

华南花岗岩型铀矿成矿作用及成矿预测

范洪海, 庞雅庆, 何德宝, 陈东欢, 王勇剑, 孙远强, 耿瑞瑞

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

摘 要: 华南是我国花岗岩型铀矿主要产地。通过对华南地区不同类型花岗岩型铀矿区域地质背景、成矿作用特征、铀成矿机理以及控矿因素的综合分析, 认为华南不同类型花岗岩型铀矿床成矿作用具有相似性, 铀成矿具有多期、多阶段特征, 成矿物质铀主要来自富铀基底和花岗岩, 成矿流体具有壳源和幔源流体成分。花岗岩型铀矿属于深源地幔流体和大气降水共同参与的复成因成矿作用的产物, 断裂构造是最关键的控矿因素, 受控于中生代岩石圈伸展作用。在此基础上, 构建了华南地区区域铀成矿模式和预测评价模型, 预测了重点地区富大铀矿成矿远景区 4 片, 基于 GOCAD 软件开展了书楼丘、鹿井、沙子江矿床三维地质模型构建和深部铀成矿预测, 实现了“定型、定位、定深、定量”预测, 为华南地区下一步铀矿找矿工作部署提供了科学依据。

关键词: 成矿作用; 成矿模式; 成矿预测; 花岗岩型铀矿; 华南

中图分类号: P619.14 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2022.122101

Metallogenic Process and Prediction of Granite-related Uranium Deposits in South China

FAN Hong-hai, PANG Ya-qing, HE De-bao, CHEN Dong-huan, WANG Yong-jian,
SUN Yuan-qiang, GENG Rui-rui

Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology of China National Nuclear Corporation,
Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029

Abstract: South China hosts numerous granite-related uranium deposits. Based on the comprehensive study on the regional geological background, metallogenic characteristics, uranium metallogenic mechanism and ore-controlling factors of different types of granite-related uranium deposits in South China, it is concluded that the metallogenic processes of these uranium deposits have many similarities. Uranium mineralization is characterized by multiple stages. Uranium is mainly derived from uranium-rich basements and granitoids, and the ore fluids have crust-derived and mantle-derived components. Both deep mantle-derived fluids and meteoric water play important roles in the formation of granite-related uranium deposits controlled by Mesozoic–Cenozoic lithospheric extension. The fault is the most critical ore-controlling factor. Therefore, the regional uranium metallogenic models and prediction models in South China were established. Four uranium metallogenic prospective areas were predicted. Based on the GOCAD software, deep uranium metallogenic potential were predicted, and the three-dimensional geological models were established of Shulouqiu, Lujing and Shazijiang deposits. The positioning, quantifying, classifying, and depth-determining prediction of uranium resources were realized, which provides suggestions for the further deployment of uranium ore exploration work in South China.

Key words: metallogenic process; metallogenic model; metallogenic prediction; granite-related uranium deposits; South China

华南是我国花岗岩型铀矿主要产地, 铀矿床产于花岗岩体内及其外接触带 2 km 内, 主要有诸广

南部、鹿井、下庄、苗儿山、桃山、河草坑、大湾等矿田。前人围绕该地区花岗岩型铀矿开展了大量

本文由中核集团集中研发项目(编号: 地 LTD1602)和中国核工业地质局科研项目(编号: 202138-10; 202238-10)联合资助。

收稿日期: 2022-10-13; 改回日期: 2022-12-05; 网络首发日期: 2023-01-06。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 范洪海, 男, 1963 年生。博士, 正高级工程师。主要从事岩石地球化学及铀多金属成矿理论和成矿预测等研究工作。

E-mail: fhh270@263.net。

基础研究工作,取得了一系列研究成果。在铀源方面,认为铀源来自于分异岩浆(周维勋, 1996)、花岗岩(赵葵东和蒋少涌, 2015)、富铀地层或变质岩(邵飞等, 2014)、地幔(李子颖等, 1999; 李子颖, 2006; 姜耀辉等, 2004; 刘成东等, 2016)等; 在流体来源方面, 长期存在壳源(傅丽雯等, 2016)、幔源(杜乐天, 2011)、壳幔混合来源(庞雅庆等, 2019)之争; 在铀的沉淀机制方面, 减压及其导致的去气作用、降温、pH 值和 Eh 值的改变等都会导致铀的沉淀(赵凤民和沈才卿, 1986; 赵凤民, 2017; 金景福和胡瑞忠, 1987; 胡瑞忠和金景福, 1990; 胡瑞忠, 1994; 刘正义和刘红旭, 2009; Richard et al., 2012; 邵飞等, 2013)。近些年来随着新技术、新理论的不断出现, 在铀矿床年代学(刘汉彬等, 2015; Luo et al., 2015a, b; Bonnetti et al., 2018; 夏毓亮, 2019; 陈佑纬等, 2019; 钟福军等, 2019; 郭春影等, 2020; 赖静等, 2020; 陈琪等, 2021; 肖为等, 2022a, b)、铀矿物学(Li et al., 2015; Luo et al., 2017; 肖为等, 2022c)、成矿动力学(Hu et al., 2008; 胡瑞忠等, 2019; 祁家明等, 2022)、铀成矿机理(李子颖, 2006; 张国全等, 2007; 杜乐天和王文广, 2009; 刘成东等, 2016; 王

正庆等, 2018)、成矿预测及找矿潜力(胡瑞忠等, 2019; 耿瑞瑞等, 2020, 2021; 俞嘉嘉等, 2021)方面都取得了一系列进展和重要研究成果。结合前人的研究成果, 本文通过近些年来对华南花岗岩铀矿区域地质背景、成矿作用特征、铀成矿机理及铀成矿模式的归纳和总结, 预测了华南重点地区铀成矿远景区和典型矿床深部找矿方向, 为华南地区下一步铀矿找矿工作部署提供了科学依据。

1 区域地质背景

华南地区在大地构造上横跨武夷—云开—台湾造山系和扬子陆块区, 包含 3 个重点铀成矿带: 赣杭成矿带、桃山—诸广成矿带和雪峰山—摩天岭成矿带。区内地层发育齐全, 自震旦系至第四系均有出露。与铀成矿密切相关的变质基底为以震旦—寒武系为主体的早古生代地层。区内岩浆活动频繁而强烈, 从加里东期至燕山期, 均有明显活动, 多以大岩基产出或形成规模巨大的岩浆岩带, 形成区内重要的产铀花岗岩体, 比较典型的产铀花岗岩体有诸广山岩体、贵东岩体、苗儿山岩体、桃山岩体等(图 1)。

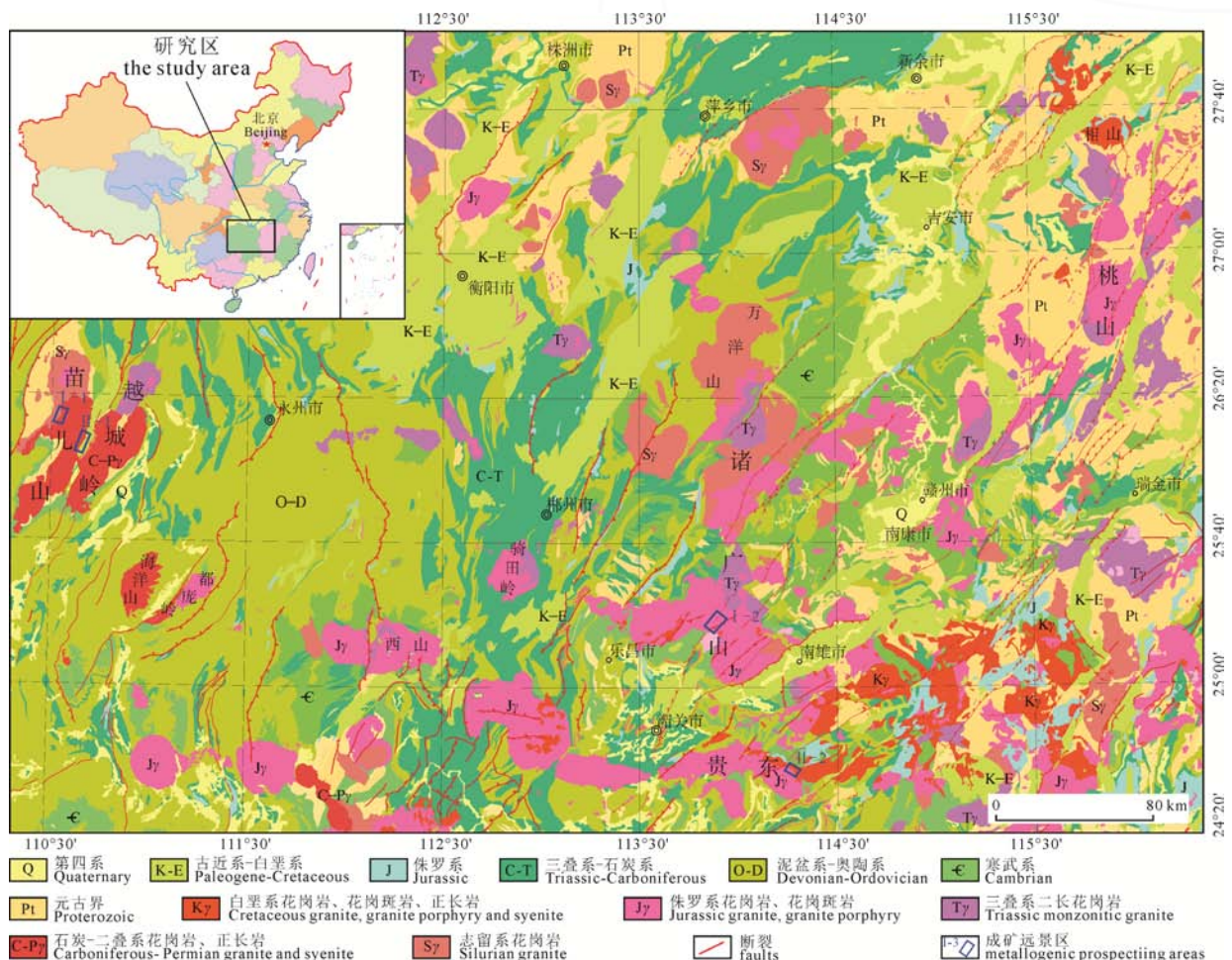


图 1 华南地区区域地质简图
Fig. 1 Geological sketch of South China

2 成矿作用特征

根据矿床赋存围岩特征, 可将花岗岩型铀矿床分为内带型、外带型和上覆盆地型 3 大类, 其中花岗岩内带型又可分为硅化断裂带型、酸性蚀变碎裂岩型、碱性蚀变碎裂岩型和硅化带交切中基性岩墙型(交点型)(范洪海等, 2012), 其中硅化断裂带型铀矿床分布最为广泛, 其次为酸性碎裂蚀变岩型。

硅化断裂带型铀矿床以棉花坑、东坑、希望等为代表。硅化带由各种不同粒度、结晶程度和颜色的石英、构造角砾、碎屑和蚀变岩石构成, 区域主干硅化断裂带一般不储矿, 矿体常赋存在主干断裂带的次级或更次级断裂的弧形弯曲部位、分支复合部位。铀矿物有晶质铀矿、沥青铀矿等, 成矿期蚀变有硅化、赤铁矿化、伊利石化, 矿化期特征矿物红色微晶石英、灰黑色微晶石英、紫黑色萤石、红色方解石与沥青铀矿共生, 是硅化带型铀矿找矿的主要标志。

酸性碎裂蚀变岩型铀矿床以大布、沙子江等为代表。铀矿体产于伊利石等酸性蚀变碎裂岩带中, 位于硅化断裂带之间或其上下盘, 呈带状产出, 通常岩石碎裂程度高, 蚀变强, 矿化比较密集。矿体为群脉状、网脉状, 矿体小而多, 在矿带中分布不均匀, 常形成矿体群。原生铀矿物为沥青铀矿、铀石, 蚀变具有垂向分带性, 从上往下分为紫色蚀变带(黄绿色伊利石+黑绿色绿泥石+胶黄铁矿)、红色蚀变带(赤铁矿+水针铁矿+钾长石)和绿色蚀变带(绿泥石+绿帘石+金属硫化物)。

碱性蚀变碎裂岩型铀矿床以黄蜂岭、高昔等为代表。碱性蚀变可分为钾交代和钠交代, 两种蚀变可以叠加出现。铀矿体赋存在碎裂碱交代岩中, 碱交代岩受区域性深断裂控制, 沿次级断裂带呈条带状分布, 矿化只产在碎裂的碱性蚀变岩中, 碎裂岩带的规模越大, 碎裂程度越高, 矿化的规模越大, 品位也越高。矿化蚀变具有分带性, 从矿体中心向外依次为碱交代带—赤铁矿化、绿泥石带—赤铁矿化、伊利石化带—伊利石化、绿泥石化带; 从上往下分为紫色带(铁染)—红色蚀变带(碱交代+赤铁矿化)—绿色蚀变带(绿泥石化+伊利石化+弱硅化+钠交代)。

交点型铀矿床以下庄、石角围等为代表。铀矿床定位于硅化带与中基性岩墙交切部位, 铀矿床受硅化带规模、岩墙厚度、交接复合方式和脉体错位大小等因素制约。当硅化带规模较大时, 成矿作用明显; 当岩墙规模较小时, 矿化不限于交点内部, 在交点外硅化带的其它有利构造部位也可以成矿;

当硅化带规模较小, 而岩墙厚度较大, 矿体则仅限于交点内且矿体品位高, 能形成特富矿脉, 铀矿物以脉状沥青铀矿为主。

花岗岩外带型铀矿床以鹿井、香草等为代表。矿床产于岩体外接触带, 受褶皱构造、断裂构造和地层岩性联合控制, 可以赋存在不同时代各种岩性中, 富含炭质、硫化物和低价铁等还原性物质的地层更有利矿体富集。

上覆盆地型铀矿床以暖水塘、黄子洞等为代表。铀矿床产在控盆断裂盆地一侧, 定位于次级断裂带与其它方向的构造复合部位、层间破碎带或地层岩性变化部位, 断裂上盘红层发生褪色蚀变是铀矿床产出的重要标志。该类型铀矿成矿时间较晚, 一般发生在白垩系和古近系。

花岗岩型铀矿床定位主要受构造体系控制。受区域伸展、热点作用、小岩体侵位等多种因素影响(陈跃辉等, 1997; 李子颖, 2006), 沿先存的界面岩体发生热液蚀变, 为成矿热液运移提供了上升通道和赋存空间。沿构造体系上升的含矿流体在有利部位卸载、富集成矿, 由于赋矿部位的差异形成不同类型铀矿床。

3 铀成矿机理

华南热液型铀成矿作用发生在燕山晚期—喜山早期, 铀成矿呈多期、多阶段性, 除下庄矿田云英岩型铀矿化 153 Ma(夏毓亮, 2019)和碳硅泥岩型热液叠加改造铀矿化 30~35 Ma 外(夏毓亮, 2019; 肖为等, 2022b), 其成矿年龄集中于 140 Ma、120 Ma、110 Ma、90 Ma、70 Ma 和 50 Ma 等阶段(刘汉彬等, 2015; 夏毓亮, 2019; 钟福军等, 2019), 铀成矿年龄集中为 50~80 Ma(郭春影等, 2020), 与赋矿围岩的成岩年龄相差较大。胡瑞忠等对幔源基性岩及 A 型花岗岩研究认为: 华南从中生代以来发生 6 次重要的岩石圈伸展事件, 分别为 135~145 Ma、115~125 Ma、100~110 Ma、85~95 Ma、70~75 Ma 和 45~55 Ma(胡瑞忠等, 2007), 岩石圈伸展与铀成矿时间上具有一定的对应性, 一般来说铀成矿发生于同期次的基性岩脉侵位之后, 基性岩脉侵位为幔源成矿流体上升提供了通道, 同时其强还原环境又为铀的富集提供了良好的赋矿环境, 铀矿体可以直接赋存在基性岩脉内, 如下庄、诸广、鹿井都发现赋存在基性岩脉中的铀矿体, 并常形成富矿。华南铀成矿与中生代岩石圈伸展有关, 铀矿床定位与白垩纪断陷盆地、近东西向幔源基性脉岩侵位密切相关(陈跃辉等, 1997; 胡瑞忠等, 2007)。

通过流体包裹体、同位素定年、同位素示踪等

研究认为: 华南不同类型铀矿床成矿作用具有相似性: (1) 铀成矿晚于岩石成岩年龄, 矿岩时差达 20 Ma 以上; (2) 成矿作用以单阶段为主, 但成矿过程具有多阶段性, 铀成矿集中在 100~40 Ma(张万良和邹茂卿, 2013); (3) 成矿流体为中低温、低盐度流体, 成矿温度一般低于 250 °C, 盐度一般低于 10% NaCl, 但成矿期有中高温、高盐度流体参与(欧光习等, 2011), 部分矿床为中高温成矿阶段(杜乐天和王文广, 2009; 何德宝等, 2015); (4) 流体沸腾和不同流体混合是铀成矿的两种主要机制(张国全等, 2007; 杜乐天和王文广, 2009; 欧光习等, 2011; 何德宝等, 2015); (5) 成矿物质铀主要来自富铀基底和花岗岩(张敏等, 2006; 张国全等, 2007; 王正庆等, 2018; 肖为等, 2022a); (6) 成矿流体具有壳源和幔源流体成分(庞雅庆等, 2019), 大气降水是成矿流体主要成分, 矿化剂 CO_2 、F、 H_2 、 CH_4 等来自幔源(刘丛强等, 2001; 邓平等, 2003; 姜耀辉等, 2004; 方适宜等, 2009; 朱捌, 2010; 石少华等, 2011; 何德宝等, 2015; 刘成东等, 2016; 徐浩等, 2018); (7) 铀运移过程中与矿化剂 F、 CO_2 等形成的铀络合物进行运移(张国全等, 2007); (8) 成矿流体运移过程中, 遇到成矿物理化学环境发生剧变(地球化学障、不同流体汇合、压力骤降等), 铀络合物分解, 成矿物质在有利空间沉淀、富集、成矿。

4 铀成矿模式

依据华南花岗岩型铀矿产出区域地质背景、成矿作用特征和成矿机理, 认为花岗岩型铀矿控矿因素为构造控矿、热液蚀变控矿、不同类型界面控矿

等, 其中断裂构造是最关键的控矿因素, 而热液蚀变、不同类型界面是花岗岩型铀矿的空间定位条件。华南地区构造控矿格架主要形成于中生代, 主要表现为 NE 向断裂为主, NW 向断裂为辅, 并伴生 NWW 向张性断裂构造, 如北东向深(大)断裂控制着区内主要铀矿田的产出; 华南地区常见铀矿围岩蚀变种类主要有: 硅化、赤铁矿化、水云母化、绿泥石化、钾长石化、黄铁矿化、碳酸盐化、萤石化等, 其中与富铀矿化关系密切的有硅化、赤铁矿化、黄铁矿化和紫黑色萤石化等; 区内常见成矿结构面主要有: ①岩体与地层接触带界面, 如鹿井、铲子坪矿床等; ②不同期次花岗岩接触界面, 如棉花坑、东坑矿床等; ③次级断裂构造界面, 如棉花坑、新村矿床等; ④构造带夹持区碎裂蚀变岩带和张性裂隙带界面, 如石土岭、澜河矿床等; ⑤与中基性岩脉有关的界面, 如石角围、仙人嶂矿床等; ⑥有利岩性氧化还原界面, 如铲子坪、黄田矿床等。

华南花岗岩型铀矿为深源地幔流体和大气降水共同参与的复成因成矿作用的产物(图 2)。富铀的震旦—寒武系地层部分熔融形成一系列 S 型花岗质岩浆, 形成以印支—燕山早期为主体的富铀花岗岩体, 富铀地层部分熔融和多期次岩浆结晶分异促使铀逐级富集、形成富铀岩体。后经岩体的自变质及热液活动改造, 岩石中部分稳定铀转化为活性铀, 为铀成矿提供了成矿物质来源, 多期次岩浆侵入活动为深部物质向上迁移提供了通道。燕山晚期晚侏罗世—晚白垩世的岩石圈伸展运动为铀成矿作用提供了强大的动力源及热源, 同时形成的深大断裂为幔源矿化剂的快速上升提供了有利条件。随着深部

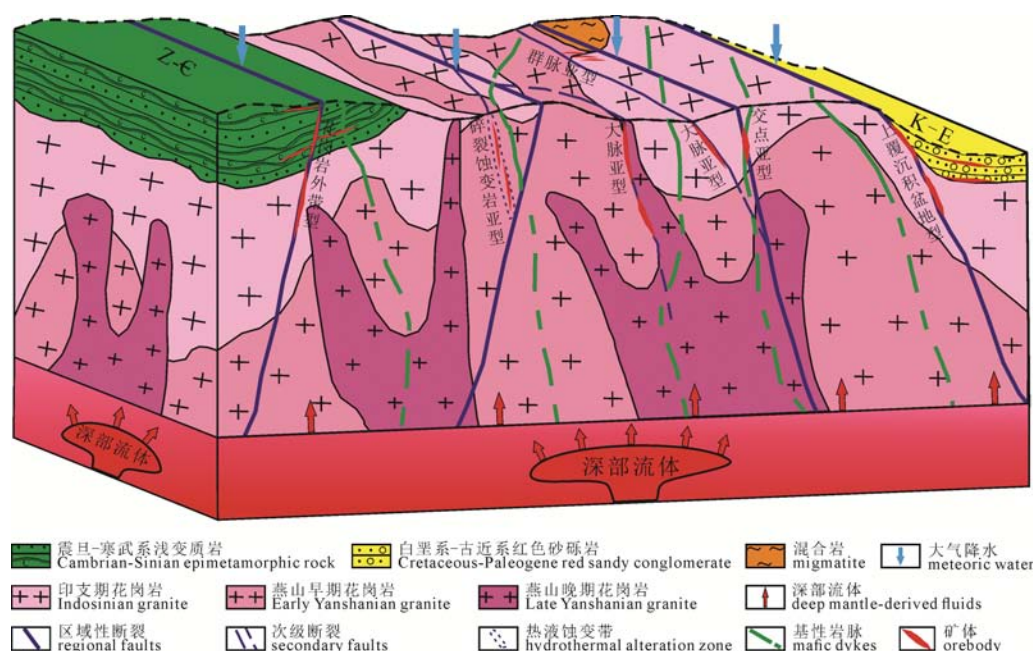


图 2 华南花岗岩型铀矿成矿模式图

Fig. 2 Metallogenic mode of granite-related uranium deposits in South China

岩浆活动逐渐减弱, 部分熔融的深部地幔流体逐步形成、演化, 在上升过程中与富铀地质体逐渐交代, 形成富铀的成矿流体。伴随深大断裂构造活动与深部热动力的驱动, 深部富铀成矿流体向上运移过程中与含铀大气降水不同程度相混合, 形成以 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ 、 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^-$ 等形式迁移的成矿热液, 富铀成矿热液在向上运移过程中, 由于减压、降温、还原作用等物理化学条件的变化在稳定半开放的成矿构造或成矿结构面附近发生沉淀、富集、成矿。

5 铀成矿预测

5.1 预测评价模型

(1) 区域成矿地质环境

产铀花岗岩体: 多期次发育的加里东期—华力西期—印支期—燕山期花岗岩体, 岩性以黑云母花岗岩和二云母花岗岩系列为主, 富 Si、富碱、低 Ca、低 ΣREE 、暗色矿物含量少且铀含量较高, 为典型的 S 型花岗岩, 如诸广山、贵东、苗儿山、桃山等岩体。

富铀地层: 晚震旦世—二叠纪富铀地层, 富含生物碎屑、碳泥质和黄铁矿等, 并且铀含量明显较高, 如晚震旦世—二叠纪含铀海相碳硅泥岩建造、寒武系富铀地层等。

控矿构造: 以 NE 向区域性深(大)断裂为主, NW 向次级断裂为辅, 并伴生 NWW 向张性断裂构造。

断陷红盆: 白垩纪、古近纪断陷红盆, 岩性为红色陆相碎屑岩, 如南雄、丰州盆地等。

(2) 区域成矿特征

成矿地质体: 产铀花岗岩体或富铀地层, 如印支—燕山早期富铀花岗岩、晚震旦世—二叠纪富铀地层, 且晚期中酸性、中基性脉岩发育。

成矿构造: 北东向深(大)断裂及其次级断裂发育, 多组控矿、成矿构造的交汇区, 成矿构造带规模较大且密集分布。如东坑式硅化带大脉型铀矿含矿构造为烟筒岭区域性断裂; 棉花坑式硅化带大脉型铀矿含矿构造为次级近南北向硅化带; 澜河式硅化带群脉型铀矿含矿构造为次级断裂控制的密集裂隙带; 鹿井式花岗岩外带型铀矿含矿构造为北东东—北北东向次级断裂; 石角围式交点型铀矿含矿构造为 NNE-NE 向硅化断裂带。

成矿结构面: 不同类型的成矿结构面发育, 如岩体与地层接触带界面等, 特别是不同类型的成矿结构面在空间上复合存在时对成矿作用最为有利。

热液蚀变: 硅化、赤铁矿化、水云母化、绿泥石化、钾长石化、黄铁矿化、碳酸盐化、萤石化等, 其中与富铀矿化关系密切的有硅化、赤铁矿化、黄铁

矿化和紫黑色萤石化等。

铀矿化类型及信息: 以硅化带型、碎裂蚀变岩型和交点型花岗岩内带型和花岗岩外带型富大铀矿为主要铀矿化类型; 铀异常点(带)集中分布的地区, 深部或外围钻探工程未完全控制。

(3) 物化遥综合信息特征

放射性特征: 航空放射性铀、钾高场区; 地面伽玛中高场区; 分量化探、能谱、土壤热释光、 ^{210}Po 异常区。

水系沉积物特征: 水系沉积物 U、W、Sn、Bi、Mo、Cu、Pb、Zn 等元素异常。

水文地质特征: 水中铀、氡异常区。

遥感特征: 解译推断的线性、环形构造, 且与成矿构造吻合。

5.2 重点地区区域铀成矿预测

目前我国铀矿勘查的总体规划是以探查大规模、经济可采铀矿资源为主, 根据华南地区富大铀矿类型和特征, 结合华南地区区域成矿地质环境、区域成矿特征和物化遥综合信息特征, 预测了重点地区富大铀矿成矿远景区 4 片, 分别为沙子江—向阳坪北部远景区、长江地区深部及外围远景区、上小地—胡家田远景区、希望—竹山下远景区。

沙子江—向阳坪北部远景区位于雪峰山—摩天岭铀成矿带苗儿山中部沙子江—向阳坪北部地区, 为 I 级远景区, 找矿类型为花岗岩内带碎裂蚀变岩型大型铀矿, 找矿目标为印支期豆乍山、香草坪岩体; 长江地区深部及外围远景区位于桃山—诸广铀成矿带诸广南部长江地区, 为 I 级远景区, 找矿类型为花岗岩内带硅化带型大型铀矿, 找矿目标为印支期油洞岩体、燕山期长江岩体; 小地—胡家田远景区位于雪峰山—摩天岭铀成矿带苗儿山东南部上小地—胡家田地区, 为 II 级远景区, 找矿类型为花岗岩内带硅化带型大型铀矿, 找矿目标为加里东期胡家田、上小地岩体; 希望—竹山下远景区位于桃山—诸广铀成矿带贵东下庄地区东北部希望—竹山下地区, 为 II 级远景区, 找矿类型为花岗岩内带硅化带型、交点型富大铀矿, 找矿目标为燕山期花岗岩体、基性脉岩。

近年来核工业 290 研究所已在长江地区深部及外围远景区和希望—竹山下远景区揭露到较好的富大铀矿体, 核工业 230 研究所也在沙子江—向阳坪北部远景区和小地—胡家田远景区揭露到较好富铀矿体。如沙子江—向阳坪北部 I 级远景区, 该远景区位于沙子江、向阳坪矿床北部, 处于香草坪岩体和豆乍山岩体接触带附近, 构造密集发育, 构造规模、延伸稳定, 其区域成矿地质环境和区域成矿特征与临近的沙子江、向阳坪矿床高度相似, 发育同一套构

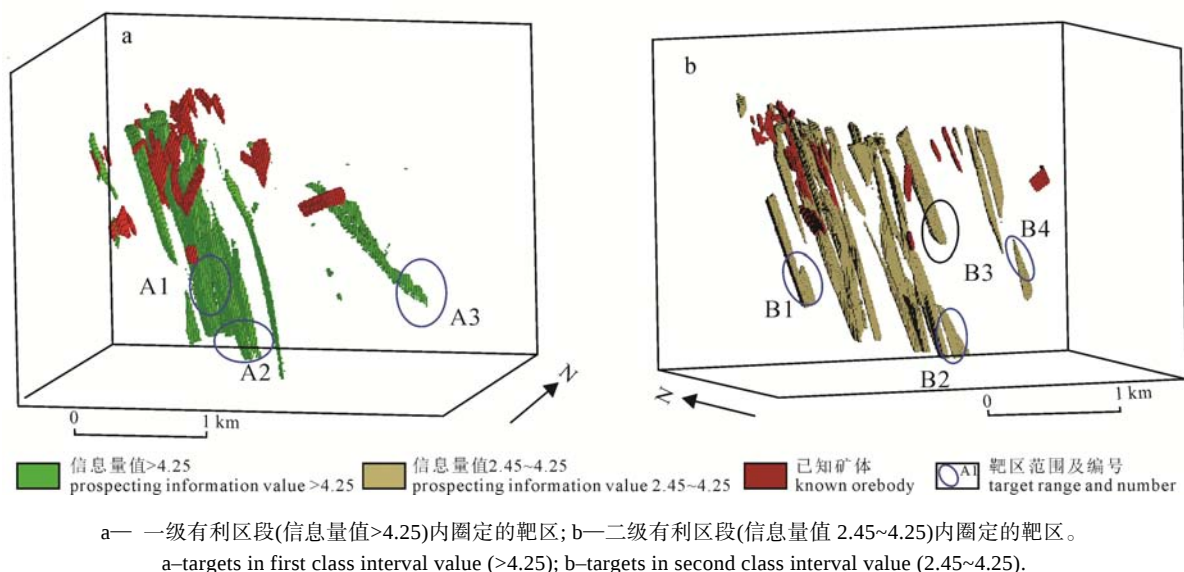


图 3 沙子江矿床深部找矿靶区分布图
Fig. 3 Distribution of deep prospective targets of Shazijiang deposit

造控含矿体系。该远景区内石屋水地段成矿地质体为印支期豆乍山和香草坪产铀花岗岩体,成矿构造为向阳坪和沙子江矿床的主要含矿构造 F_7 、 F_{805} 和 F_{800} 构造带北延地段,成矿结构面为 F_{805} 往北与 F_{800} 断裂带组形成的聚敛夹持区、 F_{805} 往东与 NEE 向大树坪断裂以及 NE 向 F_7 号带形成交汇聚敛部位,硅化、赤铁矿化和黄铁矿化等与铀矿化密切相关的热液蚀变程度强,地表存在铀异常点(带),伽玛异常值高达 200×10^{-6} ,铀矿化类型为碎裂蚀变岩型,分量化探、 ^{210}Po 异常晕圈与含矿构造套合明显,近几年核工业 230 研究所在该地段 D64—D108 线施工的多个钻孔均揭露到富、大矿体,找矿前景较大。

5.3 典型矿床深部铀成矿预测

华南地区典型矿床深部找矿潜力巨大,据最新的勘查成果表明,棉花坑铀矿床的勘查深度已经超过 1 100 m,在垂深 800~1 000 m 处发现了富-特富铀矿体,且铀矿体向深部有变大、变富的趋势。选取了书楼丘硅化带型、沙子江碎裂蚀变岩型和鹿井花岗岩外带型矿床开展了深部铀成矿预测,基于 GOCAD 软件建立了典型矿床三维地质数据库,构建了书楼丘、沙子江、鹿井矿床三维地质模型。基于三维证据权和信息量法,进一步结合研究区地质背景、成矿规律和三维预测评价模型,在书楼丘矿床深部圈定了 3 片找矿靶区(俞嘉嘉等, 2021),在鹿井矿床深部圈定了 3 片找矿靶区(耿瑞瑞等, 2021),在沙子江矿床深部圈定了 7 片找矿靶区(图 3)(耿瑞瑞等, 2020),实现了“定型、定位、定深、定量”预测,圈定的找矿靶区,经钻探查证,均取得了铀矿找矿新突破,为下一步花岗岩型铀矿深部找矿提供了科学依据。

6 结论

(1)华南花岗岩型铀矿床类型分为 3 大类 4 个亚类,不同类型花岗岩型铀矿成矿作用具有相似性,成矿物质铀主要来自富铀基底和花岗岩,成矿流体具有壳源和幔源流体混合特征。

(2)华南热液型铀成矿具有多期、多阶段性,与中生代岩石圈伸展作用有关。花岗岩型铀矿为深源地幔流体和大气降水共同参与的复成因成矿作用的产物,断裂构造是最关键的控矿因素。

(3)建立了华南地区区域铀成矿模式和预测评价模型,预测了 4 片富大铀矿成矿远景区,圈定了 13 片典型矿床深部找矿靶区,实现了“定型、定位、定深、定量”预测,为华南地区下一步铀矿找矿工作部署提供了科学依据。

Acknowledgements:

This study was supported by China National Nuclear Corporation (No. LTD1602), and China Nuclear Geology (Nos. 202138-10 and 202238-10).

参考文献:

- 陈琪, 谭双, 万建军, 高翔, 吴昆明. 2021. 苗儿山中段向阳坪铀矿床沥青铀矿 U-Th-Pb 化学定年及其地质意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 44(6): 519-526.
- 陈佑伟, 胡瑞忠, 骆金诚, 董少花. 2019. 桂北沙子江铀矿床沥青铀矿原位微区年代学和元素分析: 对铀成矿作用的启示[J]. 岩石学报, 35(9): 2679-2694.
- 陈跃辉, 陈祖伊, 蔡煜琦, 施祖海, 封全宏, 付锦. 1997. 华东南中生代伸展构造时空演化与铀矿化时空分布[J]. 铀矿地质, 13(3): 129-138, 146.
- 邓平, 沈渭洲, 凌洪飞, 叶海敏, 王学成, 濮巍, 谭正中. 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, 32(6): 520-528.
- 杜乐天, 王文广. 2009. 华南花岗岩型铀矿找矿新目标——绢英岩化铀矿类型[J]. 铀矿地质, 25(2): 85-90.
- 杜乐天. 2011. 中国热液铀矿成矿理论体系[J]. 铀矿地质, 27(2): 65-68, 80.
- 傅丽雯, 孙立强, 凌洪飞, 沈渭洲, 李坤, 冯尚杰. 2016. 粤北 302 铀矿床成矿流体与成矿物质来源研究: H、O、Sr、Nd 同位素证据[J]. 高校地质学报, 22(1): 43-52.
- 范洪海, 何德宝, 徐浩, 李建红, 孙远强, 夏宗强, 王凤岗, 谷雨, 李田港, 冯明月, 师玉涛. 2012. 全国花岗岩型铀矿资源潜力评价[J]. 铀矿地质, 28(6): 335-341.
- 方适宜, 陈卫峰, 梁永东, 陶志军. 2009. 双滑江铀矿床低温热液铀酰矿物富集成矿作用[J]. 铀矿地质, 25(5): 270-276, 311.
- 耿瑞瑞, 范洪海, 孙远强, 夏宗强, 孙雨鑫, 俞嘉嘉, 陈东欢. 2020. 基于 GOCAD 软件的沙子江铀矿床三维定量预测[J]. 矿床地质, 39(6): 1078-1090.
- 耿瑞瑞, 范洪海, 孙远强, 何德宝, 俞嘉嘉. 2021. 湘赣边界鹿井铀矿床三维定量预测研究[J]. 地质论评, 67(2): 399-410.
- 郭春影, 秦明宽, 徐浩, 任忠宝, 邹明亮, 白云, 赵宇霆. 2020. 广西苗儿山铀矿田张家铀矿床成矿时代: 沥青铀矿微区原位测定[J]. 地球科学, 45(1): 72-89.
- 何德宝, 范洪海, 孟艳宁, 孙远强. 2015. 粤北下庄铀矿田不同类型矿床成矿流体对比研究[J]. 地质与勘探, 51(2): 303-311.
- 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.
- 胡瑞忠. 1994. 花岗岩型铀矿床成因讨论——以华南为例[J]. 地球科学进展, 9(2): 41-46.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 刘燊, 钟宏, 赵军红, 蒋国豪. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. 矿床地质, 26(2): 139-152.
- 胡瑞忠, 骆金诚, 陈佑纬, 潘力川. 2019. 华南铀矿床研究若干进展[J]. 岩石学报, 35(9): 2625-2636.
- 金景福, 胡瑞忠. 1987. 302 矿床成矿热液中铀的迁移和沉淀[J]. 地球化学, (4): 320-329.
- 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): 491-499.
- 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, 34.
- 李子颖. 2006. 华南热点铀成矿作用[J]. 铀矿地质, 22(2): 65-69, 82.
- 刘丛强, 黄智龙, 李和平, 苏根利. 2001. 地幔流体及其成矿作用[J]. 地学前缘, 8(4): 231-243.
- 刘成东, 李志文, 刘江浩, 梁良. 2016. 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, 32(4): 193-199.
- 刘汉彬, 金贵善, 韩娟, 李军杰, 张佳, 张建锋. 2015. 华东南地区热液型铀矿成矿年代[J]. 地质学报, 89(S1): 157-159.
- 刘正义, 刘红旭. 2009. 花岗岩铀成矿作用的模拟实验[J]. 地学前缘, 16(1): 99-113.
- 赖静, 祁家明, 陈军军, 李钟枢, 曹豪杰. 2020. 粤北青嶂山岩体江头矿区铀矿微区矿物学、年代学特征及其成矿动力背景制约[J]. 地质学报, 94(4): 1128-1142.
- 欧光习, 张敏, 邱林飞, 张建锋. 2011. 华南热液型铀矿成矿温度与成矿流体研究现状及进展[C]//矿物岩石地球化学通报, 30(S1): 160-161.
- 庞雅庆, 范洪海, 高飞, 吴建勇, 谢小占. 2019. 粤北诸广南部铀矿田流体包裹体的氢氦同位素组成及成矿流体来源示踪[J]. 岩石学报, 35(9): 2765-2773.
- 祁家明, 刘斌, 刘文泉, 叶永钦, 徐争启. 2022. 粤北花岗岩型铀矿盆地耦合成矿过程与成矿动力探讨[J]. 地质论评, 68(2): 571-585.
- 石少华, 胡瑞忠, 温汉捷, 孙如良, 王加昇, 陈恒. 2011. 桂北沙子江花岗岩型铀矿床碳、氧、硫同位素特征及其成因意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30(1): 88-96.
- 邵飞, 许健俊, 毛玉峰, 何晓梅, 高梦奇. 2013. 华南铀成矿省花岗岩型铀矿矿质卸载机制研究[J]. 铀矿地质, 29(3): 146-151, 171.
- 邵飞, 许健俊, 邵上, 姚鹏飞, 刘琨, 吴闻涛, 张莹. 2014. 华南花岗岩型铀矿地质特征及成矿作用[J]. 资源调查与环境, 35(3): 211-217.
- 夏毓亮. 2019. 中国铀成矿地质年代学[M]. 北京: 中国原子能出版社.
- 肖为, 范洪海, 庞雅庆, 陈东欢, 赖中信. 2022a. 粤北湖子对山铀矿床年代学与矿物化学研究及其对铀成矿的启示[J]. 矿床地质, 41(2): 383-402.
- 肖为, 范洪海, 陈东欢, 庞雅庆, 郑可志, 罗桥花. 2022b. 桂北广子田铀钨矿床成因——沥青铀矿原位 U-Pb 定年、矿物地球化学证据[J]. 地质论评, 68(3): 831-844.
- 肖为, 范洪海, 庞雅庆, 陈东欢. 2022c. 粤北东坑铀矿床黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素特征及其意义[J]. 铀矿地质, 38(3): 475-486.
- 徐浩, 张闯, 庞雅庆, 曹豪杰, 刘佳林, 刘文泉. 2018. 广东长排铀矿床成矿流体特征[J]. 现代地质, 32(5): 902-912.
- 王正庆, 范洪海, 陈东欢, 郑可志, 罗桥花, 刘军港, 王凤岗, 王勇剑. 2018. 沙子江铀矿外围地化特征、元素迁移及铀成矿机理[J]. 高校地质学报, 24(2): 185-199.
- 俞嘉嘉, 孙远强, 周万蓬, 范洪海, 耿瑞瑞, 孙雨鑫, 李铭鲲. 2021. 广东省仁化县书楼丘铀矿床三维地质建模及成矿预测[J]. 地质与勘探, 57(2): 305-314.
- 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: 1-114.
- 钟福军, 严杰, 夏菲, 潘家永, 刘文泉, 赖静, 赵奇峰. 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): 2727-2744.
- 张国全, 胡瑞忠, 商朋强, 刘雷, 杜社锋. 2007. 华南花岗岩型铀矿床成矿机理研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 26(4): 399-404.
- 张敏, 陈培荣, 陈卫锋. 2006. 粤北地区产铀岩体的铀矿化特征

及其成矿机制探讨[J]. 化工矿产地质, 28(1): 9-14, 26.

张万良, 邹茂卿. 2013. 华南铀矿成矿年龄统计分析[J]. 矿产与地质, 27(4): 270-275, 323.

赵葵东, 蒋少涌. 2015. 华南产铀花岗岩的成因机制[J]. 矿物学报, 35(S1): 102.

赵凤民, 沈才卿. 1986. 黄铁矿与沥青铀矿的共生条件及在沥青铀矿形成过程中所起作用的实验研究[J]. 铀矿地质, 2(4): 193-199.

赵凤民. 2017. 重新认识还原作用在铀成矿中的贡献[J]. 铀矿地质, 33(4): 193-198, 214.

周维勋. 1996. 华南大陆构造与铀矿省[J]. 铀矿地质, 12(1): 1-10.

References:

BONNETTI C, LIU Xiao-dong, MERCADIER J, CUNEY M, DELOULE E, VILLENEUVE J, LIU Wen-quan. 2018. The genesis of granite-related hydrothermal uranium deposits in the Xiazhuang and Zhuguang ore fields, North Guangdong Province, SE China: Insights from mineralogical, trace elements and U-Pb isotopes signatures of the U mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 92: 588-612.

CHEN Qi, TAN Shuang, WAN Jian-jun, GAO Xiang, WU Kun-ming. 2021. Chemical U-Th-Pb dating of pitchblende in Xiangyangping uranium deposit, middle segment of Miaoershan and its geological significance[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 44(6): 519-526(in Chinese with English abstract).

CHEN You-wei, HU Rui-zhong, LUO Jin-cheng, DONG Shao-hua. 2019. In-situ mineral chemistry and chronology analyses of the pitchblende in the Shazijiang uranium deposit and their implications for mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(9): 2679-2694(in Chinese with English abstract).

CHEN Yue-hui, CHEN Zu-yi, CAI Yu-qi, SHI Zu-hai, FENG Quan-hong, FU Jin. 1997. Space-time evolution of Mesozoic extensional tectonics and distributions of uranium mineralizations in southeastern China[J]. Uranium Geology, 13(3): 129-138, 146(in Chinese with English abstract).

DENG Ping, SHEN Wei-zhou, LING Hong-fei, YE Hai-min, WANG Xue-cheng, PU Wei, TAN Zheng-zhong. 2003. Uranium mineralization related to mantle fluid: A case study of the Xianshi deposit in the Xiazhuang uranium orefield[J]. Geochimica, 32(6): 520-528(in Chinese with English abstract).

DU Le-tian, WANG Wen-guang. 2009. New exploration target for granite-type uranium deposits in South China—A case study on uranium mineralization of sericitic alteration[J]. Uranium Geology, 25(2): 85-90(in Chinese with English abstract).

DU Le-tian. 2011. On the theory system of hydrothermal uranium metalization in China[J]. Uranium Geology, 27(2): 65-68,

80(in Chinese with English abstract).

FU Li-wen, SUN Li-qiang, LING Hong-fei, SHEN Wei-zhou, LI Kun, FENG Shang-jie. 2016. Study on the source of ore-forming fluid and ore-forming material of the 302 uranium deposit in northern Guangdong Province: Evidence from H-O-Sr-Nd isotope geochemistry[J]. Geological Journal of China Universities, 22(1): 43-52(in Chinese with English abstract).

FAN Hong-hai, HE De-bao, XU Hao, LI Jian-hong, SUN Yuan-qiang, XIA Zong-qiang, WANG Feng-gang, GU Yu, LI Tian-gang, FENG Ming-yue, SHI Yu-tao. 2012. The potential evaluation of granite type uranium resources in China[J]. Uranium Geology, 28(6): 335-341(in Chinese with English abstract).

FANG Shi-yi, CHEN Wei-feng, LIANG Yong-dong, TAO Zhi-jun. 2009. Mineralization enrichment of uranyl mineral in mid-low temperature hydrothermal of Shuanghuajiang uranium deposit[J]. Uranium Geology, 25(5): 270-276, 311(in Chinese with English abstract).

GENG Rui-rui, FAN Hong-hai, SUN Yuan-qiang, XIA Zong-qiang, SUN Yu-xin, YU Jia-jia, CHEN Dong-huan. 2020. 3D quantitative prediction of Shazijiang uranium deposit based on GOCAD software[J]. Mineral Deposits, 39(6): 1078-1090(in Chinese with English abstract).

GENG Rui-rui, FAN Hong-hai, SUN Yuan-qiang, HE De-bao, YU Jia-jia. 2021. Study on the three-dimensional quantitative prediction of Lujing uranium deposit in Hunan-Jiangxi border[J]. Geological Review, 67(2): 399-410(in Chinese with English abstract).

GUO Chun-ying, QIN Ming-kuan, XU Hao, REN Zhong-bao, ZOU Ming-liang, BAI Yun, ZHAO Yu-ting. 2020. Age of Zhangjia uranium deposit in the Miaoershan ore field, Guangxi autonomous region, China: In situ micro-determination on pitchblende[J]. Earth Science, 45(1): 72-89(in Chinese with English abstract).

HE De-bao, FAN Hong-hai, MENG Yan-ning, SUN Yuan-qiang. 2015. Comparison of ore-forming fluids in the deposits of different types of the Xiazhuang uranium ore field in northern Guangdong Province[J]. Geology and Exploration, 51(2): 303-311(in Chinese with English abstract).

HU Rui-zhong, JIN Jing-fu. 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).

HU Rui-zhong. 1994. A commentary on genesis on granite-type uranium deposits: As exemplified by South China[J]. Advance in Earth Sciences, 9(2): 41-46(in Chinese with English abstract).

HU Rui-zhong, BI Xian-wu, PENG Jian-tang, LIU Shen, ZHONG Hong, ZHAO Jun-hong, JIANG Guo-hao. 2007. Some prob-

- lems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China[J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 139-152(in Chinese with English abstract).
- HU Rui-zhong, BI Xian-wu, ZHOU Mei-fu, PENG Jian-tang, SU Wen-chao, LIU Shen, QI Hua-wen. 2008. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary[J]. *Economic Geology*, 103(3): 583-598.
- HU Rui-zhong, LUO Jin-cheng, CHEN You-wei, PAN Li-chuan. 2019. Several progresses in the study of uranium deposits in South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2625-2636(in Chinese with English abstract).
- JIN Jing-fu, HU Rui-zhong. 1987. Transportation and deposition of uranium in hydrothermal ore-forming fluids as exemplified by uranium deposit No. 302[J]. *Geochimica*, (4): 320-329(in Chinese with English abstract).
- JIANG Yao-hui, JIANG Shao-yong, LING Hong-fei. 2004. Mantle-derived fluids and uranium mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 491-499(in Chinese with English abstract).
- LI Zi-ying, LI Xiu-zhen, LIN Jin-rong. 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, 34(in Chinese with English abstract).
- LI Zi-ying. 2006. Hostspot uranium metallogenesis in South China[J]. *Uranium Geology*, 22(2): 65-69, 82(in Chinese with English abstract).
- LI Zi-ying, HUANG Zhi-zhang, LI Xiu-zhen, GUO Jian, FAN Chou. 2015. The discovery of natural native uranium and its significance[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(5): 1561-1567.
- LIU Cong-qiang, HUANG Zhi-long, LI He-ping, SU Gen-li. 2001. The geofluid in the mantle and its role in ore-forming processes[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(4): 231-243(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-dong, LI Zhi-wen, LIU Jiang-hao, LIANG Liang. 2016. Research progress in mantle fluids involved uranium metallization——A case study of granite type uranium deposit cluster area, northern Guangdong[J]. *Uranium Geology*, 32(4): 193-199(in Chinese with English abstract).
- LIU Han-bin, JIN Gui-shan, HAN Juan, LI Jun-jie, ZHANG Jia, ZHANG Jian-feng. 2015. Age of hydrothermal uranium deposits in southeast China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(S1): 157-159(in Chinese).
- LIU Zheng-yi, LIU Hong-xu. 2009. The simulation test of granite uranium mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 99-113(in Chinese with English abstract).
- LAI Jing, QI Jia-ming, CHEN Jun-jun, LI Zhong-shu, CAO Hao-jie. 2020. Uranium micromeralogy and geochronology of the Jiangtou uranium ore field in the Qingzhangshan granite pluton, north Guangdong: constraints on the genetic relationship with metallogenic dynamic background[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(4): 1128-1142(in Chinese with English abstract).
- LUO Jin-cheng, HU Rui-zhong, MOSTAFA F, LI Chu-si, BI Xian-wu, YASSIR A, CHEN You-wei. 2015a. In-situ SIMS uraninite U-Pb dating and genesis of the Xianshi granite-hosted uranium deposit, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 968-978.
- LUO Jin-cheng, HU Rui-zhong, SHI Shao-hua. 2015b. Timing of uranium mineralization and geological implications of Shazijiang Granite-Hosted uranium deposit in Guangxi, South China: New constraint from chemical U-Pb age[J]. *Journal of Earth Science*, 26(6): 911-919.
- LUO Jin-cheng, HU Rui-zhong, MOSTAFA F, BI Xian-wu, SHI Shao-hua, CHEN You-wei. 2017. Newly discovered uranium mineralization at ~2.0 Ma in the Menggongjie granite-hosted uranium deposit, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 241-249.
- OU Guang-xi, ZHANG Min, QIU Lin-fei, ZHANG Jian-feng. 2011. Research status and progress of ore-forming temperature and fluid on hydrothermal uranium deposits in South China[C]//*Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 30(S1): 160-161(in Chinese).
- PANG Ya-qing, FAN Hong-hai, GAO Fei, WU Jian-yong, XIE Xiao-zhan. 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).
- QI Jia-ming, LIU Bin, LIU Wen-quan, YE Yong-qin, XU Zheng-qi. 2022. Discussion on the basin—granites coupling metallogenic process and dynamics of the granite-related uranium deposits in northern Guangdong[J]. *Geological Review*, 68(2): 571-585(in Chinese with English abstract).
- RICHARD A, ROZSYPAL C, MERCADIER J, BANKS D A, CUNEY M, BOIRON M, CATHELIN M. 2012. Giant uranium deposits formed from exceptionally uranium-rich acidic brines[J]. *Nature Geoscience*, 5(2): 142-146.
- SHI Shao-hua, HU Rui-zhong, WEN Han-jie, SUN Ru-liang, WANG Jia-sheng, CHEN Heng. 2011. Isotope compositions of carbon, oxygen and sulfur in the Shazijiang granite-hosted uranium ore deposit, northern Guangxi, China and their genetic significance[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 30(1): 88-96(in Chinese with English abstract).
- SHAO Fei, XU Jian-jun, MAO Yu-feng, HE Xiao-mei, GAO Meng-qi. 2013. Study on mineral discharge mechanism of

- granite type uranium deposits in south China uranium metallogenic province[J]. *Uranium Geology*, 29(3): 146-151, 171(in Chinese with English abstract).
- SHAO Fei, XU Jian-jun, SHAO Shang, YAO Peng-fei, LIU Kun, WU Wen-tao, ZHANG Ying. 2014. Geological characteristics and mineralization of the granite-type uranium deposits in south China[J]. *Resources Survey and Environment*, 35(3): 211-217(in Chinese with English abstract).
- XIA Yu-liang. 2019. *Geochronology of uranium mineralization in China*[M]. Beijing: China Atomic Energy Press(in Chinese).
- XIAO Wei, FAN Hong-hai, PANG Ya-qing, CHEN Dong-huan, LAI Zhong-xin. 2022a. Geochronology and mineral chemistry study on Huziduishan uranium deposit in northern Guangdong Province and its implications for uranium mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 41(2): 383-402(in Chinese with English abstract).
- XIAO Wei, FAN Hong-hai, CHEN Dong-huan, PANG Ya-qing, ZHENG Ke-zhi, LUO Qiao-hua. 2022b. Genesis of the Guangzitian uranium—tungsten deposit in northern Guangxi—Geochemical evidences from in-situ U-Pb dating of pitchblende and mineral geochemistry[J]. *Geological Review*, 68(3): 831-844(in Chinese with English abstract).
- XIAO Wei, FAN Hong-hai, PANG Ya-qing, CHEN Dong-huan. 2022c. Characteristics and significance of LA-ICP-MS trace elements in pyrite from Dongkeng uranium deposit, northern Guangdong[J]. *Uranium Geology*, 38(3): 475-486(in Chinese with English abstract).
- XU Hao, ZHANG Chuang, PANG Ya-qing, CAO Hao-jie, LIU Jia-lin, LIU Wen-quan. 2018. Characteristics of ore-forming fluids of the Changpai uranium deposit in Guangdong Province[J]. *Geoscience*, 32(5): 902-912(in Chinese with English abstract).
- WANG Zheng-qing, FAN Hong-hai, CHEN Dong-huan, ZHENG Ke-zhi, LUO Qiao-hua, LIU Jun-gang, WANG Feng-gang, WANG Yong-jian. 2018. Geochemistry, element migration and mechanism of uranium mineralization in the periphery of the Shazijiang uranium ore deposit[J]. *Geological Journal of China Universities*, 24(2): 185-199(in Chinese with English abstract).
- YU Jia-jia, SUN Yuan-qiang, ZHOU Wan-peng, FAN Hong-hai, GENG Rui-rui, SUN Yu-xin, LI Ming-kun. 2021. 3D geological modeling and metallogenic prediction of the Shulou-qiu uranium deposit in Renhua County, Guangdong Province[J]. *Geology and Exploration*, 57(2): 305-314(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: 1-114(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Fu-jun, YAN Jie, XIA Fei, PAN Jia-yong, LIU Wen-quan, LAI Jing, ZHAO Qi-feng. 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): 2727-2744(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guo-quan, HU Rui-zhong, SHANG Peng-qiang, LIU Lei, DU She-feng. 2007. An overview on the ore-forming mechanism of the granite-type uranium deposit in South China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and geochemistry*, 26(4): 399-404(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Min, CHEN Pei-rong, CHEN Wei-feng. 2006. Uranium metallogenic characteristics and discussion on metallogenic setting of uranium plutons in northern Guangdong Province[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 28(1): 9-14, 26(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wan-liang, ZOU Mao-qing. 2013. Statistical analysis of the uranium metallogenic ages in South China[J]. *Mineral Resources and Geology*, 27(4): 270-275, 323(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Kui-dong, JIANG Shao-yong. 2015. The Genetic Mechanism of Uranium-producing Granites in South China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 102(in Chinese).
- ZHAO Feng-min, SHEN Cai-qing. 1986. Experimental researches on paragenetic condition for pyrite and pitchblende and its role in pitchblende formation process[J]. *Uranium Geology*, 2(4): 193-199(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Feng-min. 2017. Recognition on the role of reducing action in uranium metallization[J]. *Uranium Geology*, 33(4): 193-198, 214(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Wei-xun. 1996. Continental tectonics and uranium province of South China[J]. *Uranium Geology*, 12(1): 1-10(in Chinese with English abstract).