658.2012.06.001>
- [3] 王彦斌, 王登红, 韩娟, 陈郑辉, 王清利. 湖南益将稀土-钨矿的石英闪长岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征: 湘南加里东期岩浆活动的年代学证据[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 1062-1070.  
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-3657.2010.04.020>
- [4] 王明太, 罗毅, 孙志富, 朱杰辰, 李建红. 诸广铀成矿区矿床成因探讨[J]. 铀矿地质, 1999, 15(5): 279.  
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-0658.1999.05.004>
- [5] 沈吉, 赵懿英, 刘道忠. 华南诸广山花岗岩体中段锶氧铅硫同位素研究[J]. 岩石学报, 1991(2): 38-42.
- [6] 黄宏业, 黄思东, 蔡松峰. 湖南鹿井地区铀成矿地质背景及找矿思路分析[J]. 世界核地质科学, 2008, 25(2): 63-67. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1672-0636.2008.02.001>
- [7] 姜必广, 何友宇, 陈雄, 罗文琴, 谭奇, 覃金宁. “三九”地区三江口铀矿床成矿作用及成矿模式[J]. 铀矿地质, 2017, 33(5): 266-272. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-0658.2017.05.002>
- [8] 李冉, 王全涛. 湖南鹿井地区铀成矿地质背景及找矿思路分析[J]. 中国锰业, 2016, 34(3): 26-28.  
<http://dx.chinadoi.cn/10.14101/j.cnki.issn.1002-4336.2016.03.007>
- [9] 庞雅庆, 高飞, 夏宗强, 徐文雄, 许攸, 林坤, 赵琳. 诸广山岩体南部区域铀成矿模式及找矿方向[C]. 铀矿地质, 2015(z1): 322-329. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-0658.2015.S1.024>
- [10] 王前林, 蒋红安, 欧阳平宇, 张宇. 诸广中段中山地区铀矿床地质特征及找矿潜力分析[J]. 铀矿地质, 2017, 33(1): 16-21. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-0658.2017.01.003>
- [11] 刘翔, 陈小东, 邓志强, 黄小强, 包云河, 覃金宁, 肖振华, 汪力群, 应西荣. 湖南省铀矿床类型、成矿系列成矿谱系与找矿新进展[J]. 地质学报, 2020, 94(1): 127-148.
- [12] Xiao, Z.-H., Xiong, S.-B., Li, C.-H., Liu, Y., Yang, Z.-D., Feng, X.-X. and Liu, X.-W. (2020) Types of Uranium Deposits in Central Zhuguang Mountains in Hunan Province, South China and Their Metallogenic Regularity and Prospecting Directions. *China Geology*, 3, 411-424. <https://doi.org/10.31035/Cg2020040>
- [13] 黄罗昱. 桃山 - 诸广铀成矿带花岗岩型铀矿成矿规律研究主要进展[J]. 能源研究与管理, 2018(2): 53-55.  
<http://dx.chinadoi.cn/10.16056/j.1005-7676.2018.02.014>
- [14] 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 郭庆银, 宋继叶, 范洪海, 刘武生, 漆富成, 张明林. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 1051-1069. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.0001-5717.2015.06.005>
- [15] 柏道远, 黄建中, 李金冬, 王先辉, 马铁球, 张晓阳, 陈必河. 华南中生代构造演化过程的多地质要素约束——湘东南及湘粤赣边区中生代地质研究的启示[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1): 1-13.  
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1001-1552.2007.01.001>
- [16] 柏道远, 黄建中, 刘耀荣, 伍光英, 马铁球, 王先辉. 湘东南及湘粤赣边区中生代地质构造发展框架的厘定[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 557-570. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-3657.2005.04.004>
- [17] 邵飞, 朱永刚, 郭湖生, 何晓梅, 邵上. 鹿井矿田铀成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 铀矿地质, 2010, 26(5): 295-300. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-0658.2010.05.007>
- [18] 孙岳, 潘家永, 肖振华, 刘颖, 潘春蓉, 钟福军, 赖静. 诸广山中部鹿井铀矿田构造解析与找矿远景探讨[J]. 中国地质, 2020, 47(2), 362-374.
- [19] 肖振华, 王自平, 蔡勋龙, 李春华, 吴治南, 等. 湖南省桂东县五里凹 - 桥头地区铀矿地质调查成果报告[R]. 郴州: 湖南省核工业地质局三〇二大队, 2019.
- [20] 吴治南, 肖振华, 刘颖, 等. 湖南省诸广山岩体中部铀多金属矿整装勘查区专项填图与技术应用示范报告[R]. 郴州: 湖南省核工业地质局三〇二大队, 2016.

- [21] 肖振华, 肖健健, 罗晨, 等. 湖南省汝城县庙背垅地区铀矿普查报告[R]. 郴州: 湖南省核工业地质局三〇二大队, 2019.
- [22] 闵茂中, 孟昭武, 刘兰中, 等. 牛尾岭铀矿床物质成分研究[R]. 南京: 南京大学地球科学系, 核工业中南地质局三〇二大队, 1997.
- [23] 位巧槐, 唐继宁, 梨建南, 等. 诸广岩体中段外带富矿段物质成分特征及找矿方向[R]. 长沙: 核工业中南地质勘探局二三〇研究所, 1988.
- [24] 刘翔, 肖建军, 杨崇秋, 全国珍, 曾宪科, 傅检生. 遂川 - 热水走滑断裂带特征及其对丰州盆地铀成矿的控制作用[J]. 铀矿地质, 1998(3): 142-149.