

赣南上窖铀矿床微量元素地球化学特征与成矿模型

吴德海¹, 潘家永¹, 夏菲¹, 钟福军¹, 黄广文^{2,3}, 祁家明⁴, 洪斌跃¹

(1. 东华理工大学 省部共建核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012; 3. 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810000; 4. 核工业 290 研究所, 广东 韶关 512026)

摘要: 通过对比研究赣南上窖铀矿床各类岩(矿)石的微量元素、稀土元素地球化学特征, 讨论了上窖铀矿床的成矿物质来源与成矿模型。地质、元素地球化学资料表明: ① 印支早期花岗岩与燕山早期花岗岩较高的 U 含量和较低的 Th/U 值, 反映了两类均具备为区内铀成矿提供充足铀源的能力, 并且燕山早期花岗岩提供铀源的潜力更大。② 水云母化蚀变基本不改变原岩微量元素、稀土元素的含量和配分特征, 但叠加赤铁矿化时则伴随 U 的富集甚至矿化, 出现稀土元素的活化转移, 说明赤铁矿化与铀矿化关系更为密切。③ 辉绿岩的微量元素配分曲线具有幔源特征, 明显区别于花岗岩和铀矿石, 且蚀变辉绿岩的 U 含量和 U/Th 值明显较新鲜辉绿岩高, 说明上窖铀矿床的成矿物质非源于辉绿岩; 矿床大面积的赤铁矿化暗示辉绿岩为铀成矿作用提供了发生氧化还原反应的挥发分和矿化剂(CH_4 、 CO 、 CO_2 、 H_2S 、 Fe^{2+}), 从而使迁移态的 U^{6+} 还原成 U^{4+} 并沉淀成矿。④ 铀矿石与花岗岩的微量元素配分曲线相似程度高, 且为递变关系, 说明上窖铀矿床的成矿物质来源于花岗岩; 铀矿石的稀土元素总量明显低于花岗岩和辉绿岩, 表明成矿流体具贫稀土元素的性质。根据上窖铀矿床的成矿地质背景、岩体-构造-蚀变“三位一体”控矿要素以及微量元素地球化学特征, 进一步补充和完善了该矿床的成矿模型。

关键词: 微量元素; 成矿物质来源; 流体性质; 成矿模型; 上窖铀矿床

中图分类号: P595; 619.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)04-0590-15

Trace elements geochemical characteristics and metallogenic model of the Shangjiao uranium deposit in southern Jiangxi

WU De-hai¹, PAN Jia-yong¹, XIA Fei¹, ZHONG Fu-jun¹, HUANG Guang-wen^{2,3}, QI Jia-ming⁴ and HONG Bin-yue¹

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resource and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, China; 3. Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources in Northern Tibetan Plateau, Xining 810000, China; 4. No. 290 Research Institute, CNNC, Shaoguan 512026, China)

Abstract: In this paper, the authors made a comparative study of the geochemical characteristics of trace elements and REE for various rocks such as granites and dolerites as well as uranium ores from the Shangjiao uranium deposit of southern Jiangxi. The ore-forming material source and metallogenic model of the Shangjiao uranium deposit were discussed. Based as geological and elemental geochemical data, the authors have reached some conclusions: ① The high U content and low Th/U values of early Indosinian granites and early Yanshanian granites suggest that both granites had the capability of providing adequate sources of uranium for uranium mineralization in the study area, and the potential of early Yanshanian granites for providing the sources of uranium was even greater; ② There

收稿日期: 2017-10-19; 接受日期: 2018-02-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0602604); 国家自然科学基金项目(41772066, U1403292); 中国地质调查局地质调查项目(12120115035601)

作者简介: 吴德海(1989-), 男, 汉族, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业, 研究方向: 矿床地球化学、铀矿地质, E-mail: dehaiwu@163.com; 通讯作者: 潘家永(1967-), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床地球化学研究, E-mail: jypan@ecit.cn。

was almost no change in the content of trace elements and REE and distribution patterns during hydromicazation of granites, but there occurred uranium enrichment and mineralization and REE remobilization during the superposition of hematitization. These phenomena imply that hematitization was more closely related to uranium mineralization in the study area; ③ The trace elements distribution patterns of dolerites show mantle characteristics, significantly different from features of granites and uranium ores, and the U content and U/Th ratios of altered dolerites are obviously higher than those of fresh dolerites, which suggests that the ore-forming material of the Shangjiao uranium deposit was not derived from dolerites. Large areas of hematitization imply that dolerites provided ore-forming components and volatiles(CH_4 , CO , CO_2 , H_2S and Fe^{2+}) for oxidation-reduction reaction of uranium mineralization, so that the migration of U^{6+} experienced deoxidation to form U^{4+} and precipitated mineralization material; ④ The trace elements distribution patterns of uranium ores and granites show high similarity and gradual relationship, indicating that ore-forming material was derived from granites. The total REE content of uranium ores is obviously lower than that of granites and dolerites, indicating that the ore-forming fluids were characterized by a lack of REE. In combination with the geological background of mineralization, the characteristics of magmatic-structure-alteration and geochemical characteristics of trace elements, the authors have improved the metallogenic model of the deposit.

Key words: trace elements; ore-forming materials; fluid property; metallogenic model; Shangjiao uranium deposit

Fund support: National Key Research and Development Project (2017YFC0602604); National Natural Science Foundation of China (41772066, U1403292); Geological Survey Project of China Geological Survey(12120115035601)

粤北-赣南青嶂山岩体位于华夏古陆块的西南缘,处于闽-赣后加里东隆起,毗邻湘、桂、粤北海西-印支拗陷带(张敏等,2006),是南岭产铀花岗岩带的重要组成部分。上窰铀矿床处于该产铀复式花岗岩体的中南部。前人对青嶂山岩体的年代学特征、物源特征、成因机制、演化规律及构造背景等进行了较为系统的研究,已取得许多重要成果(张敏等,2006;孙立强等,2010,2011;陶继华等,2013a,2013b,2015),但对位于该岩体中南部的上窰铀矿床的研究还比较薄弱,虽已在矿床地质特征、成矿条件、成矿预测等方面开展了相关研究工作(中国核工业地质局《华南铀矿地质志》编写组,2005^①;吴德海,2017),但在成矿阶段、关键控矿因素、成矿机理以及矿床成因等方面还有待进一步深化。

岩石和矿物中的微量元素含量在地质作用过程中可发生明显变化,因而可作为地质过程的示踪剂(赵振华,1992,1997;祁家明等,2013)。20世纪60年代以来,随着对上窰地区勘查工作的逐步展开,该区的基础地质和矿床地质等特征研究逐步深入(中国核工业地质局《华南铀矿地质志》编写组,2005)^①。笔者于2015年以来,对该地区的铀矿床进行了研究,在详细的野外调研工作基础上,从微量元素地球

化学入手,对该矿床围岩(花岗岩)、辉绿岩以及铀矿石进行了系统的采样及测试分析工作,对比研究矿床各类岩石的微量元素变化特征,探讨了微量元素与铀成矿作用的关系,并在归纳分析上窰铀矿床的成矿地质背景、岩体-构造-蚀变“三位一体”控矿要素以及微量元素地球化学特征的基础上,完善了该矿床的成矿模型。

1 区域地质背景

上窰铀矿床位于青嶂山岩体的中南部,该岩体是华南地区印支-燕山期产铀复式花岗岩体之一,具有较大的铀成矿潜力(图1)。青嶂山岩体为一复式花岗岩体,其主体岩性为中粗粒斑状黑云母花岗岩,呈岩基状产出,面积约500 km²(张敏等,2006)。岩体与周围的地层呈侵入接触关系。地层由老至新依次为:东部的震旦纪地层,属砂泥质岩石;西侧的寒武-志留纪地层,属砂泥质岩石;南西侧和南侧的泥盆-石炭纪地层,为碎屑岩类及碳酸盐岩类岩石;北部被白垩系-第四系覆盖(张敏等,2006)。岩体内断裂构造发育,主要由一组走向NE的大断裂及众多走向NE和近EW的次级断裂构成。NE向大断裂可

① 中国核工业地质局《华南铀矿地质志》编写组. 2005. 华南铀矿地质志. 中国核工业地质局内部资料.

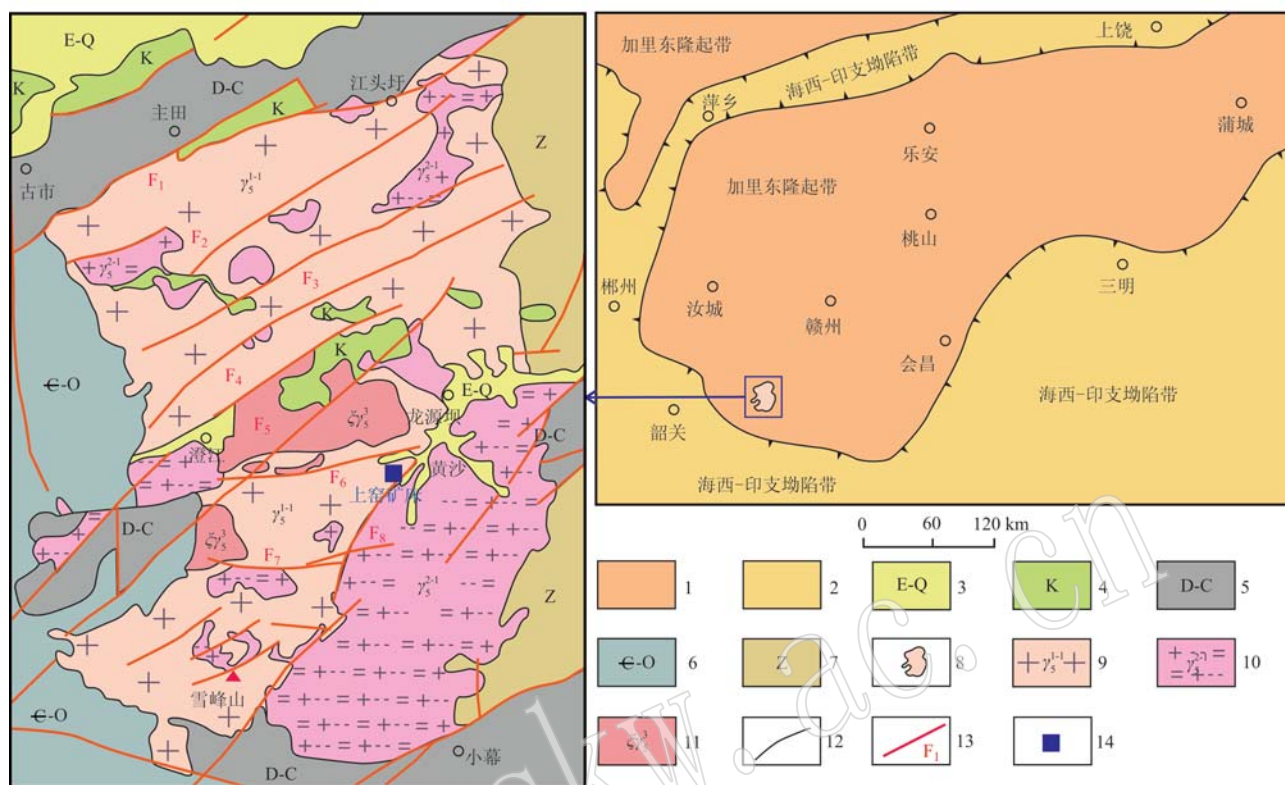


图1 青嶂山复式岩体地质简图[据张敏等(2006)略改]

Fig. 1 Sketch geological map of Qingzhangshan composite pluton (modified after Zhang Min *et al.*, 2006)

1—加里东隆起带; 2—海西-印支拗陷带; 3—古近-第四系; 4—白垩系; 5—泥盆-石炭系; 6—寒武-奥陶系; 7—震旦系; 8—青嶂山复式岩体; 9—印支早期花岗岩; 10—燕山早期花岗岩; 11—燕山期石英正长岩; 12—岩性界线; 13—断裂带; 14—上窖铀矿床; F_1 —南雄断裂;

F_2 —棉土窝断裂; F_3 —源头断裂; F_4 —西洞断裂; F_5 —寨南浦断裂; F_6 —黄沙断裂; F_7 —上竹坑断裂; F_8 —良伞寨断裂

1—Caledonian uplift zone; 2—Hercynian-Indosinian depression zone; 3—Paleogene-Quaternary; 4—Cretaceous; 5—Devonian-Carboniferous; 6—Cambrian-Ordovician; 7—Sinian; 8—Qingzhangshan granite complex; 9—Early Indosinian granite; 10—Early Yanshanian granite; 11—Yanshanian quartz-syenite; 12—lithologic boundary; 13—fault zone; 14—Shangjiao uranium deposit; F_1 —Nanxiong fault; F_2 —Miantuwo fault; F_3 —Yuantou fault; F_4 —Xidong fault; F_5 —Zhainanpu fault; F_6 —Huangsha fault; F_7 —Shangzhukeng fault; F_8 —Liangsanzhai fault

能形成于加里东早期,而后长期处于断续活动状态,中、新生代断裂活动更为频繁而强烈,控制着区内铀、钨、铅锌矿等矿产的产出。NE 向大断裂切穿了岩体的北部,由北向南依次为南雄断裂(F_1)、棉土窝断裂(F_2)、源头断裂(F_3)、西洞断裂(F_4)和寨南浦断裂(F_5);NE 和近 EW 向的小断裂则主要发育在岩体的中南部,由北向南依次为黄沙断裂(F_6)、上竹坑断裂(F_7)和良伞寨断裂(F_8),各断裂带都发育硅化蚀变带(张敏等, 2006; 祁家明等, 2013)。青嶂山岩体的主体岩性,即中粗粒斑状黑云母花岗岩的形成年龄约为 241.0 Ma (张敏等, 2006); 补体岩性中细粒二云母花岗岩的形成年龄约为 156 Ma (陶继华等, 2013b),中粒石英正长岩的形成年龄约为 149.4 Ma (张敏等, 2006)。

2 矿床地质特征

2.1 岩浆岩

上窖铀矿床位于青嶂山岩体中南部的黄沙矿区(图2),矿区出露的主要岩性从早到晚依次为印支早期的中粗粒斑状黑云母花岗岩,呈大面积出露,为矿区的主要岩性,形成年龄约为 241.0 Ma (张敏等, 2006);燕山早期中细粒二云母花岗岩呈岩株状产出,呈“工”字形,形成年龄约为 156 Ma (陶继华等, 2013b);燕山晚期花岗斑岩、正长岩呈小岩体零星分布于整个矿区;燕山晚期的基性脉岩呈 NW 向以脉状产出,岩性为辉绿岩和煌斑岩,推测其形成于 110 ~ 103 Ma 和 93 ~ 88 Ma 两个阶段(李献华等, 1997;

曹豪杰等, 2013; 夏菲等, 2017)。上窖铀矿床位于印支早期中粗粒斑状黑云母花岗岩和燕山早期中细

粒二云母花岗岩的接触带附近(图2)(中国核工业地质局《华南铀矿地质志》编写组, 2005)^①。

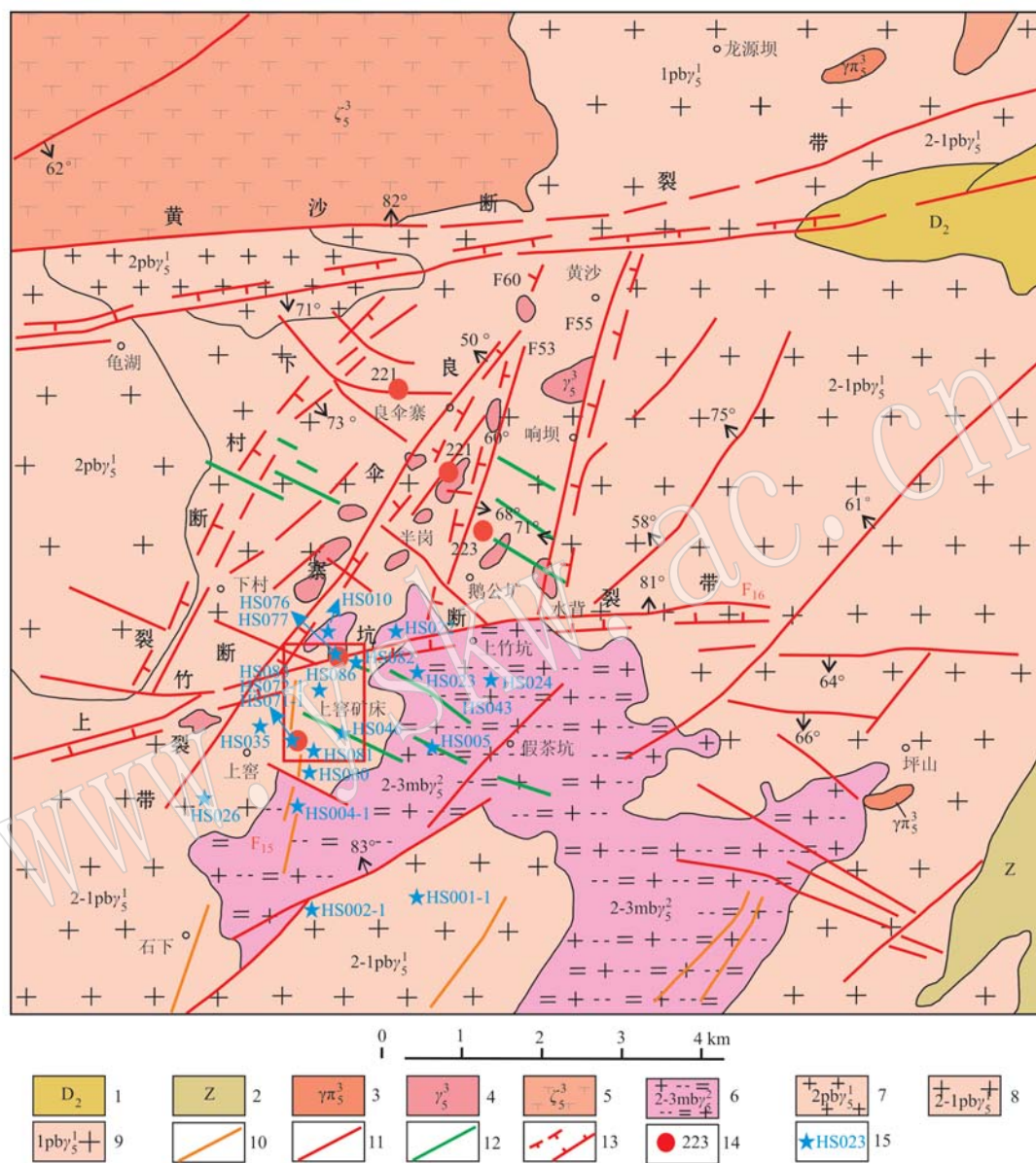


图2 黄沙矿区地质图及采样位置图

Fig. 2 Geological and sampling position map of Huangsha area

1—中泥盆统; 2—震旦系; 3—花岗斑岩; 4—燕山晚期细粒花岗岩; 5—正长岩、石英正长岩; 6—燕山早期中细粒二云母花岗岩; 7—印支早期中粗粒斑状黑云母花岗岩; 8—印支早期中粗粒斑状黑云母花岗岩; 9—印支早期粗粒斑状黑云母花岗岩; 10—硅化破碎带; 11—断裂蚀变带; 12—中基性脉岩; 13—断陷带范围; 14—矿床及编号; 15—取样位置及编号

1—Middle Devonian; 2—Sinian; 3—granite-porphry; 4—Late Yanshanian fine-grained granite; 5—syenite and quartz-syenite; 6—Early Yanshanian medium-fine grained two-mica granite; 7—Early Indosinian midgrain porphyritic biotite granite; 8—Early Indosinian middle-coarse grained porphyritic biotite granite; 9—Early Indosinian coarse grained porphyritic biotite granite; 10—silicified shatter zone; 11—fault alteration zone; 12—intermediate-basic dike; 13—fault zone; 14—deposit and its serial number; 15—sampling location and its serial number

① 中国核工业地质局《华南铀矿地质志》编写组, 2005. 华南铀矿地质志. 中国核工业地质局内部资料.

2.2 构造

区内断裂构造发育,NE向良伞寨断裂控制了区内铀矿床的分布,其中NNE向F₁₅号硅化破碎带和近EW向F₁₆号断裂蚀变带为上窖铀矿床成矿构造(中国核工业地质局《华南铀矿地质志》编写组,2005)^①。在构造的拐弯、膨胀变异地段,硅质等充填于其中,与NW向中基性岩脉的交汇部位往往有较好的铀矿化显示,形成硅质脉型铀矿床和“交点型”铀矿床(图2)。

2.3 矿化与蚀变

铀矿化类型主要有沥青铀矿-赤铁矿-玉髓(微晶石英)型和沥青铀矿-紫黑色萤石型。矿石结构构造简单,主要有胶状、脉状、网脉状、浸染状和角砾状等。矿石矿物以沥青铀矿为主,其次为硅钙铀矿和铜铀云母等次生铀矿物;脉石矿物主要为灰白-褐红色微晶石英和紫黑色、浅绿色萤石。矿床围岩蚀变在远、近矿带具明显差异,近矿蚀变主要有赤铁矿化、硅化和萤石化等,远矿蚀变表现较弱,主要为水云母化、绿泥石化和赤铁矿化等(中国核工业地质局

《华南铀矿地质志》编写组,2005)^①。

3 样品的采集与测试

样品主要取自上窖铀矿床和矿床外围,有3种类型:新鲜花岗岩和蚀变花岗岩、新鲜辉绿岩和蚀变辉绿岩以及铀矿石(图3)。新鲜花岗岩分为印支早期中粗粒斑状黑云母花岗岩和燕山早期中细粒二云母花岗岩,蚀变花岗岩分为发育赤铁矿化和水云母化的印支早期中粗粒斑状黑云母花岗岩以及燕山早期中细粒二云母花岗岩;新鲜辉绿岩取自矿床外围,蚀变辉绿岩发育赤铁矿化和碳酸盐化,取自矿床附近;铀矿石则取自上窖铀矿床,为铀-微晶石英型。

样品的测试工作由广州澳实矿物实验测试中心承担完成,利用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)对全岩样品进行微量元素、稀土元素测定。电感耦合等离子质谱仪由美国生产,型号为Agilent 7700x,精密密度控制相对偏差(RD)% < 10%,准确度控制相对误差(RE)% < 10%,各元素的检测限见表1。

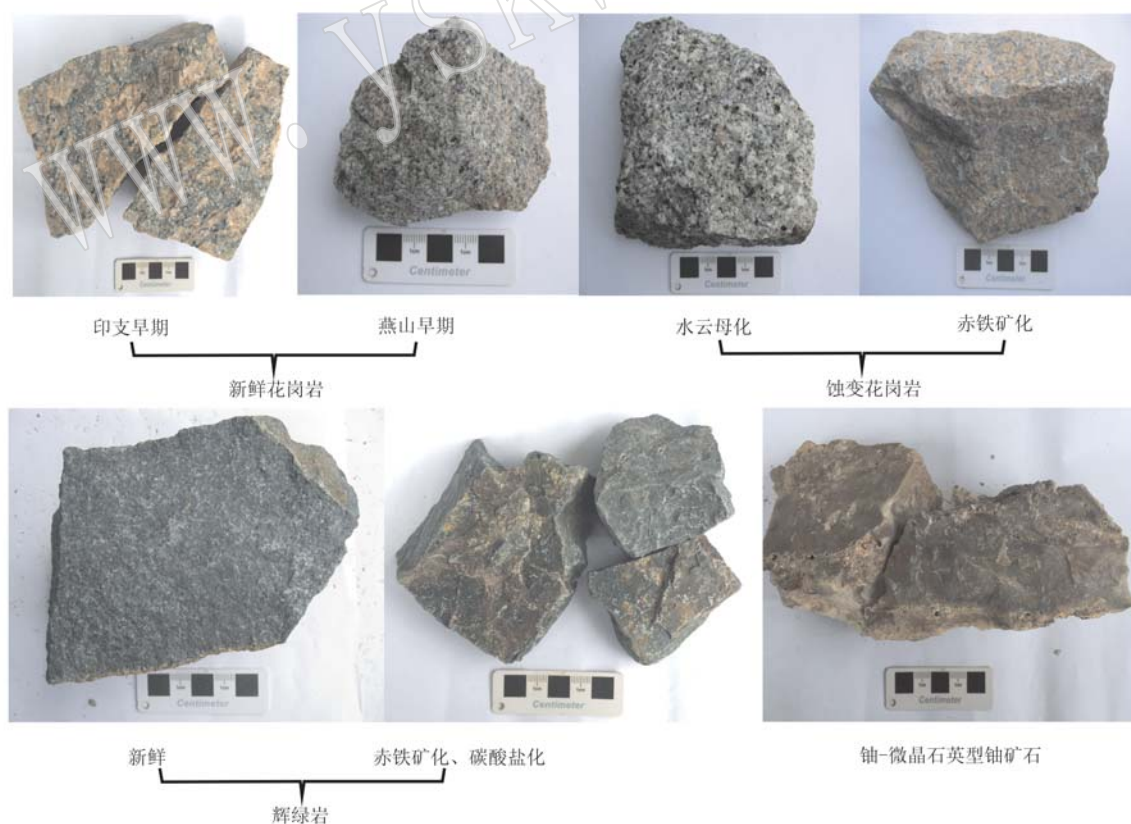


图3 上窖铀矿床围岩及矿石样品

Fig. 3 The wall rock and ore samples of the Shangjiao uranium deposit

① 中国核工业地质局《华南铀矿地质志》编写组, 2005. 华南铀矿地质志. 中国核工业地质局内部资料.

表 1 各元素的检测限
Table 1 Detection limit of each element

检测项目	K	Ti	Rb	Ba	Th	U	Ta	Nb	Sr	Nd	P	Zr	Hf	Sm
检出限	0.01	0.005	0.2	0.5	0.05	0.05	0.1	0.2	0.1	0.1	10	2	0.2	0.03
检测项目	La	Ce	Pr	Eu	Ga	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	
检出限	0.5	0.5	0.03	0.03	0.01	0.01	0.05	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.5	

除 K 和 Ti 的单位为 $w_B/\%$ 外,其他元素均为 $w_B/10^{-6}$ 。

4 结果与讨论

4.1 微量元素地球化学特征

微量元素分析结果(表 2)显示,印支早期与燕山早期的新鲜花岗岩均富集大离子亲石元素和高场强元素 Rb、Th、U、K、Ta, 亏损 Ba、Sr、P、Ti 等元素,而蚀变花岗岩除个别元素外,基本保持与各自原岩相类似的特征;新鲜辉绿岩和蚀变辉绿岩均富集大离子亲石元素和高场强元素 Rb、Th、U、Ta 等,亏损 Ba、K、Sr、P、Ti 等元素,且蚀变辉绿岩各元素的富集系数比新鲜辉绿岩的更大;铀矿石相对富集 Rb、Th、U、K、Ta、Nb 等元素,贫 Ba、Ti、P 等元素,个别样品亏损 K 元素。

印支早期花岗岩与燕山早期花岗岩的 U 含量平均值(分别为 10.77×10^{-6} 和 14.90×10^{-6})均高于中国东部地壳的平均值(1.55×10^{-6})(高山等, 1999),且后者 U 含量更高;两者的 Th/U 平均值(分别为 4.38 和 2.68)远低于中国东部地壳平均值(5.77)(高山等, 1999),且后者更低。岩体较高的 U 含量和较低的 Th/U 值,反映了印支早期与燕山早期两期岩体均具备为区内铀矿化提供充足铀源的能力,且燕山早期花岗岩提供铀源的潜力更大(高山等, 1999)。燕山早期花岗岩 Rb/Sr 值比印支早期花岗岩更高(分别为 4.85 和 3.16),远大于中国东部地壳的平均值(0.31)(高山等, 1999),表明燕山早期花岗岩经历了更为彻底的岩浆演化过程(Boyn-ton, 1984; 高山等, 1999; 陈琪等, 2013)。

印支早期与燕山早期新鲜花岗岩原始地幔标准化蛛网图(图 4a)显示两者具有极其类似的微量元素配分模式,基本平行甚至重合,均富集 Rb、Th、U、K、Ta 等元素,亏损 Ba、Sr、P、Ti 等元素,属低 Ba、Sr 花岗岩,与典型的南岭东段花岗岩(陈琪等, 2013)特征一致。

蚀变花岗岩原始地幔标准化蛛网图(图 4b),显

示其微量元素配分模式与原岩类似,水云母化基本不改变原岩微量元素的含量和配分特征,但叠加赤铁矿化时则伴随着 U 的富集甚至矿化,说明赤铁矿化与铀矿化关系更为密切。

新鲜辉绿岩与蚀变辉绿岩原始地幔标准化蛛网图(图 4c)显示其微量元素配分模式与花岗岩的明显不同,曲线形态呈现左侧“隆起”,高场强元素普遍高于原始地幔值并随不相容性增强而富集程度增加,类似于原始地幔。新鲜辉绿岩的配分曲线基本一致,与蚀变辉绿岩明显不同,蚀变辉绿岩明显富集 U 元素,亏损 Sr 元素。Sr 异常往往与成矿期方解石的分离结晶有关,因为 Sr 与 Ca 离子半径相近,与方解石中的 Ca 易发生类质同像,而蚀变辉绿岩样品主要发育赤铁矿化和方解石化,这就很好地解释了 Sr 元素的亏损原因,同时 U 元素的富集也进一步证明了赤铁矿化与铀矿化关系密切。

铀矿石微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4d)显示其相对富集 Rb、Th、U、K、Ta、Nb, 贫 Ba、Ti、P 等微量元素配分特征,个别样品出现 K 亏损。K、Na 是活泼元素,它们的亏损标志着矿床流体活动比较强烈。总体说来,铀矿石与新鲜花岗岩和蚀变花岗岩的配分模式十分类似,同时新鲜花岗岩、蚀变花岗岩和铀矿石,三者的微量元素配分曲线存在递变关系,与辉绿岩的配分特征具明显的差别,且蚀变辉绿岩较未蚀变辉绿岩 U 含量明显增加, Th/U 值明显降低,指示上窖铀矿床的成矿物质来源于花岗岩而非辉绿岩,与李延河等(2016)对粤北下庄铀矿田中的花岗岩和中基性岩脉的研究结果一致。

4.2 稀土元素地球化学特征

稀土元素分析结果(表 3)表明,新鲜花岗岩与蚀变花岗岩都属于稀土元素总量高(新鲜花岗岩 ΣREE 为 $193.50 \times 10^{-6} \sim 344.49 \times 10^{-6}$, 平均值 262.76×10^{-6} ; 蚀变花岗岩 ΣREE 为 $68.66 \times 10^{-6} \sim 300.23 \times 10^{-6}$, 平均值 180.27×10^{-6})的轻稀土元素

表 2 上窑铀矿床各类样品微量元素分析结果
Table 2 Analytical results of trace elements of different kinds of samples from the Shangjiao uranium deposit

$w_B/10^{-6}$

样品名	样品号	Rb	Ba	Th	U	K	Ta	Nb	Sr	Nd	P	Zr	Hf	Sm	Ti	Th/U	Rb/Sr
新鲜花 岗岩	HS001-1	398.0	393.0	47.30	10.15	40 200	3.7	20.3	101.0	29.8	310	153	5.0	5.72	1 470	4.66	3.94
	HS026	391.0	382.0	46.80	8.47	44 100	1.7	14.2	105.5	44.3	820	165	4.5	8.21	1 610	5.53	3.71
	HS035	401.0	428.0	45.40	11.10	45 900	2.1	13.7	125.5	44.8	840	154	4.3	8.18	1 410	4.09	3.20
	HS086	339.0	756.0	49.00	13.35	42 900	2.2	17.6	190.5	59.5	950	204	6.1	10.40	2 050	3.67	1.78
燕山期	HS024	383.0	345.0	40.00	14.90	42 500	3.2	19.2	78.9	36.5	760	153	4.5	6.83	1 370	2.68	4.85
	HS002-1	382.0	545.0	69.70	11.40	43 400	3.5	24.1	125.5	45.9	460	174	5.3	7.87	1 680	6.11	3.04
	HS080	421.0	140.0	15.00	321.00	27 700	2.7	13.6	68.5	11.3	530	57	2.0	2.86	610	0.05	6.15
	HS081	570.0	173.0	22.90	30.20	43 100	4.6	18.5	27.8	22.0	700	85	3.0	4.65	790	0.76	20.50
蚀变花 岗岩	HS004-1	381.0	337.0	32.00	8.01	40 400	2.7	17.6	90.3	27.4	670	122	3.6	5.31	1 140	4.00	4.22
	HS010	400.0	282.0	25.60	5.24	35 400	1.8	11.3	31.7	30.2	160	101	2.9	5.38	880	4.89	12.62
	HS022	409.0	383.0	39.60	17.85	45 600	2.8	18.6	84.7	32.9	870	156	4.6	6.16	1 470	2.22	4.83
	HS023	383.0	372.0	41.40	16.05	43 400	3.2	18.9	81.0	36.0	810	157	4.6	6.72	1 410	2.58	4.73
辉绿岩	HS005	30.4	60.4	2.11	0.55	2 300	0.8	10.1	2.1	18.3	880	147	3.7	5.05	14 100	3.84	14.48
	HS043	43.1	91.1	2.53	0.68	3 800	0.9	12.3	3.0	21.2	1 060	182	4.6	5.69	15 100	3.72	14.37
	HS046	273.0	253.0	2.99	0.86	13 500	2.0	27.6	7.7	30.0	2 220	237	5.6	6.94	15 300	3.48	35.45
	HS082	372.0	118.0	13.25	5.82	23 700	2.3	32.6	15.3	48.4	2 970	382	9.9	10.25	7 180	2.28	24.31
铀矿石	HS071-1	91.4	70.5	3.06	394.00	4 500	0.8	3.9	68.5	8.4	140	14	0.5	2.14	250	0.01	1.33
	HS072-1	6.4	60.1	0.69	5 930.00	400	0.3	2.0	47.8	6.5	260	4	0.2	2.08	100	0.00	0.13
	HS076	123.0	30.6	7.32	54.60	6 200	2.0	9.3	19.4	5.9	40	27	1.6	1.75	120	0.13	6.34
	HS077	148.0	69.8	6.83	72.80	7 200	2.1	10.1	56.4	13.3	170	29	1.1	4.52	390	0.09	2.62
	HS083	47.1	38.9	2.10	89.60	2 500	0.4	2.3	27.6	3.0	80	11	0.4	0.93	170	0.02	1.71

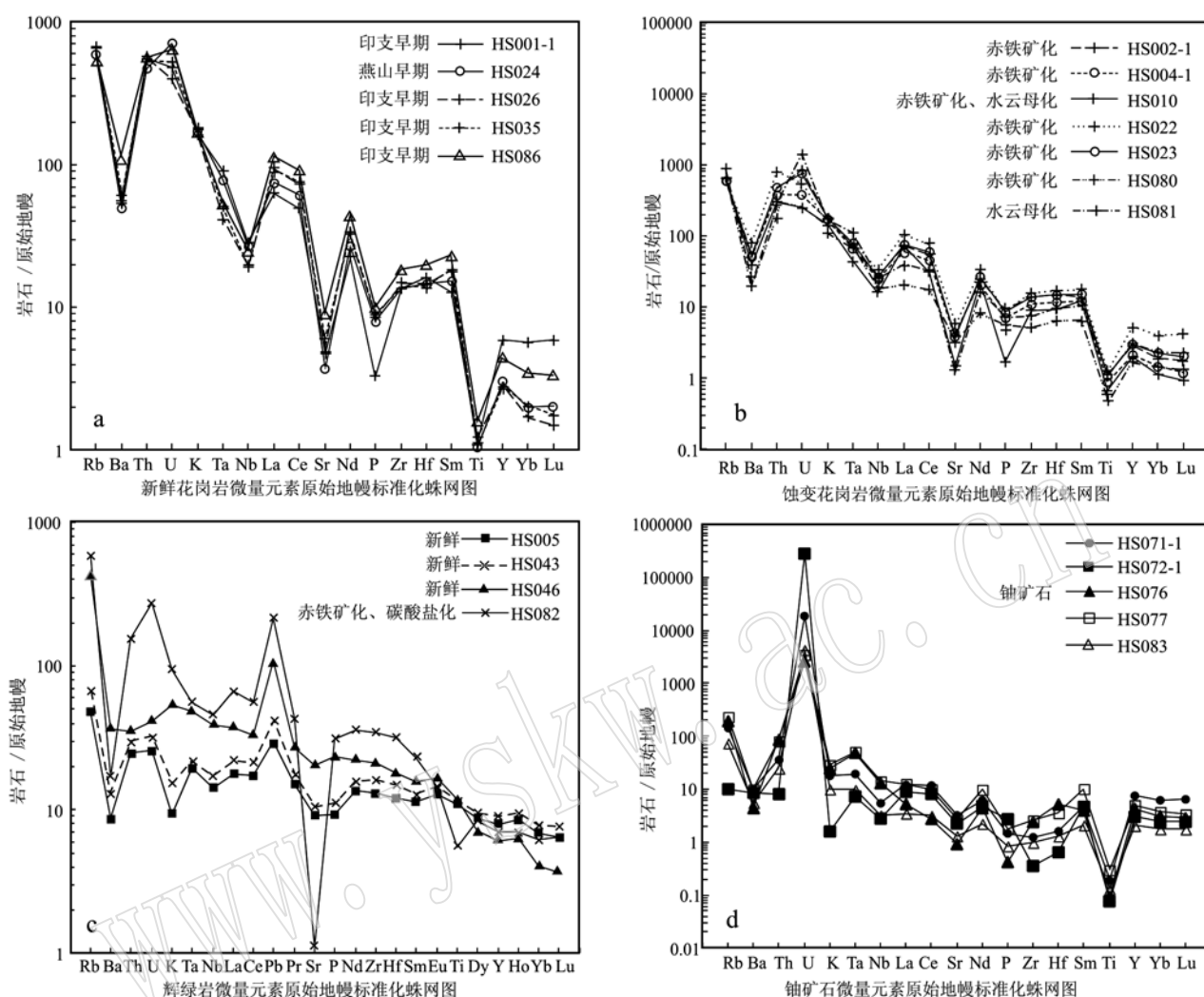


图4 上窖铀矿床微量元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔数据源于 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Spider diagram of primitive mantle-normalized trace elements of Shangjiao uranium deposit

富集型, 且具有明显的负 Eu 异常(新鲜花岗岩 δEu 为 0.37 ~ 0.51, 平均 0.42; 蚀变花岗岩 δEu 为 0.38 ~ 0.48, 平均 0.43); 辉绿岩的稀土元素总量 (ΣREE 为 96.06×10^{-6} ~ 242.73×10^{-6} , 平均值 150.88×10^{-6}) 介于花岗岩和铀矿石之间, 基本无 Eu 异常 (δEu 平均值为 1.06); 铀矿石的稀土元素总量最低 (ΣREE 为 17.90×10^{-6} ~ 61.99×10^{-6} , 平均值 41.07×10^{-6}), 轻稀土元素明显较围岩少, 具有明显的负 Eu 异常 (δEu 为 0.32 ~ 0.60, 平均值为 0.47)。

新鲜花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分型式图(图 5a)显示, 印支早期与燕山早期新鲜花岗岩具有相类似的配分模式, 为轻稀土元素富集右倾型, 反映了轻重稀土元素分馏很明显; 均出现明显的负 Eu 异常, 反映了在岩浆演化过程中, 花岗质熔体存在斜

长石的结晶分异; 重稀土元素配分曲线较为平缓, 说明重稀土元素之间基本不存在分馏。印支早期与燕山早期新鲜花岗岩具有相类似的配分模式, 也反映了两者的源区(Visona and Lombardo, 2002; 陈琪等, 2013)。

蚀变花岗岩球粒陨石标准化配分型式图(图 5b)显示, 印支早期与燕山早期蚀变花岗岩稀土元素配分型式与原岩类似, 都具有轻稀土元素富集右倾型、明显的负 Eu 异常以及重稀土元素配分曲线较为平缓的特征。值得指出的是水云母化基本不改变原岩稀土元素的含量和配分特征, 但叠加赤铁矿化时, 则伴随着稀土元素的活化转移, ΣREE 有降低的趋势。

辉绿岩球粒陨石标准化配分型式图(图 5c)显示

表3 上窑铀矿床各类样品稀土元素分析结果

 $w_B/10^{-6}$

Table 3 Analytical results of rare earth elements in different kinds of samples from the Shangjiao uranium deposit

样品名	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	
新鲜花岗岩	印支期	HS001-1	43.2	87.9	9.51	29.8	5.72	0.88	4.53	0.68	4.08	0.89	2.65	0.44
		HS026	61.0	130.0	13.85	44.3	8.21	0.88	5.24	0.58	2.64	0.44	1.11	0.15
		HS035	64.6	135.5	14.20	44.8	8.18	0.86	5.45	0.57	2.55	0.43	1.13	0.15
		HS086	78.2	161.0	17.50	59.5	10.40	1.27	6.64	0.80	4.32	0.73	1.91	0.27
	燕山期	HS024	51.4	109.0	11.20	36.5	6.83	0.75	4.91	0.58	2.72	0.50	1.23	0.17
蚀变花岗岩	印支期	HS002-1	71.3	143.0	15.05	45.9	7.87	1.08	5.94	0.74	3.92	0.78	2.07	0.31
		HS080	14.2	31.1	3.02	11.3	2.86	0.38	2.20	0.29	1.46	0.24	0.71	0.11
		HS081	28.3	59.4	6.21	22.0	4.65	0.53	3.64	0.49	2.70	0.46	1.30	0.20
	燕山期	HS004-1	40.5	81.0	8.68	27.4	5.31	0.71	3.44	0.39	1.89	0.32	0.88	0.12
		HS010	49.5	54.3	9.99	30.2	5.38	0.62	3.41	0.41	1.84	0.31	0.74	0.10
		HS022	49.3	97.9	10.55	32.9	6.16	0.71	4.41	0.54	2.35	0.42	1.19	0.15
		HS023	52.3	107.0	11.35	36.0	6.72	0.79	4.81	0.56	2.58	0.48	1.23	0.18
	辉绿岩	新鲜	HS005	12.1	30.6	4.12	18.3	5.05	2.16	6.34	1.00	6.45	1.40	4.11
HS043			15.2	37.3	4.89	21.2	5.69	2.37	7.31	1.11	7.11	1.58	4.47	0.66
HS046			25.4	59.2	7.51	30.0	6.94	2.77	7.12	0.95	5.22	1.03	2.65	0.35
蚀变		HS082	46.0	99.8	11.75	48.4	10.25	2.43	8.55	1.06	6.19	1.14	3.19	0.45
铀矿石	HS071-1	8.3	21.0	2.43	8.4	2.14	0.43	2.65	0.59	4.62	0.96	3.09	0.45	
	HS072-1	6.2	14.5	1.81	6.5	2.08	0.39	2.10	0.36	2.48	0.45	1.27	0.17	
	HS076	3.6	4.9	1.38	5.9	1.75	0.19	2.34	0.38	2.60	0.52	1.62	0.24	
	HS077	8.7	17.8	3.32	13.3	4.52	0.47	4.20	0.67	3.91	0.73	1.99	0.28	
	HS083	2.4	5.6	0.71	3.0	0.93	0.19	1.01	0.20	1.46	0.29	0.94	0.14	

续表3

Continued Table 3

样品名	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δEu	δCe	
新鲜花岗岩	印支期	2.78	0.44	26.9	193.50	177.01	16.49	10.73	10.50	0.51	0.98
		0.85	0.11	12.7	269.36	258.24	11.12	23.22	48.49	0.38	1.02
		1.00	0.13	12.6	279.55	268.14	11.41	23.50	43.65	0.37	1.01
		1.70	0.25	20.4	344.49	327.87	16.62	19.73	31.08	0.44	0.99
	燕山期	0.98	0.15	13.7	226.92	215.68	11.24	19.19	35.44	0.38	1.03
蚀变花岗岩	印支期	1.96	0.31	23.6	300.23	284.20	16.03	17.73	24.58	0.46	0.98
		0.69	0.10	7.6	68.66	62.86	5.80	10.84	13.91	0.45	1.07
		1.17	0.17	14.2	131.22	121.09	10.13	11.95	16.35	0.38	1.01
	燕山期	0.72	0.09	9.6	171.45	163.60	7.85	20.84	38.01	0.48	0.97
		0.56	0.07	9.1	157.43	149.99	7.44	20.16	59.73	0.41	0.55
		0.93	0.13	13.0	207.64	197.52	10.12	19.52	35.82	0.40	0.97
		1.10	0.15	13.7	225.25	214.16	11.09	19.31	32.13	0.41	0.99
		辉绿岩	新鲜	3.38	0.48	35.9	96.06	72.33	23.73	3.05	2.42
3.86	0.56			41.2	113.31	86.65	26.66	3.25	2.66	1.12	1.01
2.00	0.27			27.8	151.41	131.82	19.59	6.73	8.58	1.19	1.00
蚀变	3.04		0.48	31.6	242.73	218.63	24.10	9.07	10.23	0.77	0.99
铀矿石	3.07		0.48	34.4	58.61	42.70	15.91	2.68	1.83	0.55	1.09
	1.19	0.18	13.8	39.68	31.48	8.20	3.84	3.52	0.57	1.01	
	1.54	0.21	19.5	27.17	17.72	9.45	1.88	1.58	0.29	0.52	
	1.85	0.25	22.9	61.99	48.11	13.88	3.47	3.18	0.32	0.78	
	0.87	0.13	9.30	17.90	12.86	5.04	2.55	1.86	0.60	1.00	

出辉绿岩的配分模式与花岗岩的明显不同, 稀土元素总量较花岗岩低, 新鲜辉绿岩具有轻稀土元素弱富集略微右倾的特征, 配分曲线相互平行且基本一致, 说明新鲜辉绿岩样品之间稀土元素分馏程度相同, 也反映出新鲜辉绿岩在成岩过程中轻稀土元素分馏作用不明显, 重稀土元素分馏作用更弱; 无 Eu 异常或亏损, 反映了在岩浆演化过程中, 基本不存在分离结晶作用, 具明显的地幔特征。赤铁矿化、方解石化使辉绿岩的稀土元素总量增加, 表现为轻稀土元素富集右倾型、负 Eu 异常和轻稀土元素分馏程度高、重稀土元素分馏作用更弱的特征, Eu 的亏损反映了后期热液蚀变对辉绿岩的改造作用明显, 使辉绿岩中的稀土元素发生了明显变化(涂光炽, 1984; 韩吟文, 2003; 徐争启等, 2012)。

铈矿石的球粒陨石标准化配分型式图(图 5d)显示铈矿石具有稀土元素总量低、轻稀土元素弱富集略微右倾型和明显的 Eu 亏损特征, 除个别元素外, 各铈矿石样品分布曲线基本一致, 显示样品之间稀土元素分馏程度相同, 轻稀土元素分馏作用不明显, 重稀土元素分馏作用更弱; 铈矿石中 Eu 的亏损反映铈矿床在形成过程中可能继承了花岗岩中 Eu 的负异常特征(涂光炽, 1984; 韩吟文, 2003)。

铈矿石的稀土元素总量明显低于花岗岩和辉绿岩, 说明成矿热液贫稀土元素, 这可从以下两个方面来解释: 一是硅质脉(微晶石英)型铈矿石中的稀土元素主要以类质同像的形式存在或在微晶石英中的包裹体内赋存, 所以与围岩相比, 硅质脉中的稀土元素总量甚微; 二是成矿热液本身贫稀土元素, 成矿热

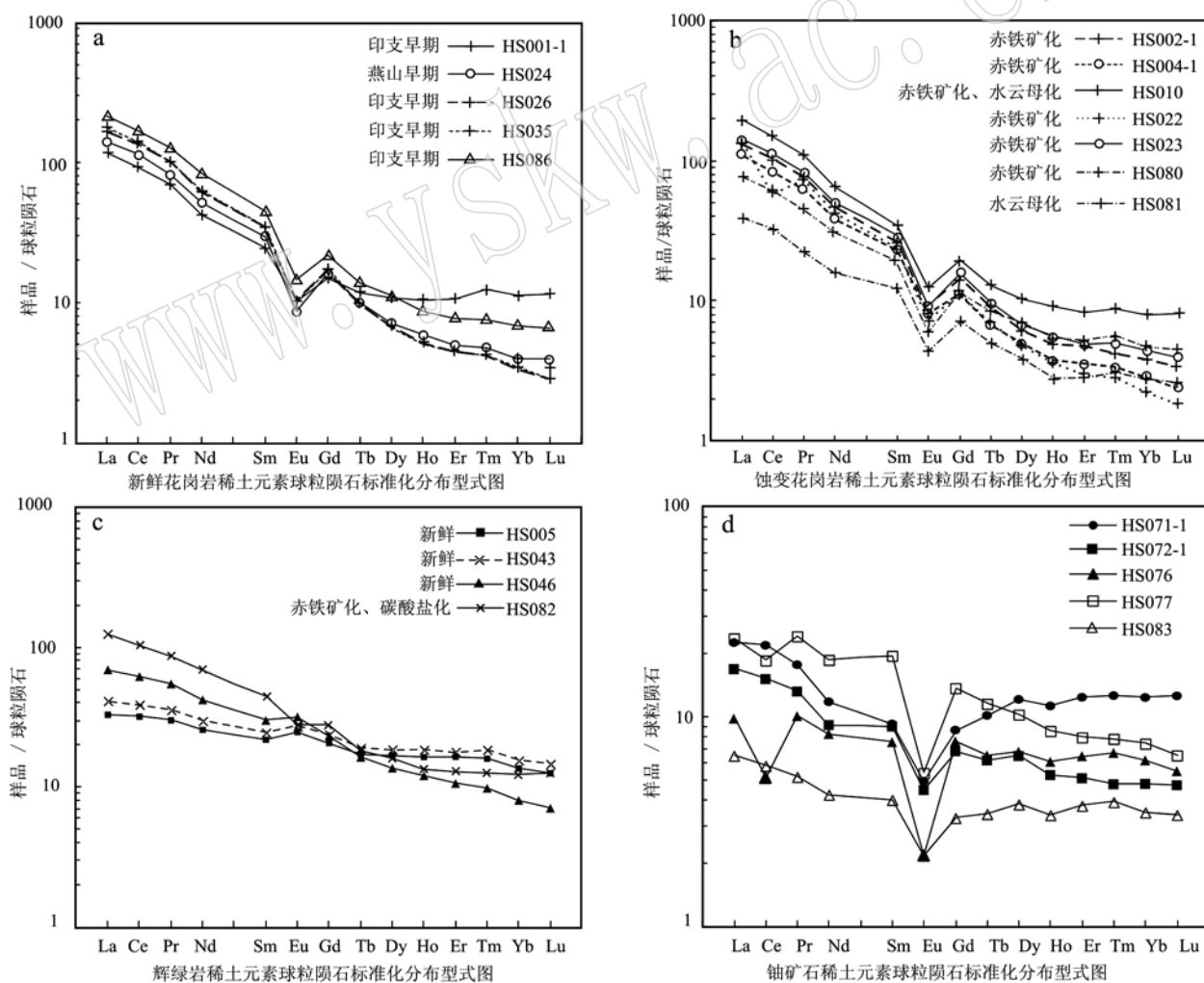


图5 上窰钨矿床稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(球粒陨石数据源于 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of the Shangjiao uranium deposit (chondrite data from Sun and McDonough, 1989)

液运移上升时,并未大量富集围岩中的稀土元素。

5 矿床成矿模型

在前人对上窖铀矿床的成矿地质背景、岩体-构

造-蚀变“三位一体”控矿要素以及矿床微量元素地球化学特征的归纳分析与研究(叶天竺等, 2014; 钟福军等, 2015; 夏宗强等, 2016)基础上,本文总结了上窖铀矿床的成矿模型参数特征(表 4),补充和完善了上窖铀矿床的成矿模型(图 6)。

表 4 上窖铀矿床成矿模型参数特征表
Table 4 Metallogenic model parameters of the Shangjiao uranium deposit

参数		特征
成矿地质背景	盆地类型	南雄断陷盆地
	基底性质	花岗质基底、前寒武纪变质基底
	铀矿床类型	花岗岩型
	大地构造环境	地幔坳陷区与地幔隆起深层构造单元的相互交接过渡地带
	成矿动力学背景	燕山早期-喜山早期多次的构造-岩浆活动
赋矿围岩特征	岩体类型	陆壳改造型-S 型(张敏等, 2016)
	产铀花岗岩体	印支早期、燕山早期的花岗岩体
	铀钍含量	铀含量高, 钍含量低; 从早到晚, 铀含量增加, 钍含量降低, 铀钍比值减小, 低于中国东部地壳平均值
	地球化学特征	富硅、偏碱、铝过饱和、 $K_2O > Na_2O$ (张敏等, 2016); 富集 Rb、Th、U、K、Ta, 亏损 Ba、Sr、P、Ti 等, 属低 Ba、Sr 花岗岩
	岩体成因	含铀或富铀古陆壳(前寒武纪变质基底)重熔上侵
构造-热液体系	热源来源	以地幔流体为主, 伴有少量岩浆热液和大气降水(吴德海, 2017); 盆地热卤水(李延河等, 2016)
	热液性质	地幔流体以富 CH_4 、 CO 、 CO_2 、 H_2S 、 Fe^{2+} 等矿化剂为特征(李延河等, 2016)
	成矿构造类型	岩浆热液以富硅、相对富铀、富 F、 CO_2 挥发分和酸性为特征(覃慕陶等, 1980), 大气降水、盆地热卤水以富氧为特征(李延河等, 2016)
	成矿构造特征	深大断裂; 形成于 110~103 Ma 和 93~88 Ma 的 NWW 向、近 EW 向的基性-中基性岩脉(李献华等, 1997; 曹豪杰, 2013; 夏菲等, 2017)
	成矿构造演化	以 NE、NNE、NW、EW 向为主要的断裂构造, 良伞寨断裂、F ₁₅ 号硅化破碎带, 与 NWW、近 EW 向的基性-中基性岩脉相交汇
	成矿结构面类型	早期是控矿断裂, 晚期是含矿断裂
	矿体就位样式	断裂构造带、不同期次的岩性界面
	矿体就位样式	脉状、似脉状、透镜状和团块状等产于不同结构面中
矿化蚀变	矿石类型	主要为沥青铀矿-赤铁矿-微晶石英型; 沥青铀矿-紫黑色萤石型
	成矿时代	约 97±5 Ma(吴德海, 2017)
	矿化期次	早期为沥青铀矿-胶状黄铁矿-灰黑色石英组合; 中期为铀成矿的高峰期, 是各种类型的组合; 晚期为沥青铀矿-红色微晶石英-紫黑色萤石组合
	矿石结构及构造	胶状结构, 细脉状、浸染状构造等
	矿物组合	沥青铀矿-黄铁矿-微晶石英-赤铁矿
	铀的赋存形式	独立铀矿物(沥青铀矿、铀酰磷酸盐矿物等); 在副矿物中呈类质同像形式存在; 在副矿物中以分散吸附形式赋存
	矿石微量元素	富集 Rb、Th、U、K、Ta、Nb, 贫 Ba、Ti、P, ΣREE 低
	蚀变分带	远近矿带具明显差异: 近矿蚀变主要为强赤铁矿化、硅化、萤石化等; 远矿蚀变为水云母化、绿泥石化、绢云母化和弱赤铁矿化等

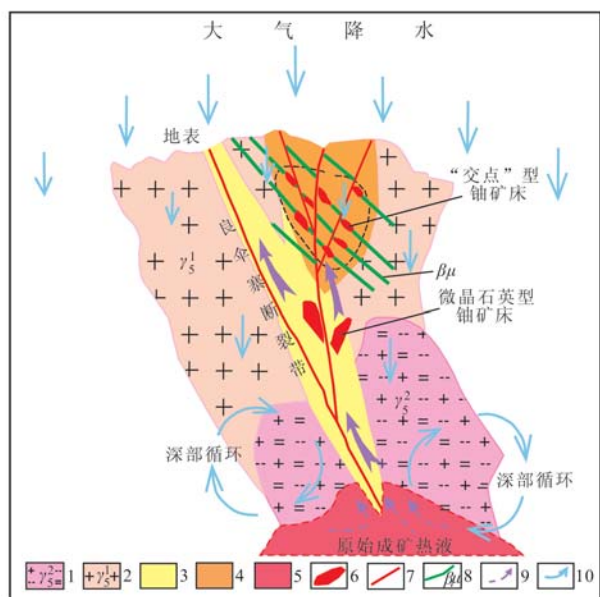


图6 上窖铀矿床成矿模型[据黄国龙等(2015)^①修改]

Fig. 6 Metallogenic model of the Shangjiao uranium deposit (modified after Huang Guolong *et al.*, 2015)^①

1—燕山早期中细粒二云母花岗岩; 2—印支早期中粗粒斑状黑云母花岗岩; 3—硅化晕; 4—赤铁矿化晕; 5—原始成矿热液; 6—矿体; 7—断裂; 8—中基性岩脉; 9—成矿流体流动方向; 10—大气降水水流方向

1—Early Indosinian middle-coarse grained porphyritic biotite granite; 2—Early Yanshanian medium-fine grained two-mica granite; 3—silicification halo; 4—hematization halo; 5—original metallogenic hydrothermal fluid; 6—orebody; 7—fault; 8—intermediate-basic dike; 9—direction of flow of the ore-forming fluids; 10—direction of atmospheric precipitation

燕山早期早阶段(180~170 Ma), 南岭地区构造地质背景开始由挤压转换为造山后地壳“拉张裂解”、岩石圈“局部伸展减薄”的地球动力学环境, 开始形成一系列张性断裂和碱性花岗岩、双峰式火山岩以及碱性玄武岩等(赵振华 1997; 陈培荣等, 2002; 李延河等, 2016)。

燕山早期晚阶段(150~139 Ma) 华南地区地壳进一步拉张, 地幔物质上涌, 火山活动频繁发生, 143~139 Ma 第1阶段与幔源密切相关的辉绿岩、煌斑岩等基性岩脉侵入(章邦桐等, 1994; 李献华等, 1997)。

燕山晚期—喜山早期(135~45 Ma), 太平洋板块俯冲速度减慢, 俯冲带逐渐向太平洋方向迁移, 此

时华南地区地壳处于强烈拉张的动力学背景, 并且一直持续到古近纪(章邦桐等, 1994), 在区域上形成北东向、北北东向拉张构造、裂隙带和红色沉积盆地以及一系列断裂带。此时区域上的构造-岩浆体系(岩浆热液为富硅、富F、CO₂等挥发分的酸性热液, 分异明显, 相对富铀)与大气降水、盆地热卤水之间的通道, 被打通, 大气降水、盆地热卤水沿拉张构造、裂隙带和断裂带下渗, 在深部被加热循环, 形成强氧化性的热水溶液并与富铀花岗岩体发生水-岩反应, 淋滤出U⁶⁺形成富氧富铀的成矿流体, 沿断裂构造上升迁移(覃慕陶等, 1980; 李延河等, 2016); 110~103 Ma、93~88 Ma, 第2阶段、第3阶段的基性、中基性岩脉侵入(李献华等, 1997), 这些基性、中基性岩脉富含CH₄、CO、CO₂、H₂S、Fe²⁺等挥发分和矿化剂。当沿断裂构造上升的富氧富铀成矿流体与富含CH₄、CO、CO₂、H₂S、Fe²⁺等挥发分和矿化剂的基性岩脉相遇时, 成矿流体中的U⁶⁺被还原成U⁴⁺, 形成沥青铀矿等沉淀, 进而富集形成铀矿床(李延河等, 2016)。

基性、中基性岩脉富含的CH₄、CO、CO₂、H₂S、Fe²⁺等挥发分和矿化剂, 在铀成矿过程中是一种重要的地球化学还原障, 能促使溶液中的氧化态U⁶⁺被迅速还原成U⁴⁺; CO₂等矿化剂有利于U⁶⁺以UO₂(CO₃)₂²⁻、UO₂(CO₃)₃⁴⁻等络物的形式迁移(李延河等, 2016)。基性、中基性岩脉在铀成矿作用过程中既提供了矿化剂, 又为含矿热液的运移提供通道, 为铀沉淀提供有利的地球化学环境; 伸展裂陷、构造则控制了区域上绝大多数铀矿田(床)的定位(章邦桐等, 1994; 胡瑞忠等, 2004)。胡瑞忠等(2004)统计研究表明, 华南白垩纪-古近纪地壳拉张、岩石圈伸展是分期进行的(145~135、125~115、110~100、95~85、75~70、55~45 Ma), 铀矿床的主要成矿时代与代表华南中生代地壳拉张、岩石圈伸展的基性岩脉形成时代具有较好的对应关系, 认为几乎所有的铀矿床都是在华南白垩纪-古近纪岩石圈减薄、地壳拉张这一特定的地球动力学背景下形成的(胡瑞忠等, 2004)。据电子探针测年分析, 上窖铀矿床的成矿年龄为97±5 Ma(吴德海, 2017), 与华南地壳拉张期(145~135、125~115、110~100、95~85、75~70、55~45 Ma)中的95~85 Ma一致, 与区域

① 黄国龙, 祁家明, 李钟枢, 等. 2015. 南岭中段青嶂山矿集区铀矿找矿预测成果报告. 核工业二九〇研究所.

上第2阶段(110~103 Ma)和第3阶段(93~88 Ma)的基性、中基性岩脉的侵入时间基本一致,与华南花岗岩型铀矿主要成矿期(140、120、110~100、90、70、50 Ma)中的90 Ma较为接近。

在上述模型参数和动力学背景基础上,上窖铀矿床的形成机制可分为以下4个过程。①预活化过程:印支-燕山期花岗岩,经燕山早期-喜山早期多期次的构造-岩浆活动(前文已述此阶段的岩浆热液为富硅、富F、CO₂等挥发分的酸性热液,分异明显,相对富铀),岩体内的铀被预活化;②萃取-淋滤过程:相对富铀富挥发分的高温原始成矿流体沿北东向良伞寨断裂从深部运移上升,同时大气降水、盆地热卤水沿断裂系统下渗,在深部被加热循环,与预活化岩体发生水-岩反应,萃取、淋滤出U⁶⁺形成富氧富铀的成矿流体;③降温-减压过程:富氧富铀的成矿流体经次级构造向地表运移,随着流体温度、压力的降低,挥发分等逸出,铀酰络合物分解,逐渐在近地表的次级断裂形成微晶石英脉型铀矿床;④氧化-还原过程:富氧富铀成矿流体沿次级断裂继续上升运移,由于环境的突变和中基性脉岩提供的CH₄、CO、CO₂、H₂S、Fe²⁺等矿化剂发生氧化还原反应的双重作用下,使迁移态的U⁶⁺还原成U⁴⁺并且沉淀成矿(李延河等,2016),形成“交点”型铀矿床,同时Fe²⁺被氧化成Fe³⁺,在地表以大面积的赤铁矿化蚀变作为最明显的找矿标志。

6 结论

(1) 上窖铀矿床的成矿物质来源于印支早期和燕山早期花岗岩,并且燕山早期花岗岩提供铀源的潜力更大;矿床周围的辉绿岩脉具明显的幔源特征,为区内铀成矿作用提供了丰富的矿化剂,为含矿热液的运移提供了通道,为铀沉淀提供了有利的地球化学环境。

(2) 上窖铀矿床水云母化蚀变叠加赤铁矿化蚀变时,铀强烈富集甚至矿化,野外应注重这两种蚀变的叠加部位,它们是重要的找矿标志。

(3) 上窖铀矿床的成矿流体具贫稀土元素的性质,成矿流体运移上升时,未大量富集围岩中的稀土元素。

(4) 完善了上窖铀矿床的成矿模型,其形成机制分为预活化过程、萃取-淋滤过程、降温减压过程和氧化-还原过程。上窖铀矿床成矿模型进一步的

补充和完善,对在类似的地质环境中开展找矿评价工作具有指导和借鉴意义。

致谢 样品处理过程得到了中国地质大学(武汉)刘颖博士的热心指导,文章修改过程得到了中国地质大学(武汉)刘国奇博士的帮助,参加部分野外和室内资料整理工作的还有牟平、舒田田、江思宇同学,匿名审稿专家和编辑部老师对本文进行了认真审阅并提出宝贵的修改意见,一并向他们表示诚挚的感谢!

References

- Boynton W V. 1984. Chapter 3-Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 2(2): 63~114.
- Cao Haojie, Huang Guolong, Xu Lili, *et al.* 2013. The Ar-Ar age and geochemical characteristics of diabase dykes of the Youdong fault zone in south of Zhuguang granite pluton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(7): 957~966(in Chinese with English abstract).
- Chen Peirong, Hua Renmin, Zhang Bangtong, *et al.* 2002. Geodynamics background and petrological constraints of the Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling area[J]. *Science in China(Series D)*, 32(4): 279~289(in Chinese with English abstract).
- Chen Qi, Xiao Jianjun, Fan Liting, *et al.* 2013. Geochemical characteristics of trace and rare earth elements in Xiangyangping uranium deposit of Guangxi[J]. *Uranium Geology*, 29(3): 152~161(in Chinese).
- Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, *et al.* 1999. Structure and composition of the continental crust in east China [J]. *Science in China(Series D)*, 29(3): 204~213(in Chinese).
- Han Yinwen and Ma Zhendong. 2003. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Su Wenchao, *et al.* 2004. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-tertiary in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 153~160(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Hu Ruizhong and Rao Bing. 1997. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China[J]. *Geochimica*, (2): 19~21, 25~36(in Chinese with English abstract).

- 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).
- Qi Jiaming, Xu Zhengqi, Liang Jun, *et al.* 2013. Geochemical characteristics of trace elements and its significance in uranium deposit 376, North Guangxi[J]. *Uranium Geology*, 29(1): 1 ~ 8(in Chinese with English abstract).
- Qin Mutao and Liu Shixian. 1980. The geological characteristics and the ore-forming process of the hydrothermal uranium ore deposit in Nanling granites[J]. *Acta Geologica Sinica*, (2): 154 ~ 166(in Chinese with English abstract).
- Sun Liqiang. 2011. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Mesozoic Granite Peripheral Area of the Zhuguangshan in the North Guangdong Province[D]. Nanjing University(in Chinese with English abstract).
- Sun Liqiang, Ling Hongfei, Shen Weizhou, *et al.* 2010. Geochronology of Youshan and Pingtian granites in naming range and its geological implication[J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(2): 186 ~ 197(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin* [C]. Geological Society Special Publication, 42: 313 ~ 345.
- Tao Jihua, Cen Tao, Long Wenguo, *et al.* 2015. Mineral chemistry of biotites from the Indosinian weakly peraluminous and strongly peraluminous granites in South China and their constraints on petrogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 64 ~ 78(in Chinese with English abstract).
- Tao Jihua, Li Wuxian, Cai Yuanfeng, *et al.* 2013a. Mineralogical feature and geological significance of Muscovites from the Longyuanba Indosinian and Yanshanian two-mica granites in the Eastern naming range[J]. *Science China: Earth Sciences*, 43(10): 1 659 ~ 1 666(in Chinese with English abstract).
- Tao Jihua, Li Wuxian, Li Xianhua, *et al.* 2013b. Petrogenesis of Early Yanshanian highly evolved granites in the Longyuanba area, Southern Jiangxi Province: Evidence from zircon U-Pb dating, Hf-O isotope and whole-rock geochemistry[J]. *Science China: Earth Sciences*, 43(5): 760 ~ 778(in Chinese with English abstract).
- Tu Guangzhi. 1984. *Geochemistry*[M]. Shanghai Scientific and Technical Publishers(in Chinese).
- Visona D and Lombardo B. 2002. Two-mica and tourmaline leucogranites from the Everest-Makalu Region (Nepal-Tibet): Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating[J]. *Lithos*, 62: 125 ~ 150.
- Wu Dehai. 2017. Research on the Geochemical Characteristic and Genesis of the Shangjiao Uranium Deposit in South Jiangxi Province[D]. Thesis of East China University of Technology for Master's Degree(in Chinese).
- Xia Fei, Chen Junsheng, Wang Xiaona, *et al.* 2017. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating on rhyolites, supergene rhyolite porphyry and diabase of No. 278 uranium deposit in Pingyuan County, Guangdong and its geological implications[J]. *Geology and Exploration*, 53(1): 109 ~ 123(in Chinese with English abstract).
- Xia Zongqiang, Wang Binghua, Xie Xiaozhan, *et al.* 2016. Preliminary ascertainment of the ore-forming geological bodies of granite-type uranium deposits and its prospecting significance, northern Guangdong Province[J]. *Journal of East China Institute of Technology(Natural Science)*, 39(2): 132 ~ 138(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhengqi, Cheng Fagui, Tang Chunyong, *et al.* 2012. Geological, geochemical and chronology characteristics and its significance of the dolerite in Daxin, Guangxi Province[J]. *Advances in Earth Science*, 27(10): 1 080 ~ 1 086(in Chinese with English abstract).
- Ye Tianzhu, Lü Zhicheng, Pang Zhenshan, *et al.* 2014. *Theory and Method of Prospecting Prediction in Prospecting Area*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Zhang Zuhuan, Ling Hongfei, *et al.* 1994. The relationship of uranium metallization with crustal evolution in southeastern China and their prospective analysis[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 14(2): 157 ~ 164(in Chinese with English abstract).
- Zhang Min, Chen Peirong, Huang Guolong, *et al.* 2006. Single-zircon LA-ICP-MS ages of the Longyuanba pluton in the eastern Nanling region and geological implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 984 ~ 999(in Chinese with English abstract).
- Zhang Min, Chen Peirong, Huang Guolong, *et al.* 2006. The research on the geochemical characteristics of Longyuanba composite pluton in Nanling Region[J]. *Uranium Geology*, 22(6): 336 ~ 344(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 1992. Geochemical characteristics of trace elements[J]. *Advances in Earth Science*, 7(5): 65 ~ 66(in Chinese).
- Zhao Zhenhua. 1997. *Principle of Trace Elements Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

Zhong Fujun, Pan Jiayong, Xia Fei, *et al.* 2015. Construction the mineralogical prediction geological model for volcanic-type uranium deposits and its application in China[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 38(2): 135 ~ 143 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹豪杰, 黄国龙, 许丽丽, 等. 2013. 诸广花岗岩体南部油洞断裂带辉绿岩脉的 Ar-Ar 年龄及其地球化学特征[J]. *地质学报*, 87(7): 957 ~ 966.
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等. 2002. 燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景[J]. *中国科学(D 辑)*, 32(4): 279 ~ 289.
- 陈琪, 肖建军, 范立亭, 等. 2013. 广西向阳坪铀矿床微量元素和稀土元素地球化学特征[J]. *铀矿地质*, 29(3): 152 ~ 161.
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 等. 1999. 中国东部地壳的结构和组成[J]. *中国科学(D 辑)*, 29(3): 204 ~ 213.
- 韩吟文, 马振东. 2003. *地球化学*[M]. 北京: 地质出版社.
- 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 等. 2004. 拉张与铀成矿的关系[J]. *地学前缘*, 11(1): 153 ~ 160.
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. *地球化学*, (2): 19 ~ 21, 25 ~ 36.
- 李延河, 段超, 赵悦, 等. 2016. 还原障在热液铀成矿中的作用[J]. *地质学报*, 90(2): 201 ~ 218.
- 祁家明, 徐争启, 梁军, 等. 2013. 桂北 376 铀矿床微量元素、稀土元素地球化学特征及其意义[J]. *铀矿地质*, 29(1): 1 ~ 8.
- 覃慕陶, 刘师先. 1980. 南岭花岗岩中热液铀矿床地质特征及成矿作用[J]. *地质学报*, (2): 154 ~ 166.
- 孙立强. 2011. 粤北诸广山外围中生代花岗岩年代学地球化学与岩石成因研究(博士论文)[D]. 南京大学.
- 孙立强, 凌洪飞, 沈渭洲, 等. 2010. 南岭地区油山岩体和坪田岩体形成年龄及其地质意义[J]. *高校地质学报*, 16(2): 186 ~ 197.
- 陶继华, 岑涛, 龙文国, 等. 2015. 华南印支期弱过铝质和强过铝质花岗岩中黑云母的矿物化学及其岩石成因制约[J]. *地学前缘*, 22(2): 65 ~ 78.
- 陶继华, 李武显, 蔡元峰, 等. 2013a. 南岭东段龙源坝印支和燕山期二云母花岗岩中白云母矿物化学特征及地质意义[J]. *中国科学*, 43(10): 1 659 ~ 1 666.
- 陶继华, 李武显, 李献华, 等. 2013b. 赣南龙源坝地区燕山期高分异花岗岩年代学、地球化学及锆石 Hf-O 同位素研究[J]. *中国科学*, 43(5): 760 ~ 778.
- 涂光炽. 1984. *地球化学*[M]. 上海: 上海科学技术出版社.
- 吴德海. 2017. 赣南上窖铀矿床地球化学特征及矿床成因探讨(硕士学位论文)[D]. 东华理工大学.
- 夏菲, 陈军胜, 王晓娜, 等. 2017. 广东平远县 278 铀矿床流纹岩、次流纹斑岩和辉绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 53(1): 109 ~ 123.
- 夏宗强, 王丙华, 谢小占, 等. 2016. 花岗岩型铀成矿地质体的初步厘定及其找矿意义[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 39(2): 132 ~ 138.
- 徐争启, 程发贵, 唐纯勇, 等. 2012. 广西大新地区辉绿岩地质地球化学、年代学特征及其意义[J]. *地球科学进展*, 27(10): 1 080 ~ 1 086.
- 叶天竺, 吕志成, 庞振山, 等. 2014. *勘查区找矿预测理论与方法*[M]. 北京: 地质出版社.
- 张敏, 陈培荣, 黄国龙, 等. 2006. 南岭东段龙源坝复式岩体 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 80(7): 984 ~ 999.
- 张敏, 陈培荣, 黄国龙, 等. 2006. 南岭龙源坝复式岩体的地球化学特征研究[J]. *铀矿地质*, 22(6): 336 ~ 344.
- 章邦桐, 张祖还, 凌洪飞, 等. 1994. 东部铀成矿作用与陆壳演化的关系及其远景分析[J]. *核科学与工程*, 2(14): 157 ~ 164.
- 赵振华. 1992. 微量元素地球化学[J]. *地球科学进展*, 7(5): 65 ~ 66.
- 赵振华. 1997. *微量元素地球化学原理*[M]. 北京: 科学出版社.
- 钟福军, 潘家永, 夏菲, 等. 2015. 我国火山岩型铀矿找矿预测地质模型的构建与应用[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 38(2): 135 ~ 143.