

粤北花岗岩型铀矿盆岭耦合成矿过程 与成矿动力探讨



Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

祁家明¹⁾, 刘斌¹⁾, 刘文泉¹⁾, 叶永钦¹⁾, 徐争启²⁾

1)核工业二九〇研究所,广东韶关,512029;2)成都理工大学地球科学学院,成都,610059

内容提要:粤北地区是我国重要的花岗岩型铀矿集区,但长久以来,巨大的岩矿时差导致对铀成矿动力的厘定模糊不清,铀矿成因也就具有了多解性。本文在充分总结粤北铀矿已有研究进展的基础上,针对区内中—新生代以来形成的特有盆山体系与铀矿的内在成因,以独特的视角梳理了岩体—断陷盆地的多次挤压—拉张耦合演化过程与铀成矿动力,认为区内热液型铀矿具有“非造山”成矿特征,其成矿过程受重熔型富铀花岗岩与 NE 向断陷带深源断裂活动的双要素联合制约,单独的花岗岩浆活动或区域断陷活动都无法独立成矿;同时认为 95 Ma 时期以 NE 向南雄断陷盆地标志的深源断陷活动是铀成矿的主要驱动力,晚期脉岩岩浆并不直接参与成矿,但对铀的活化和沉淀具有较重要的作用;铀成矿流体来自岩体深部早期压扭性断裂韧性变质热流体与后期张扭性断裂大气降水混合,成矿流体受 NW—SE 向挤压—伸展构造应力转换易在 NE 向断陷带夹持的 NW、NNW 向断裂及断陷红盆基底不整合界面成矿,因而是需重点关注的找矿方向。

关键词:花岗岩型铀矿;盆岭耦合作用;成矿动力;粤北地区

南岭中段粤北诸广山—南雄盆地—青嶂山—贵东地区是我国重要的花岗岩型铀矿集区,核工业系统联合各地质高校在区内开展了大量的地质找矿和基础科研工作,发现了一大批花岗岩型铀矿床,如诸广岩体长江矿田棉花坑(302)铀矿床、贵东岩体下庄矿田希望(330)铀矿床等。在 21 世纪初,华南地区的花岗岩型铀矿储量曾占全国探明铀矿储量的近 40%,而粤北地区的铀资源量占华南全区的 50% 以上(黄国龙等,2012;陈振宇等,2014),显示出粤北铀矿在国内铀矿领域的重要地位。

然而,前人往往聚焦于花岗岩体与铀成矿关系的研究,或侧重于单个矿床的铀源、成矿流体、形成时代及控矿因素等,而忽略了特别是中生代以来构造活动及演化和铀矿成因的认识,导致铀成矿理论往往有所局限。研究发现,如果从包括诸广岩体到青嶂山岩体、贵东岩体在内的区域来看,尽管具体矿床容矿构造大部分是近 SN 向或 NNW 向的,但已经发现的铀矿在区域上分布规律还是很清楚的,即已发现的铀矿床总体上与北东向断裂及北东向断陷红

盆关系密切(图 1),特别是与 NE 向展布的南雄盆地有关,在南雄断陷盆地的 NW 和 SE 侧均有大量的铀矿分布。这显然不是偶然现象,一定有内在的地质作用和地质规律在支配和起作用。尽管大量学者认为区内铀矿形成与白垩纪—古近纪地壳伸展拉张(胡瑞忠等,2004;张国全等,2008)及形成的 NE 向伸展构造(潘永正等,1994;陈跃辉等,1997)与断陷红盆卤水(林锦荣等,2016;Zhang Chuang et al., 2019; Chi Guoxiang et al., 2020)有关。但长期以来,人们并没有更多地将铀成矿与南雄盆地与两侧的诸广山岩体和青嶂山岩体所代表的山岭组成的盆岭体系及“盆岭耦合作用”联系起来进行思考和研究,忽略了区内盆岭演化过程对铀成矿的驱动作用。对这一问题的探讨必然与华南区域中—新生代构造演化和动力学背景有关。

1 粤北区域铀矿地质基本特征

粤北地区位于南岭 EW 向构造—岩浆带中段,区域上位于华夏板块与扬子板块接触部位(图 1),

注:本文为科技部重点研发计划项目(编号:2017YFC06026)、中国核工业地质局铀矿调查与科研项目(编号:202035-6、202140-2)、中国铀业有限公司—东华理工大学联合基金资助项目(编号:NRE2021-05)、广东省科技专项基金项目(编号:201112166271152)及韶关市科技计划项目(编号:200624094530179)的成果。

收稿日期:2021-05-14;改回日期:2021-12-31;网络首发:2022-01-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.01.065

作者简介:祁家明,男,1987 年生,高级工程师,主要从事铀矿地质学研究;Email: jiaming_qi@126.com。通讯作者:刘斌,男,1989 年生,工程师,主要从事铀矿地质学研究;Email: 13951651882@163.com。

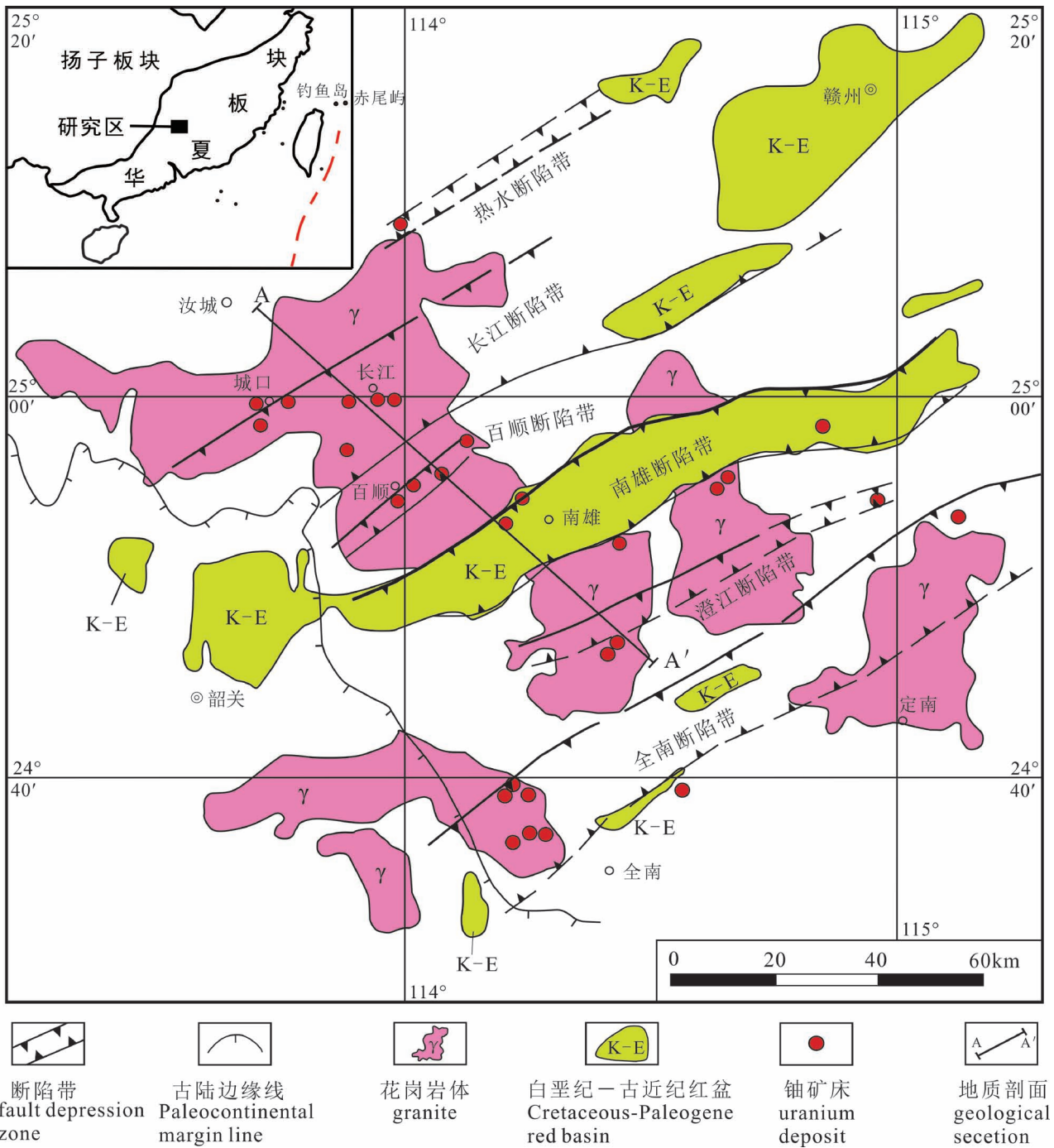


图 1 粤北花岗岩、断陷带与铀矿分布示意图(据潘永正,1987)

Fig. 1 Distribution of the granites, fault depression belts and uranium deposits in Northern Guangdong (modified from Pan Yongzheng, 1987#)

以中生代花岗岩为主,区内铀矿床多赋存于花岗岩体内部或与其围岩接触带附近的断裂构造中。

区内出露的诸广山—青嶂山—贵东岩体为多期多阶段复式岩体,侵入于寒武系和泥盆系地层中,岩浆活动频繁,但以印支期和燕山期 S 型黑云母花岗岩为主,地球化学属性为高硅、高铝、碱性—钙碱性

系列,印支期成岩年龄为 245~225 Ma,燕山期成岩年龄为 170~150 Ma(邓平,2003)。其岩体含铀量可达 $13\times10^{-6}\sim24\times10^{-6}$,是一般花岗岩的数倍,是区内重要的产铀岩体,为铀成矿提供了丰富的铀源(邓平,2003)。

区内构造活动强烈,形成了一系列断裂构造,晚

侏罗世—早白垩世多为控岩断裂构造,而晚白垩世—新近纪形成的断裂多为控盆断裂构造。断裂展布方向有SN、EW、NW、NE等,这些断裂构造多为深源断裂,具有多次活动的特征。总体趋势是SN向断裂较早,EW向、NW向断裂次之,最晚为NE向断裂。深源断裂控制了区内中—新生代以来的岩浆活动和盆地形成与发展,同时也控制了铀矿和多金属矿产的形成和空间定位(图2)。

区内铀矿多产于花岗岩区域内NE向主干断裂附近及与其伴生的二、三级硅化碎裂带中(图3),铀矿类型以微晶石英型、碎裂蚀变带型和“交点”型为主,围岩蚀变普遍发育硅化、萤石化、赤铁矿化、绿泥石化、黄铁矿化、碳酸盐化等,成矿温度集中于250~150℃,具中低温热液成矿特征(张国全等,2008;郭国林等,2010;张闯等,2016);区内主要铀成矿呈多期、多阶段性,其成矿年龄集中于140、120、90、70和50 Ma等阶段,成矿高峰期为90~70 Ma,与花岗岩的成岩年龄相差较大,而与区内的6次地壳伸展运动的时间则是一一对应的(张国全等,2007)。

2 花岗岩型铀矿成因机制研究进展

国内外诸多学者对区内花岗岩型铀矿床成因机制进行了研究(Ibrahim, 2001;Taboada et al., 2006;Cuney et al., 2009; Helmy et al., 2014; Neiva et al., 2014; Zhang Chuang et al., 2019; Chi Guoxiang et al., 2020),对其铀矿成因理论也逐渐深化:①大

陆风化说,即富铀的矿源在特定古气候条件下经过地表剥蚀,在地表水向下渗透过程成矿,但该学说无法解释成矿温度较高(150~300℃)等现象,因此,逐渐被地质学家放弃(Geffroy, 1958);②原地重熔说,陈国能等(2015)认为花岗岩型铀矿床的形成主要与花岗岩多次重熔成矿有关,但该理论缺乏地球化学及同位素数据的支持;③热水浸出说,主要为循环地下水沿断裂上升过程中从富铀岩石中浸出铀,然后运移至地表沉淀成矿。随着研究工作不断深入,热水浸出说支持者们认识到,成矿热液中的水主要为大气降水成因,在这一点上也基本达成共识(凌洪飞,2011);④胡瑞忠等(2004,2007)提出“深源矿化剂成矿理论”,认为铀成矿是在伸展体制下,地幔中CO₂与大气降水演化混合流体对围岩中的铀浸取迁移,CO₂的去气作用导致铀沉淀;⑤此外,也有学者(Dahlkamp, 2009; Zhang Chuang et al., 2019; Chi Guoxiang et al., 2020)提出花岗岩型铀成矿与断陷红盆及晚期中基性侵入岩浆活动密切相关,成矿流体为大气降水淋滤红盆的卤水,热源主要为中基性侵入岩浆。

3 粤北岩浆、构造活动与铀成矿研究进展

3.1 区域岩浆活动与铀成矿

粤北铀矿聚集区岩浆活动强烈,从加里东期到燕山期均有活动,且以印支期—燕山期岩浆活动最

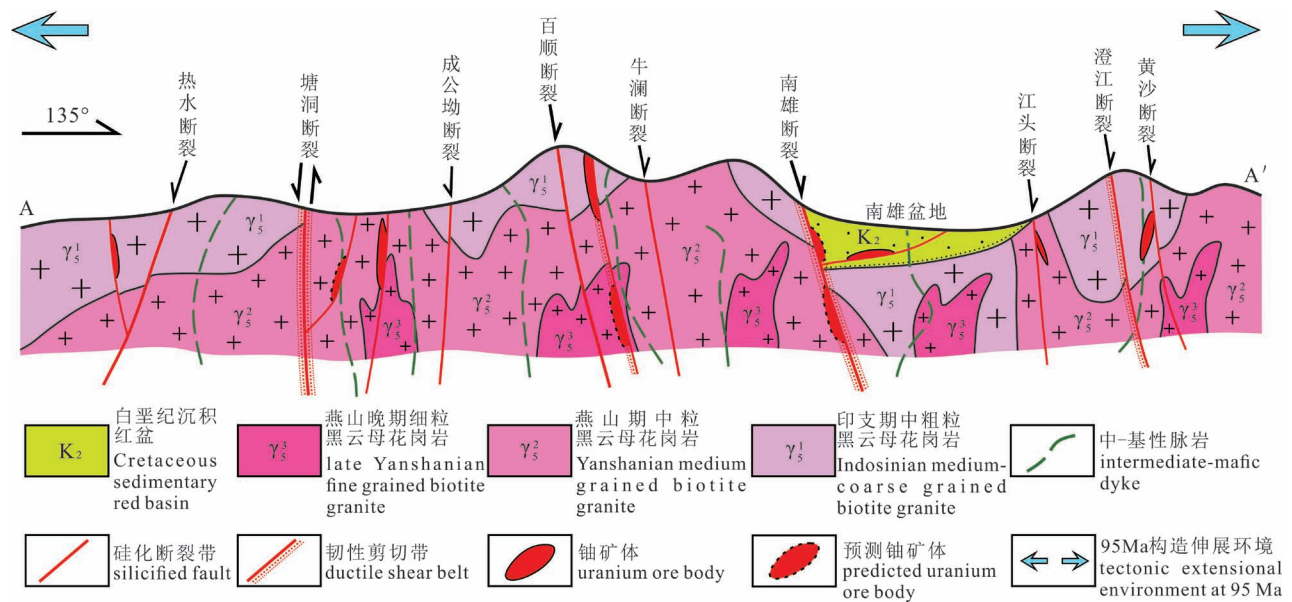


图2 粤北诸广—青嶂山岩体断裂控矿剖面示意图

Fig. 2 Sketch section of uranium controlling faults in Zhuguang—Qingzhang granites, Northern Guangdong

为强烈(钟福军等,2019)。加里东期岩浆岩主要为花岗闪长岩和石英二长岩,其成岩时代为 462~424 Ma(伍光英等,2008;李光来等,2010;于玉帅等,2017)。印支早期和燕山期花岗岩出露面积最广,以岩基产出,构成了诸广、贵东岩体的主体,岩性以二云母花岗岩和黑云母花岗岩为主,成岩时代主要介于两个峰期,分别为 240~230 Ma、160~130 Ma(邓平等,2011a、b,2012;孙立强,2018;兰鸿锋等,2020)。研究表明,区内印支期及燕山期二云母花岗岩、黑云母花岗岩为典型“S”型花岗岩,其铀矿物主要以晶质铀矿形式存在(祁家明等,2014),易被后期热液活化迁移,且岩体的铀含量总体介于 13.5

$\times 10^{-6} \sim 44.70 \times 10^{-6}$ 之间(张龙等,2016;Zhang Long et al., 2018;孙立强,2018)明显高于上地壳铀含量值(Rudnick et al., 2003),为富铀花岗岩,因此,可为铀成矿提供铀源。

此外,区内还存在中基性与酸性脉岩岩浆侵入活动,主要形成辉绿岩、煌斑岩、辉绿玢岩、辉绿闪长岩及细粒花岗岩脉等。诸多学者对区内中基性与酸性脉岩的形成时代进行了研究:

(1)中基性脉岩:①诸广岩体出露的中基性岩:曹豪杰等(2013)对长江矿田油洞断裂带中出露的辉绿岩测定其 Ar-Ar 年龄为 110.6 Ma;Zhang Long et al.(2018)对长江矿田出露的辉绿岩测得 Ar-Ar

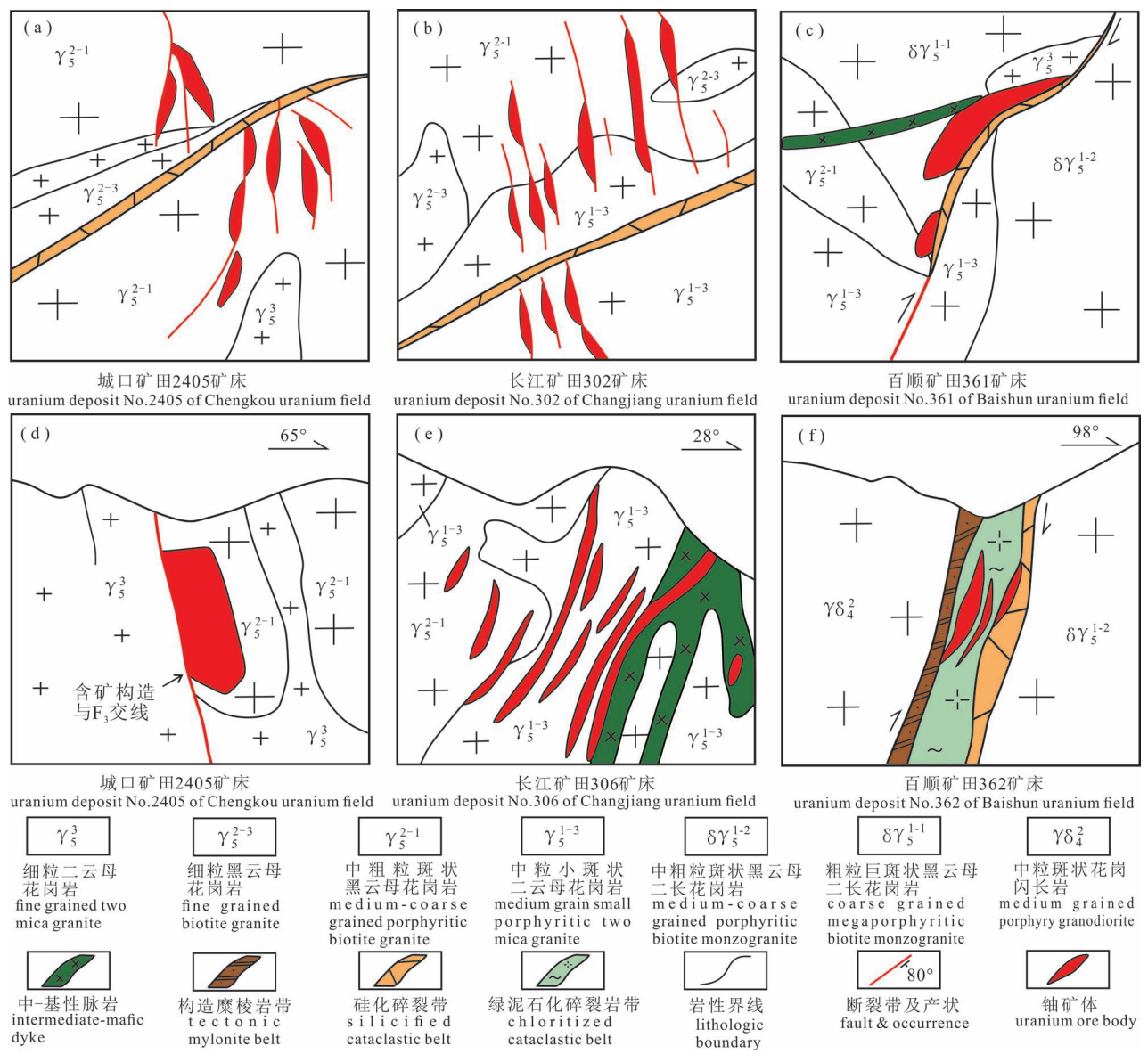


图 3 粤北主要花岗岩型铀矿床示意图
Fig. 3 Brief geological map of the main granite-related uranium deposits in Northern Guangdong

年龄为 145.1 Ma;钟福军等(2019)对长江矿田中出露的辉长闪长岩测得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 159 Ma。②贵东岩体出露的中基性岩:李献华等(1997)首次测得下庄铀矿田基性岩脉的 Ar-Ar 年龄为~140 Ma、~105 Ma、~90 Ma 等三个阶段;而骆金诚等(2019)测得下庄铀矿田辉绿岩、闪长玢岩角闪石 Ar-Ar 年龄分别为 211.4 Ma、202.9~185.6 Ma、179.6 Ma 等。③青嶂山岩体出露的中基性脉岩:聂斌等(2018)测得黄沙矿田辉绿岩 Ar-Ar 年龄为 140 Ma。由此可见,区内中基性脉岩主要形成于~140 Ma、~105 Ma、~90 Ma,极少数形成于 200~190 Ma、~180 Ma。

(2)酸性侵入脉岩:徐文雄等(2014)对棉花坑铀矿床中侵入的细粒花岗岩脉进行了锆石 U-Pb 定年,得到细粒花岗岩成岩年龄为 136 Ma;虞航等(2017)对诸广南高坪地区侵入的细粒花岗岩脉进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,得到该侵入岩脉成岩年龄为 252~244 Ma;周航兵等(2018)对长江铀矿田细粒花岗岩脉采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得其形成时代为 123.9 Ma。可见酸性岩脉主要形成于印支期、燕山晚期。

综合上述研究工作,区内中基性与酸性脉岩岩浆侵入活动可划分为五期:252~244 Ma、200~185 Ma、156 Ma、136~123 Ma、90 Ma,与华南铀成矿的六个阶段(145~135 Ma、120~115 Ma、110~100 Ma、90~85 Ma、75~65 Ma、50~45 Ma)(胡瑞忠等,2007;郭春影等,2019)具有一定的年龄差异。因此,中基性与酸性脉岩岩浆侵入是否直接驱动铀成矿作用还有不小的争议,但多期次的脉岩岩浆活动可以为铀的活化提供热源已成为业界共识。

3.2 区域构造活动与铀成矿

NE 向南雄断裂和遂川—热水断裂是诸广地区区域性深源断裂,控制了区域上岩浆岩、构造破碎带和断陷盆地的空间展布(陈跃辉等,1997;舒良树等,2004b)。诸广山岩体南部铀矿聚集区东西两侧被 NE 向南雄断裂带和遂川—热水断裂带所夹持,南雄断裂带是诸广山岩体与南雄盆地的边界,与岩体组成了盆山体系,制约着区域上岩浆与断裂构造的活动。

不同学者对该断裂带的性质、构造演化及形成时代进行了分析,南雄断裂带属于伸展体系下的低角度剥离断层(潘永正等,1994;陈跃辉,1994),为浅层次的热隆伸展构造,断裂带上部为脆性变形层,下部为韧性变形层,既是导矿构造,又是储矿构造

(张明林等,2009)。南雄断裂带的构造演化过程大体经历了三个阶段,即韧性活动—脆韧性活动—脆性活动,南雄断裂带中生代伸展活动开始于早白垩世(117.3±2.7 Ma),强烈的伸展变形和韧性剪切主要发生在早白垩世末—晚白垩世初(94.6±0.4 Ma)(舒良树等,2004a;李出安等,2011),但对于脆性变形时代的研究相对较少,至今尚不清楚。

同时,有学者对 NE 向南雄深源断裂带与铀成矿的关系进行了分析,陈跃辉等(1994)通过对断裂带内糜棱岩显微特征分析,认为南雄断裂带为剥离断层,该剥离断层为导岩、导矿的有利构造,同时提出该剥离断层引起的虹吸作用是铀成矿的关键;杨尚海(2010)认为与南雄断裂的强烈挤压相配套的 NW 向张性断裂系统是幔源岩浆作用及深部流体上涌的通道,也是铀矿体的赋矿空间。梁良等(2019)通过对该断裂带中的构造片理化带中的糜棱岩岩相学、年代学及与铀成矿的关系分析,认为在强烈的韧性剪切作用下,部分动力变质流体参与铀成矿。韧性变形与脆性变形转换对铀成矿具有重要作用,脆韧性转换交替面,也是地球化学转换面,有利于成矿流体的汇聚与成矿元素沉淀(陈峰等,2019)。

除 NE 向主干深源断裂外,也有不同学者先后分别对区内主要矿田构造进行了研究。张珂等(2011)、王军等(2011)对下庄矿田出露的 NW、NNE 及 NE—NNE 向三组构造断裂演化特征及其与铀成矿关系进行了分析,认为 NW 向断裂经历了早期剪切、中期拉张和晚期挤压 3 个阶段,为基性岩浆的主要通道;NNE 向断裂由晚侏罗世剪切发展到早白垩世张剪活动,为重要的导矿构造;NE—NNE 向断裂控制了区域红盆的产出,NNE 和 NEE 断裂复合部位为铀成矿有利部位。詹礼贵(2016)通过对诸广地区出露的 NE 向、SN 向及 NW 向三组断裂构造应力分析,结果显示 NE 向控矿断裂上下盘的次级近 SN 向断裂构造是区内最重要的储矿和容矿构造,且经历了早期压扭性构造与晚期张扭性构造活动。

4 区域中—新生代构造体制转换与铀成矿动力

燕山期构造运动形成了大量 NE 向逆冲断裂、褶皱构造、伸展构造等,并对前期构造进行了强烈的改造。董树文等(2007)通过中国东部侏罗纪构造—岩浆活动的研究,将燕山运动的活动时间定为 165~83 Ma,指出燕山运动共经历了三个演化阶段:

强挤压期—陆内造山(165~136 Ma)、主伸展期—岩石圈减薄(135~100 Ma)和弱挤压变形(100~83 Ma)。Li Jianhua et al. (2014)总结华南晚中生代构造、岩浆岩及其地球化学结果,得出在136~86 Ma期间,主要存在三期构造变形:136~118 Ma期间,华南大陆主要表现为NW—SE向的伸展,形成了大范围的拉张盆地和大量的岩浆活动的侵入/喷发,伸展作用受控于Pacific-Izanagi(太平洋—伊泽纳崎)洋中脊俯冲过程中的板片窗打开及太平洋板块俯冲过程中的后撤作用;117~108 Ma期间,华南发生NW—SE向的转换构造挤压作用,在华南边缘形成了岩浆活动,且之前形成的拉张盆地发生了挤压反转;107~86 Ma期间,华南主要受到了WNW—ESE向的伸展作用,导致了早期断陷盆地进一步伸展、大规模的基性岩浆侵入,同时,诸多热液铀矿床形成。即铀成矿作用主要发生在挤压向伸展的构造体系转换过程中及其之后,表明铀成矿作用与构造体系转换存在一定的耦合关系。

胡瑞忠等(2007)研究结果表明,华南铀成矿作用主要是在伸展构造背景条件下形成的,伸展构造体制下的构造—岩浆—流体及其铀成矿动力学机制为研究的热点。华南地区由挤压向伸展构造转换开始于晚侏罗世(余心起等,2005;柏道远等,2007)。Shu Liangshu等(2009)通过沉积环境与盆地分析,将华南中生代盆地划分为前陆盆地、裂谷、火山断陷、红层伸展断陷四种类型,认为中侏罗世南岭地区出现陆内引张背景下的裂谷盆地和双模式火山岩堆积,提出中侏罗世初始构造域转换的观点,南岭东段

是特提斯向太平洋构造域转变的重要位置之一,其中火山断陷、红层伸展断陷是与华南地区铀矿床关系非常密切的。因此,构造体制转换为华南铀成矿提供了动力学基础。

5 区域盆岭耦合作用与铀成矿过程讨论

5.1 盆岭耦合作用与铀成矿

上述研究表明,华南地区先后经历了6期次构造伸展运动,其又归为2个次级阶段:①晚侏罗—早白垩世岩浆断陷盆岭阶段(145~135 Ma、120~115 Ma和110~100 Ma)和②晚白垩世—古近纪的陆内伸展断陷沉积盆地阶段(95~85 Ma、75~70 Ma和55~45 Ma)(胡瑞忠等,2004;舒良树,2012;王正庆等,2013)。上述两阶段6期次地壳伸展运动与华南的6个铀成矿期(表1)为一一对应关系,且铀成矿高峰期为90~60 Ma,与晚白垩世—古近纪的陆内伸展断陷沉积阶段密切相关。

粤北地区的铀矿年龄也趋同于该规律,诸广岩体各铀矿田第一期成矿年龄100~90 Ma,第二期成矿年龄80~60 Ma(吴烈勤等,2003;张龙等,2016;Bonnetti et al., 2018;钟福军等,2019);贵东岩体下庄铀矿田的成矿年龄为第一期134~127 Ma(杜乐天,2001;Luo Jincheng et al., 2015; Bonnetti et al., 2018),第二期成矿年龄为93~66 Ma(邹东风等,2011;骆金诚等,2015),第三期成矿年龄为41 Ma或54 Ma(Bonnetti et al., 2018;张伟盟等,2019);南雄盆地南缘青嶂山岩体内的铀矿床也具有相似的成矿

表 1 诸广棉花坑(302)铀矿年龄、华南铀成矿阶段与华南区域构造运动关系
Table 1 The relationship between the ages of Mianhuakeng (No. 302) uranium deposit in Zhuguang granite, the uranium mineralization stages and regional tectonic movements in South China

成矿期次	断陷阶段	构造运动时期(数据引自胡瑞忠等,2004)	华南铀成矿阶段(数据引自胡瑞忠等,2004)	棉花坑(302)铀矿床成矿年龄
成矿晚期	陆内伸展断陷沉积盆地阶段	55~45 Ma	50~45 Ma	~54 Ma(张国全等,2008) 60.0±0.5 Ma、60.8±0.6 Ma(钟福军等,2019)
主成矿期		75~70 Ma	70~65 Ma	65.3±1.6 Ma(陶意,2020) ~68 Ma、66.85±1.6 Ma(张龙等,2018;钟福军等,2019) 70±11 Ma(黄国龙等,2010)
		95~85 Ma	90~85 Ma	84.7±1.2 Ma(陶意,2020) ~92 Ma(张龙等,2018) 93±15 Ma(Bonnetti et al. , 2018)
		成矿早期	岩浆断陷盆岭阶段	110~100 Ma 120~115 Ma 145~135 Ma

年龄阶段(赖静等,2020)。区内铀矿床成矿时代主要集中在 90~60 Ma 之间(图 4),为晚白垩世。同时从单个矿床来看,如区内目前已勘探、研究程度最高的棉花坑铀矿床目前已发表的多期年龄数据(表 1)也具有相似的分布(祁家明等,2019),且主成矿期为 70 Ma(黄国龙等,2010)。暗示伸展拉张运动与铀成矿关系密切。

而总体上,华南地区从早中生代挤压体制的特提斯构造域转变为晚中生代伸展体制的古太平洋构造域,奠定了现今的主体构造轮廓,形成了壮观的盆岭构造体系(邓平等,2002;舒良树等,2004a,b;Zhou Xinmin et al., 2006),而粤北地区南雄断陷盆地与两侧诸广山花岗岩、青嶂山花岗岩组成的典型伸展断

陷盆岭体系也是在这一过程中形成,是晚白垩世—古近纪陆内伸展运动的结果(舒良树等,2004a)。从前人在对区内南雄断陷红盆边缘的南雄深源断裂带研究成果不难看出,断裂带下盘糜棱岩化辉绿岩形成于 105 Ma,糜棱岩形成于 100 Ma±(邓平等, 2002);盆地内玄武岩锆石 U-Pb 年龄为 95.9±0.8 Ma(舒良树等,2004a);断裂带内白云母 Ar-Ar 年龄显示南雄断裂带活动开始于 117.3±2.7 Ma,强烈的伸展变形发生于 94.8±0.4 Ma,随后在 88.9±1 Ma、81.1±2 Ma 发生过 2 次明显的热扰动事件(李出安等,2011;王雨豪,2017);多种证据表明,南雄深源断裂带在 117~81 Ma 间呈多期、多阶段持续活动,而 95 Ma 可以代表诸广山花岗岩浆演化末期以及山体

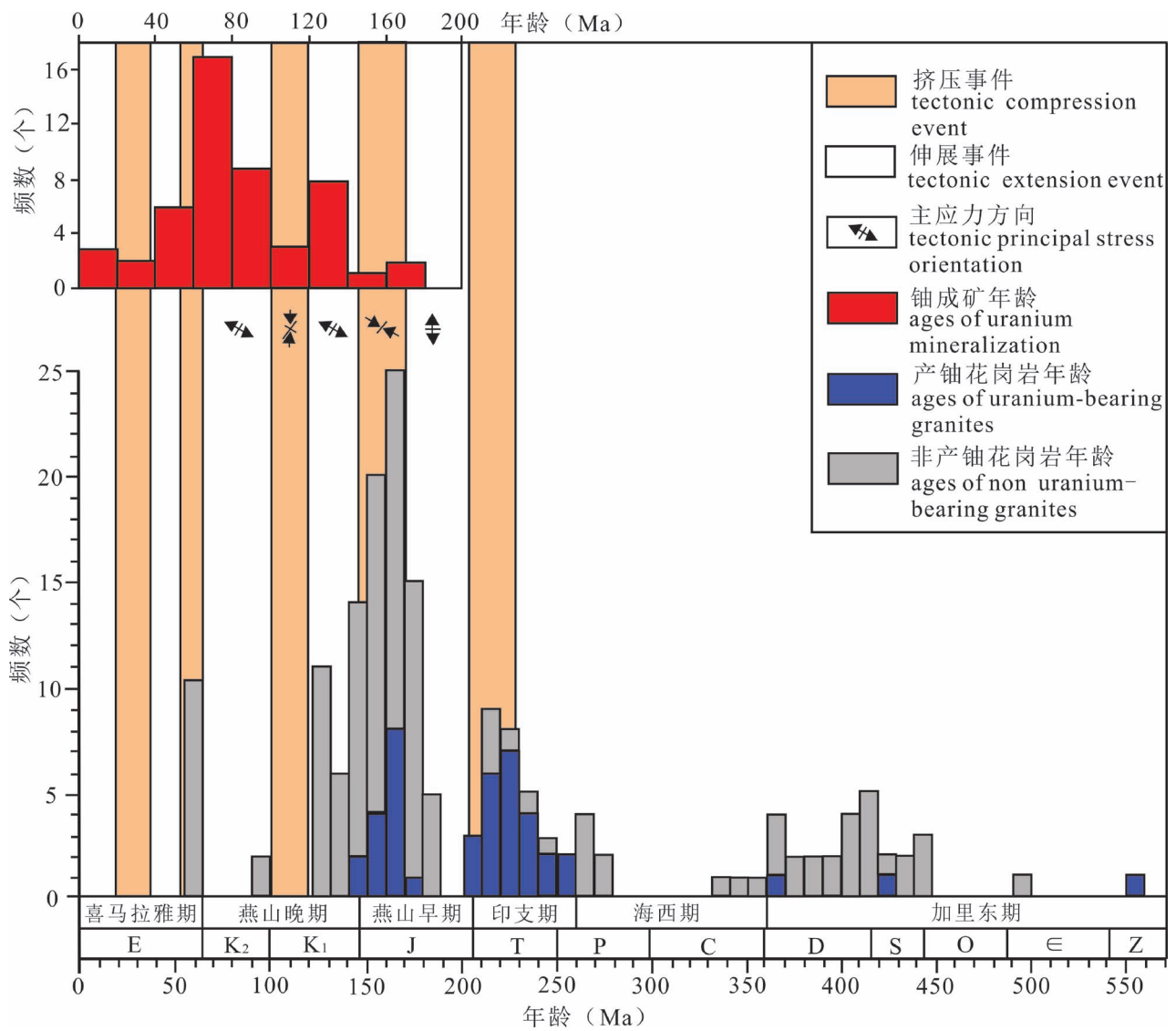


图 4 华南构造运动、岩浆活动与铀成矿年龄关系(据邓平,2003)

Fig. 4 Relationship between tectonic movements, magmatism and uranium mineralization ages in South China (modified from Deng Ping et al., 2003&)

快速隆升、南雄盆地剧烈拉张的高峰期(舒良树等, 2004a), 同时伴随着中基性岩浆侵入。

而后的 90~60 Ma 则是粤北铀矿的成矿高峰期, 并与构造运动具有良好的对应关系(图 4), 这不是时间上的巧合, 而是存在成因上的联系, 因为在铀成矿过程中, 含铀热液往往通过深源导矿构造运移至低应力区域, 如果深源导矿构造是开放体系, 易与地表沟通, 则大部分成矿流体或气体会随之消失, 不能形成大规模矿床(李紫金等, 1998), 而深源导矿构造及所派生的次级构造由于与导矿构造贯通且环境较封闭, 就可视为理想的成矿场所。而粤北区内构造在晚中生代经历了由挤压环境向拉张环境的构造体制转变, 生成的 NE 向深源断裂带伴随着构造应力由压扭性到张性扩容空间的临界转换, 含铀热液沿该类深源断裂运移至共轭张性扩容空间(如 NW、NNW 向次级断裂)时, 其成矿物理化学条件(温度、压力及其酸碱度)会发生突变, 促使成矿物质在含矿构造由陡变缓的转换部位大量沉淀和成矿。同时, 压扭性构造具有一定的空间密闭性, 可促使成矿流体集中并定向运移, 发生构造流体多重耦合作用, 从而制约热液蚀变强烈、矿体延深大。由此可见, 在 95 Ma 左右华南地区由岩浆断陷盆岭阶段转为陆内伸展断陷盆地阶段, 构造应力由 NW—SE 向挤压环境转变为拉张环境的脆韧性转化(Li Jianhua et al. 2014; 陈峰等, 2019), 而区内铀成矿高峰期为 90~60 Ma(图 4), 因此可认为 95 Ma 形成的 NE 向南雄断陷盆地是粤北铀成矿大爆发的标志, 因而该期 NW—SE 向陆内伸展运动即为区内铀成矿作用最主要的驱动力。

同时, 林锦荣等(2016)也认为, 华南地区的 NE 向断陷红盆控盆深源断裂带控制着区内铀矿分布, 而叠加在富铀岩浆活动中心的断陷红盆深源断裂构造控制铀矿田的空间定位, 铀矿多赋存于控盆深源断裂及其次级断裂带中。而从粤北地区铀矿空间分布不难看出, 南雄断陷盆地及其 NE 向主干断裂带与印支期—燕山期含铀复式花岗岩体共同控制了铀矿床的分布(图 1)。

因此, 受华南中—新生代 NE 向断陷盆地控盆深源断裂构造活动驱动、产铀花岗岩体分布等双要素制约的铀成矿过程, 即可理解为“盆岭耦合”铀成矿作用。区内的这类铀矿化是一种“非造山”环境中的矿化, 与区内造山环境的内生金属矿产(如钨、锡矿)成因完全不同; 同时也可看出, 在这种非造山的成矿环境下, 区内单独的花岗岩浆活动或单独的

区域断陷活动都不足以形成这种区域性的热液型铀矿。

5.2 晚期脉岩对铀成矿的制约

深源断裂构造的伸展切穿地壳必然会导致岩浆上涌, 粤北地区就发育不少沿着 NE 或 NW 向分布的细粒花岗岩脉和中基性岩脉, 从上述统计的区内已有晚期脉岩成岩年龄不难看出, 其形成时间基本属于晚侏罗世—早白垩世岩浆断陷盆岭阶段, 与铀矿主成矿阶段(90~60 Ma)存在较大的时间差, 其形成年龄对应的是华南岩浆断陷盆岭阶段构造运动的时间, 因而晚期脉岩(不论是细粒花岗岩脉还是中基性岩脉)的岩浆活动可能并不直接驱动铀成矿过程, 区内铀矿也不具有岩浆热液成矿的特征, 原因有三: ①并未发现新鲜无蚀变的脉岩就直接含有沥青铀矿; ②岩脉年龄与铀矿年龄还是存在不小的差异; ③与铀矿不同, 同区脉岩鲜有多期次穿插现象。基本认为晚期脉岩是在华南中生代早中期区域构造伸展运动过程中形成的“副产品”(赖静等, 2020)。

但是, 同时也应看到, 部分燕山晚期的脉岩成岩年龄(136~123 Ma)与铀成矿早期(140~135 Ma、120~115 Ma)具有较一致的对应性, 暗示该期脉岩岩浆活动可为铀成矿提供热源及铀的预活化作用。此外, 也有研究表明, 中基性岩富有明显的还原 Fe^{2+} , 若被后期断裂切穿且有深源成矿流体经过, 则可为铀的沉淀提供相对有利的还原性环境(Wang Xiangli et al., 2015; Zhang Long et al., 2018), 可形成“交点”型铀矿, 如下庄铀矿田。

5.3 铀成矿作用过程

在区内印支—燕山产铀花岗岩体形成后, 华南板块受到太平洋板块的阶段俯冲, 区内又经历了 3 期岩浆断陷盆岭挤压—伸展运动, 引起拉张盆地的初步形成与晚期脉岩岩浆活动的侵入/喷发(Li Jianhua et al. 2014); 而在 117~108 Ma 的 NW—NE 向板块挤压阶段, 岩体深部的易碎带因受到较大应力作用而发生韧性变形, 区内 NE 向南雄、塘洞等深源断裂下盘糜棱岩即为该期形成, 在韧性变形过程中强烈的摩擦转化为热能, 使上地壳岩石或矿物因韧性变质脱水、脱碳、脱硅而释放出较高温富 ΣCO_2 、硅酸盐的热流体, 同时也使得花岗岩体副矿物(晶质铀矿、金红石、锆石等)中的铀得以预活化(祁家明等, 2014), 并形成较宽广的绢云母化(胡瑞忠等, 2004)。

在之后的 107~86 Ma 期间, 太平洋板块回撤, 华南板块因受到 WNW—ESE 向的伸展作用(Li

Jianhua et al. 2014)而发生构造体制转换,岩石圈减薄,引起上地壳发生脆性变形,于95 Ma进入陆内伸展断陷盆地阶段,沿前期形成的NE向韧性剪切带因受该期张扭性伸展应力作用而形成深源脆性断裂,同时也形成与之共轭的NW、NNW向压扭性断裂;此时因受NE向构造张裂扩容产生构造负压的驱动,“虹吸”岩体深部前期韧性剪切形成的承压热流体上侵,但此时的热流体氧逸度低,在上侵过程中不断的与沿断裂带下渗的地下水、岩石裂隙水等(大气降水)混合,形成高氧逸度、高萃取性的临界流体(凌洪飞,2011),与所经富铀岩体发生水—岩反应,使岩体内预活化的高铀副矿物 U^{4+} 被氧化成 U^{6+} 而形成成矿流体。当成矿流体被吸入次级压扭性裂隙带中,流体压力、温度、氧化还原电位的变化、氧逸度的降低等多种因素耦合而促使铀沉淀成矿(祁家明等,2019)。

6 找矿方向分析

由于前人对粤北地区铀矿研究过于聚焦于花岗岩体与铀成矿之间的关系,而巨大的岩矿时差也使得区内的铀成矿机理与理论研究一直争议不断,区内铀矿勘查主要遵循“就矿找矿”的模式,在实现部分老矿区深部(如诸广岩体长江铀矿田深部)“第二空间”找矿突破之后,近些年区内的铀矿勘查成果并未有实质性的重大突破,钻孔越打越深,但矿体品位并非越深越富;同时区内勘查后备基地的缺乏,铀矿勘查工作基本已遇瓶颈。区内铀矿多赋存于花岗岩体的断裂带内,但问题在于并不是所有不同期次、不同展布方向的断裂带都是含矿的,而浅部的矿体基本均已勘查殆尽,这也是在区内无法很好的开展深部找矿预测的关键。

赵如意等(2020)根据南岭地区铀矿的后生热液型成矿特征与规律,提出“全位成矿与缺位找矿”的理念,其认为区内具有“空间全位”铀成矿模式,在不同构造层、不同建造、不同岩性及不同部位均具有成矿潜力,因具体成矿地质条件的不同可进行“缺位法找矿”。但该找矿方法过于宏观,可能还需针对粤北地区铀矿的独有特征进一步具象化才能指导区内找矿工作。

在工作程度如此之高的粤北地区开展深部找矿预测,就必须摆脱目前区内“就矿找矿”的勘查模式,本文跳出花岗岩体的限制,以独特的视角重新审视区内岩体—断陷带的多次拉张—挤压脆韧性转化的耦合演化过程与铀成矿的联系,确定了铀成矿的

动力学背景与铀成矿两大关键制约因素:①重熔型富铀花岗岩体分布与②95 Ma时期陆内伸展运动形成的深源断陷带之间耦合成矿;这为指导区内的找矿预测工作指明了较明确的方向:

(1)NE向断陷带内夹持的NW、NNW向断裂控矿:富铀成矿流体沿NE深源裂带向上运移,是极易在脆韧性应力转换带沉淀成矿的,95 Ma为NW—SE向的伸展拉张时期以张扭性应力条件形成NE向断陷盆地,而在NW—SE向可形成一系列共轭的压扭性断裂带,由于成矿流体沿NE深源断裂流经共轭的NW向断裂存在巨大的脆韧性应力转换,极易在NW、NNW向断裂带内形成富大矿体,因此岩体NE向断陷带内所夹持的NW、NNW向断裂带是具有非常好的找矿前景的,如长江铀矿区棉花坑、书楼丘、长排、水石等一系列铀矿床主要含矿断裂带均为NNW向,如图1所示各断陷带内以前工作所忽略的NW、NNW向断裂均具有较好找矿前景。

(2)NE向南雄断陷红盆基底不整合界面控矿:同时,区内NE深源断裂带往往是经过了多期次的伸展—挤压运动的,断裂带充填大量代表脆性应力的不同期次的微晶石英脉,而下盘围岩接触带内发育着厚层代表韧性挤压剪切的糜棱岩,因此成矿流体在沿该NE向深源断裂带向上运移时遇脆韧性应力转换期也是极易成矿的,如百顺断陷带内东坑(361)铀矿床矿体就赋存于NE向烟筒岭断裂下盘糜棱岩内,而作为NE向断陷活动中心的南雄断裂带亦发育着巨厚的代表脆性应力的多期次微晶石英脉与代表韧性剪切应力的糜棱岩,因此,NE向南雄断陷盆地基底不整合面亦是具有非常好的找矿前景的,而发育于其上盘白垩纪沉积红层中的暖水塘、中村等铀矿床均预示着基底不整合面具有好的找矿潜力(图2),但前人在该地区的勘查并未穿透基底不整合界面。因此下一步工作部署需要多加关注。

7 结论

(1)受华南中—新生代NE向断陷盆地边缘深源断裂活动驱动、产铀花岗岩体分布等双重要素制约的铀成矿过程即为盆岭耦合铀成矿作用。

(2)以95 Ma时期NW—SE向的陆内伸展运动形成的以南雄断陷盆地标志的系列NE向深源断陷活动,是提供区内铀成矿的主要驱动力。

(3)华南构造伸展运动下形成的晚期脉岩岩浆活动并不直接参与铀成作用,但对岩体铀的预活化与沉淀起到了较为重要的作用。

(4)NE 向断陷带内夹持的 NW、NNW 向断裂及 NE 向南雄断陷红盆基底不整合界面是区内找矿需关注的重点方向。

致谢:本文在行文过程中得到了核工业北京地质研究院范洪海研究员、南京大学凌洪飞教授的悉心指导与帮助;审稿专家提出了建设性意见与建议;在此一并表示衷心感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

柏道远,黄建中,李金冬,王先辉,马铁球,张晓阳,陈必河. 2007. 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. 大地构造与成矿学,31(1):1~13.

曹豪杰,黄国龙,许丽丽,黄乐真,王小冬,吴建勇,王春双. 2013. 诸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. 地质学报,87(7):957~966.

陈峰,颜丹平,邱亮,杨文心,汤双立,郭庆银,张翼西. 2019. 江南造山带西南段摩天岭穹隆脆韧性剪切与铀成矿作用. 岩石学报,35(9):2637~2659.

陈国能,邱惟,卢映新,彭卓伦,蓝恒春,娄峰,张俊浩,许清燕,王勇. 2015. 陆壳多次重熔与火山岩型铀—多金属矿田的形成. 地学前缘,22(4):22~28.

陈跃辉. 1994. 南雄断裂构造剥蚀作用及其与铀成矿的关系. 铀矿地质,10(3):168~174.

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. 铀矿地质,13(3):128~138.

陈振宇,黄国龙,朱捌,陈郑辉,黄凡,赵正,田泽瑾. 2014. 南岭地区花岗岩型铀矿的特征及其成矿专属性. 大地构造与成矿学,38(2):264~275.

邓平,舒良树,谭正中,吴烈勤. 2002. 南岭中段中生代构造—岩浆活动与铀成矿序列. 铀矿地质,18(5):257~263.

邓平. 2003. 南岭东段中、新生代盆—山动力学及其铀成矿作用. 导师:舒良树. 南京:南京大学博士学位论文:1~199.

邓平,凌洪飞,沈渭洲,孙立强,朱捌,黄国龙,谭正中. 2011a. 粤北热水岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征研究. 地质学报,85(8):1274~1283.

邓平,任纪舜,凌洪飞,沈渭洲,孙立强,朱捌,谭正中. 2011b. 诸广山南体燕山期花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义. 地质论评,57(6):881~888.

邓平,任纪舜,凌洪飞,沈渭洲,孙立强,朱捌,谭正中. 2012. 诸广山南体印支期花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 科学通报,57(14):1231~1241.

董树文,张岳桥,龙长兴,杨振宇,季强,王涛,胡建民,陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报,81(11):1449~1461.

杜乐天. 2001. 中国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学. 北京:原子能出版社,1~263.

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. 地球科学,45(1):72~89.

郭国林,刘晓东,潘家永,刘成东,严兆彬,陈益平. 2010. 粤北 302 铀矿床流体包裹体研究. 铀矿地质,26(6):350~354.

胡瑞忠,毕献武,苏文超,彭建堂,李朝阳. 2004. 华南白垩—第三纪地壳拉张与铀成矿的关系. 地学前缘,11(1):153~160.

胡瑞忠,毕献武,彭建堂,刘深,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. 矿床地质,26(2):139~152.

黄国龙,尹征平,凌洪飞,邓平,朱捌,沈渭洲. 2010. 粤北地区 302 矿床沥青铀矿的形成时代、地球化学特征及其成因研究. 矿床地质,29(2):352~360.

黄国龙,曹豪杰,凌洪飞,沈渭洲,王小冬,伏顺成. 2012. 粤北油洞岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成因研究. 地质学报,86(4):557~586.

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. 地质学报,94(4):1128~1142.

兰鸿锋,王洪作,凌洪飞,陈卫锋,王凯兴,王丹. 2020. 粤北茶山岩体岩石成因与铀、钨成矿潜力探讨. 地质学报,94(4):1143~1165.

李出安,邹和平. 2011. 广东南雄断裂带 Ar-Ar 年龄及其地质意义. 中山大学学报(自然科学版),50(1):129~132.

李光来,华仁民,胡东泉,黄小娥,张文兰,王旭东. 2010. 赣南地区石雷石英闪长岩的成因:岩石化学、副矿物微量元素、锆石 U-Pb 年代学与 Sr—Nd—Hf 同位素制约. 岩石学报,26(3):903~918.

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. 地球化学,26(2):14~31.

李紫金,傅昭仁,李建威. 1998. 湘赣边区 NNE 向走滑断裂—流体—铀成矿动力学分析. 现代地质,12(4):522~531.

梁良,李建红,刘成东. 2019. 粤北花岗岩型铀矿集区糜棱岩带特征及其与铀成矿的关系. 铀矿地质,35(2):73~79.

林锦荣,李子颖,胡志华,王勇剑,王峰. 2016. 热液型铀矿空间定位的控制因素. 铀矿地质,32(6):333~339.

凌洪飞. 2011. 论花岗岩型铀矿床热液来源—来自氧逸度条件的制约. 地质论评,57(2)193~206.

骆金诚,齐有强,王连训,陈佑纬,田建吉,石少华. 2019. 粤北下庄铀矿田基性岩脉 Ar-Ar 定年及其与铀成矿关系新认识. 岩石学报,35(9):2660~2678.

聂斌,张万良. 2018. 赣南黄沙矿区辉绿岩 Ar-Ar 年龄及其与铀成矿关系. 矿产与地质,32(3):390~396.

潘永正. 1987. 广东省花岗岩型铀矿床区域成矿要素. 中国核科技报告,(S1):1~16.

潘永正,张建新. 1994. 诸广岩体南部伸展构造与铀成矿关系的探索. 铀矿地质,10(3):138~143.

祁家明,黄国龙,朱捌,伏顺成,许幼,叶松鑫. 2014. 粤北棉花坑铀矿床蚀变花岗岩副矿物特征研究. 地质学报,88(9):1691~1704.

祁家明,朱捌,吴建勇,曹豪杰,刘文泉,徐争启. 2019. 粤北仁化棉花坑铀矿床成矿热液演化及其对成矿过程的约束. 岩石学报,35(9):2711~2726.

舒良树,邓平,王彬,谭正中,余心起,孙岩. 2004a. 南雄—诸广地区晚中生代盆山演化的岩石化学、运动学与年代学制约. 中国科学(D 辑),34(1):1~13.

舒良树,周新民,邓平,余心起,王彬,祖辅平. 2004b. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化. 地质通报,23(9~10):876~884.

舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报,31(7):23~41.

孙立强. 2018. 南岭诸广山地区中生代花岗岩成因及其对铀成矿作用的启示. 导师:凌洪飞. 南京:南京大学博士学位论文:1~179.

陶意. 2020. 诸广山地区棉花坑矿床铀成矿氧化还原条件研究. 导师:林锦荣. 北京:核工业北京地质研究院硕士学位论文:1~108.

王正庆,管太阳,林子瑜,冯志刚,谢炎石,陈亮. 2013. 华南中生代构造—岩浆活动驱动机制与铀成矿研究进展. 东华理工大学学报(自然科学版),36(4):349~356.

王雨豪. 2017. 粤北南雄盆地构造演化及其对红层地貌发育的影响. 导师:牛树银. 石家庄:河北地质大学硕士学位论文:1~62.

王军,赖中信,张辉仁,汤世凯,杨坤光. 2011. 粤北下庄矿田新生代构造演化及其对铀成矿的影响. 大地构造与成矿学, 35(3):355~363.

伍光英,马铁球,冯艳芳,闫全人,刘富国,柏道远. 2008. 南岭万洋山加里东期花岗岩地质地球化学特征及其成因. 中国地质, 35(4):608~617.

吴烈勤,谭正中,刘汝洲,黄国龙. 2003. 粤北下庄矿田铀矿成矿时代探讨. 铀矿地质, 19(1):28~33.

徐文雄,谭忠银,罗春梧,许雨丽,黄国龙. 2014. 棉花坑铀矿床花岗岩脉岩地球化学特征及其与铀成矿的关系. 铀矿地质, 30(6):345~355.

杨尚海. 2010. 南雄断裂带构造演化及铀成矿作用. 铀矿地质, 26(5):257~263.

虞航,蔡煜琦,李伟林,黄国龙,庞雅庆,江卫兵,张闯. 2017. 诸广山南部高坪地区细粒花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质论评, 63(3):781~792.

余心起,吴淦国,张达,狄永军,臧文拴,张祥信,汪群峰. 2005. 中国东南部中生代构造体制转换作用研究进展. 自然科学进展, 15(10):1167~1174.

于玉帅,戴平云,郭福生,谢小占,鲍波. 2017. 粤北扶溪岩体成因及时代:来自矿物化学、岩石地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄证据. 地质科技情报, 36(6):71~82.

詹礼贵,祝民强,祁家明,沈滔,徐快平. 2015. 诸广岩体南部辉绿岩脉特征及其与铀成矿关系. 科学技术与工程, 15(19):1~9.

张闯,蔡煜琦,徐浩,刘佳林. 2016. 粤北 302 铀矿床成矿机制探讨——来自流体包裹体的证据. 东华理工大学学报(自然科学版), 39(2):156~164.

张国全,胡瑞忠,商朋强,刘雷,杨社锋. 2007. 华南花岗岩型铀矿床成矿机理研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 26(4):399~404.

张国全,胡瑞忠,商朋强,田建吉,双燕. 2008. 302 铀矿床方解石 C—O 同位素组成与成矿动力学背景研究. 矿物学报, 28(4):413~420.

张龙,陈振宇,田泽瑾,黄国龙. 2016. 电子探针测年方法应用于粤北长江岩体的铀矿物年龄研究. 岩矿测试, 35(1):98~107.

张龙,陈振宇,李胜荣,黄国龙. 2018. 粤北棉花坑(302)铀矿床围岩蚀变分带的铀矿物研究. 岩石学报, 34(9):2657~2670.

张明林,管太阳,林子瑜,刘建军. 2009. 南雄断裂带岩石地球化学特征及其与铀成矿的关系. 东华理工大学学报(自然科学版), 32(2):12~17.

张珂,闫亚鹏,赖中信,卢映新. 2011. 下庄铀矿田构造特征及与热液铀矿化的关系. 地学前缘, 18(1):118~125.

张伟盟,严杰,钟福军,潘家永,刘文泉,赖静,周堂波. 2019. 粤北石角围花岗岩型铀矿床沥青铀矿 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 定年研究. 岩矿测试, 38(4):449~460.

赵如意,王登红,陈毓川,冷成彪,秦锦华,赵晨辉. 2020. 南岭成矿带铀矿地质特征、成矿规律与全位成矿模式. 地质学报, 94(1):1~11.

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. 岩石学报, 35(9):2727~2744.

周航兵,潘家永,钟福军,祁家明,韩善楚. 2018. 粤北长江铀矿田细粒黑云母花岗岩的成因及其与铀成矿关系. 矿物岩石, 38(3):10~19.

邹东风,李方林,张爽,黄彬,宗克清. 2011. 粤北下庄 335 矿床成矿时代的厘定——来自 LA-ICP-MS 沥青铀矿 U-Pb 年龄的制约. 矿床地质, 30(5):912~922.

Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Li Jindong, Wang Xianhui, Ma Tieqiu, Zhang Xiaoyang, Chen Bihe. 2007&. Multiple geological elements constraint on the Mesozoic tectonic evolution of South China: apocalypse of the Mesozoic geological evolution in southeastern Hunan and the Hunan—Guangdong—Jiangxi border area. Geotectonica et Metallogenia, 31(1):1~13.

Bonnetti C., Liu, X. D., Mercadier J., et al. 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. Ore Geology Reviews, 92: 588~612.

Cao Haojie, Huang Guolong, Xu Lili, Huang Lezhen, Wang Xiaodong, Wu Jianyong, Wang Chunshuang. 2013&. The Ar-Ar age and geochemical characteristics of diabase dykes of the Youdong fault zone in South Zhuguang granite pluton. Acta Geologica Sinica, 87(7):957~966.

Chen Feng, Yan Danping, Qiu Liang, Yang Wenxin, Tang Shuangli, Guo Qingyin, Zhang Yixi. 2019&. The brittle—ductile shearing and uranium metallogenesis of the Motianling dome in the southwestern Jiangnan orogenic belt. Acta Petrologica Sinica, 35(9):2637~2659.

Chen Guoneng, Qiu Wei, Lu Yingxin, Peng Zhuolun, Lan Hengchun, Lou Feng, Zhang Junhao, Xu Qingyan, Wang Yong. 2015&. Multi crustal melting and its relationship to the formation of volcanic-type uranium—polymetal ore-field. Earth Science Frontiers, 22(4):22~28.

Chen Yuehui, Chen Zuyi, Cai Yuqi, Shi Zuhai, Feng Quanhong, Fu Jin. 1997&. Space—time evolution of Meso—Cenozoic extensional tectonics and distributions of uranium mineralizations in Southeastern China. Uranium Geology, 13(3):128~138.

Chen Yuehui. 1994&. Tectono-denudational process of Nanxiong fault and its relations to uranium metallogenesis. Uranium Geology, 10(3):168~174.

Chen Zhenyu, Huang Guolong, Zhu Ba, Chen Zhenghui, Huang Fan, Zhao Zheng, Tian Zejin. 2014&. The characteristics and metallogenic specialization of granite-hosted uranium deposits in the Nanling region. Geotectonica et Metallogenia, 38(2):264~275.

Chi Guoxiang, Ashton Kenneth, Deng Teng, Xu De'ru, Li Zenghua, Liang Rong, Kennicott Jacklyn. 2020. Comparison of granite-related uranium deposits in the Beaverlodge district (Canada) and South China: a common control of mineralization by coupled shallow and deep-seated geologic processes in an extensional setting. Ore Geology Reviews. 117:1~17.

Cuney M. 2009. The extreme diversity of uranium deposits. Mineralium Deposita, (1):3~9.

Dahlkamp J. F. 2009. Uranium Deposits of the World. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 86~157.

Deng Ping, Shu Liangshu, Tan Zhengzhong, Wu Lieqin. 2002&. Mesozoic tectonomagmatic activity and uranium metallogenetic sequence in mid-Nanling tectonic belt. Uranium Geology, 18(5):257~263.

Deng Ping. 2003&. Study on the geodynamics of the Mesozoic—Cenozoic basin—range evolution in the eastern Nanling belt and their uranium metallization. Instructor: Shu Liangshu. Nanjing: Doctoral thesis of Nanjing University:1~199.

Deng Ping, Ling Hongfei, Shen Weizhou, Sun Liqiang, Zhu Ba, Huang Guolong, Tan Zhengzhong. 2011a&. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Reshui granitic batholith,

- Northern Guangdong. *Acta Geologica Sinica*, 85(8):1274~1283.
- Deng Ping, Ren Jishun, Ling Hongfei, Shen Weizhou, Sun Liqiang, Zhu Ba, Tan Zhengzhong. 2011b&. Yanshanian granite batholiths of southern Zhuguang mountain: SHRIMP zircon U-Pb dating and tectonic implications. *Geological Review*, 57(6):881~888.
- Deng Ping, Ren Jishun, Ling Hongfei, Shen Weizhou, Sun Liqiang, Zhu Ba, Tan Zhengzhong. 2012&. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications for Indosinian of southern Zhuguangshan granitic composite, South China. *Chin Sci Bull*, 57(14):1231~1241.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, Yang Zhenyu, Ji Qiang, Wang Tao, Hu Jianmin, Chen Xuanhua. 2007&. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan movement. *Acta Geologica Sinica*, 81(11):1449~1461.
- Du Letian. 2001#. Basic metallogenic regularity of hydrothermal uranium deposits in China and general hydrothermal metallogeny. Beijing: Atomic Energy Press, 1~263.
- Geffroy J, Sarcia J. A. 1958. La notion de “gite épithermal uranifère” et les problèmes qu’elle pose; *Bulletin de la Societe Chimique de France*. 6: 173~19.
- Guo Chunying, Qing Mingkuan, Xu Hao, Ren Zhongbao, Zou Mingliang, Bai Yun, Zhao Yuting. 2020&. Age of Zhangjia Uranium deposit in the Miaoshe ore field, Guangxi autonomous region, China; in situ micro-determination on pitchblende. *Earth Science*, 45(1):72~89.
- Guo Guolin, Liu Xiaodong, Pan Jiayong, Liu Chengdong, Yan Zhaobin, Chen Yiping. 2010&. Study of fluid inclusion from uranium deposit No. 302 in north Guangdong. *Uranium Geology*, 26(6):350~354.
- Helmy H M, Kaindl R, Shibata T. 2014. Genetically related Mo—Bi—Ag and U—F mineralization in A-type granite, Gabal Gattar, Eastern Desert, Egypt. *Ore Geology Reviews*, 62:181~190.
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Su Wenchao, Peng Jiantang, Li Chaoyang. 2004&. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous—Tertiary in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1):153~160.
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, Liu Shen, Zhao Junhong, Jiang Guohao. 2007&. Some problems concerning relationship between Mesozoic—Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China. *Mineral Deposits*, 26(2):139~152.
- Huang Guolong, Yin Zhengping, Ling Hongfei, Deng Ping, Zhu Ba, Shen Weizhou. 2010&. Formation age, geochemical characteristics and genesis of pitchblende from No. 302 uranium deposit in northern Guangdong. *Mineral Deposits*, 29(2):353~360.
- Huang Guolong, Cao Haojie, Ling Hongfei, Shen Weizhou, Wang Xiaodong, Fu Shuncheng. 2012&. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemistry and genesis of the Youdong granite in northern Guangdong. *Acta Geologica Sinica*, 86(4):557~586.
- Ibrahim M. E, Saleh G M, Elnaby H H A. 2001. Uranium mineralization in the two mica granite of Gabal Ribdab Area, South Eastern Desert, Egypt. 55(6): 861~872.
- Lai Jing, Qi Jiaming, Chen Junjun, Li Zhongshu, Cao Haojie. 2020&. Uranium micromineralogy and geochronology of the Jiangtou uranium ore field in the Qingzhangshan granite pluton, north Guangdong: constraints on the genetic relationship with metallogenic dynamic background. *Acta Geologica Sinica*, 94(4):1128~1142.
- Lan Hongfeng, Wang Hongzuo, Ling Hongfei, Chen Weifeng, Wang Kaixing, Wang Dan. 2020&. Petrogenesis of the Chashan granite in the northern Guangdong Province and its implication for the metallogenic potential of tungsten and uranium mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 94(4):1143~1165.
- Li Chu’an, Zou Heping. 2011&. The Ar-Ar age of the Nanxiong fault zone in Guangdong Province and their geological significance. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 50(1): 129~132.
- Li Guanglai, Hua Renmin, Hu Dongquan, Huang Xiao’e, Zhang Wenlan, Wang Xudong. 2010&. Petrogenesis of Shilei quartz diorite in southern Jiangxi, Constraints from petrochemistry, trace elements of accessory minerals, zircon U-Pb dating and Sr—Nd—Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3):903~918.
- Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Johnston T. Stephen. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis. *Earth-Science Reviews*, 134(1): 98~136.
- Li Xianhua, Hu Ruizhong, Rao Bing. 1997&. Geochronology and geochemistry of cretaceous mafic dikes from Northern Guangdong, SE China. *Geochimica*, 26(2):14~31.
- Li Zijin, Fu Zhaoren, Li Jianwei. 1998&. Dynamic system analysis of metallogenesis of NNE-trending strike-slip fault—fluid-uranium mineralization in Hunan—Jiangxi border region. *Geoscience*, 12(4):522~531.
- Liang Liang, Li Jianhong, Liu Chengdong. 2019&. Feature of mylonite belt and its relation to granite-type uranium deposit in Northern Guangdong metallization cluster. *Uranium Geology*, 35(2):73~79.
- Lin Jinrong, Li Ziyang, Hu Zhihua, Wang Yongjian, Wang Feng. 2016&. Controlling factors for the spatial positioning of hydrothermal uranium orefield. *Uranium Geology*, 32(6):333~339.
- Ling Hongfei. 2011&. Origin of hydrothermal fluids of granite-type uranium deposits; constraints from redox conditions. *Geological Review*, 57(2):193~206.
- Luo Jincheng, Hu Ruizhong, Fayek Mostafa, Li Chusi, Bi Xianwu, Abdu Yassir, Chen Youwei. 2015. In-situ SIMS uraninite U-Pb dating and genesis of the Xianshi granite-hosted uranium deposit, South China. *Ore Geology Reviews*, 65(4): 968~978.
- Luo Jincheng, Qi Youqiang, Wang Lianxun, Chen Youwei, Tian Jianji, Shi Shaohua. 2019&. Ar-Ar dating of mafic dykes from the Xiazhuang uranium ore field in northern Guangdong, South China: a reevaluation of the role of mafic dyke in uranium mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9):2660~2678.
- Neiva A M R, Carvalho P C S, Antunes I M H R. 2014. Contaminated water, stream sediments and soils close to the abandoned Pinhal do Souto uranium mine, Central Portugal. *Journal of Geochemical Exploration*, 136: 102~117.
- Nie Bin, Zhang Wanliang. 2018&. Ar-Ar age of the diabase and its relationship with uranium mineralization in Huangsha mining district, southern Jiangxi Province. *Mineral Resources and Geology*, 32(3):390~396.
- Pan Yongzheng. 1987#. The regional metallogenic essential factor of the granite-type uranium deposits in Guangdong Province. *China Nuclear Science and Technology Report*, (S1):1~16.
- Pan Yongzheng, Zhang Jianxin. 1994&. Discussion on the extensional tectonics and uranium metallogenesis in the southern part of Zhuguang massif. *Uranium Geology*, 10(3):138~143.
- Qi Jiaming, Huang Guolong, Zhu Ba, Fu Shuncheng, Xu You, Ye Songxin. 2014&. Compositions study of auxiliary minerals in altered granitic rocks of the Mianhuakeng uranium deposit in northern

- Guangdong. *Acta Geologica Sinica*, 88(9):1691~1704.
- Qi Jiaming, Zhu Ba, Wu Jianyong, Cao Haojie, Liu Wenquan, Xu Zhengqi. 2019&. The evolution of ore-forming fluid and its constraint on mineralization process in Mianhuakeng uranium deposit, northern Guangdong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9):2711~2726.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the Continental Crust. In: Rudnick, Roberta L. (Ed.), *Treatise on Geochemistry*. 3 Executive Editors: Heinrich D. Holland and Karl K. Turekian. 659:1~64.
- Shu L S, Zhou X M, Deng P, Wang B, Jiang S Y, Yu J H, Zhao X X. 2009. Mesozoic tectonic evolution of the Southeast China block: New insights from basin analysis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34:376~391.
- Shu Liangshu, Deng Ping, Wang Bin, Tan Zhengzhong, Yu Xinqi, Sun Yan. 2004a&. Constraints of petrochemistry, kinematics and geochronology on the evolution of Late Mesozoic basins and mountains in Nanxiong—Zhuguang area. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 34(1):1~13.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, Yu Xinqi, Wang Bin, Zu Fuping. 2004b&. Geological features and tectonic evolution of Meso—Cenozoic basins in southeastern China. *Geological Bulletin of China*, 23(9~10):876~884.
- Shu Liangshu. 2012&. An analysis of principal features of tectonic evolution in south China block. *Geological Bulletin of China*, 31(7):23~41.
- Sun Liqiang. 2018&. Petrogenesis of the Mesozoic granites in the Zhuguangshan area in the Nanling region and their implications for the uranium mineralization. Instructor: Ling Hongfei. Nanjing: Doctoral thesis of Nanjing University:1~179.
- Tao Yi. 2020&. Study on redox conditions of uranium mineralization in Mianhuakkeng deposit, Zhuguang area, northern Guangdong. Instructor: Lin Jingrong. Beijing: Master thesis of Beijing Research Institute of Uranium Geology:1~108.
- Taboada T, Martínez A C, García C, García-Rodeja E. 2006. Uranium and thorium in weathering and pedogenetic profiles developed on granitic rocks from NW Spain. *Science of The Total Environment*, 356(1~3):192~206.
- Wang Jun, Lai Zhongxin, Zhang Huiren, Tang Shikai, Yang Kunguang. 2011&. Cenozoic tectonic evolution and its influence on uranium ore-forming processes in the Xiazhuang ore field, Northern Guangdong Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(3):355~363.
- Wang Xiangli, Johnson M. Thomas, Lundstrom C. Craig. 2015. Low temperature equilibrium isotope fractionation and isotope exchange kinetics between U(IV) and U(VI). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 158:262~275.
- Wang Zhengqing, Guan Taiyang, Lin Ziyu, Feng Zhigang, Xie Yanshi, Chen Liang. 2013&. Driving mechanism of structure—magmatic activity and uranium mineralization of Mesozoic and Cenozoic, south China. *Journal of East China Institute of Technology (Nature Science)*, 36(4):349~356.
- Wang Yuhao. 2017&. Structural evolution of Nanxiong basin, north Guangdong and the impact to development of red bed landform. Instructor: Niu Shuyin. Shijiazhuang: Master Thesis of Hebei Geo University.
- Wu Guangying, Ma Tieqiu, Feng Yanfang, Yan Quanren, Liu Fuguo, Bai Daoyuan. 2008&. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Caledonian Wanyangshan granite in the Nanling Mountains, South China. *Geology in China*, 35(3):608~617.
- Wu Lieqin, Tan Zhengzhong, Liu Ruzhou, Huang Guolong. 2003&. Discussion on uranium ore-formation age in Xiazhuang ore-field, northern Guangdong. *Uranium Geology*, 19(1):28~33.
- Xu Wenxiong, Tan Zhongyin, Luo Chunwu, Xu Lili, Huang Guolong. 2014&. Geochemical characteristic and ore-forming geological significance of fine crystalline granite in Mianhuakeng uranium deposit, northern Guangdong. *Uranium Geology*, 30(6):345~355.
- Yang Shanghai. 2010&. Research of the structural evolution and its action on uranium mineralization of Nanxiong fracture belt, southern China. *Uranium Geology*, 26(5):257~263.
- Yu Hang, Cai Yuqi, Li Weilin, Huang Guolong, Pang Yaqing, Jiang Weibing, Zhuang Chuang. 2017&. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the fine-grained granites in Gaoping area, south Zhuang mountains and their geological significances. *Geological Review*, 63(3):781~792.
- Yu Xinqi, Wu Ganguo, Zhang Da, Di Yongjun, Zhang Wenshuan, Zhang Xiangxin, Wang Qunfeng. 2005#. Research Progress on Mesozoic tectonic regime transformation in southeastern China. *Progress in Natural Science*, 15(10):1167~1174.
- Yu Yushuai, Dai Pingyu, Guo Fusheng, Xie Xiaozhan, Bao Bo. 2017&. Genesis and age of Fuxi granodiorite, southern Zhuguang Mountain, Northern Guangdong Province: constrain from mineralogy chemistry, geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating. *Geological Science and Technology Information*, 36(6):71~82.
- Zhan Ligui, Zhu Minqiang, Qi Jiaming, Shen Tao, Xu Kuaiping. 2015&. Diabase dikes in southern Zhuguang granitic batholith: its characteristics and relationship with uranium mineralization. *Science Technology and Engineering*, 15(19):1~9.
- Zhang Chuang, Cai Yuqi, Dong Qian, Xu Hao, He Sheng. 2019. Genesis of the South Zhuguang uranium ore field, South China: Fluid inclusion and H—C—O—S—Sr isotopic constraints. *Applied Geochemistry*, 100:104~120.
- Zhuang Chuang, Cai Yuqi, Xu Hao, Liu Jialin. 2016&. Mineralization mechanism of 302 uranium deposit, north Guangdong Province: evidence from fluid inclusions. *Journal of East China University of Technology*, 39(2):156~164.
- Zhang Guoquan, Hu Ruizhong, Shang Pengqiang, Liu Lei, Yang Shefeng. 2007&. An overview on the ore-forming mechanism of the granite-type uranium deposit in South China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(4):399~404.
- Zhang Guoquan, Hu Ruizhong, Shang Pengqiang, Tian Jianji, Shuang Yan. 2008&. Study on the C—O isotopic composition of calcites and metallogenic dynamics background in the No. 302 uranium deposit. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(4):413~420.
- Zhang Long, Chen Zhenyu, Li Xiaofeng, Li Shengrong Santosh M., Huang Guolong. 2018. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of granites in the Zhuguangshan complex, South China: Implications for uranium mineralization. *Lithos*, 308~309:19~33.
- Zhang Long, Chen Zhenyu, Tian Zejin, Huang Guolong. 2016&. The application of electron microprobe dating method on uranium minerals in Changjiang granite, northern Guangdong. *Rock and Mineral Analysis*, 35(1):98~107.
- Zhang L, Chen Z Y, Li S R, Huang G L. 2018&. Characteristics of uranium minerals in wall-rock alteration zones of the Mianhuakeng (No. 302) uranium deposit, northern Guangdong, South China.

Acta Petrologica Sinica, 34(9):2657~2670.

Zhang Minglin, Guan Taiyang, Lin Ziyu, Liu Jianjun. 2009&. Geochemical characteristics of the Nanxiong fault zone and their relationship with uranium mineralization. Journal of East China institute of Technology, 32(2):12~17.

Zhang Ke, Yan Yapeng, Lai Zhongxin, Lu Yingxin. 2011&. Tectonic characteristics of the Xiazhuang uranium orefield and its hydrothermal uranium mineralization. Earth Science Frontiers, 18(1):118~125.

Zhang Weimeng, Yan Jie, Zhong Fujun, Pan Jiayong, Liu Wenquan, Lai Jing, Zhou Tangbo. 2019&. In situ LA-ICP-MS U-Pb dating of uranium from the Shijiaowei granite-type uranium deposit, northern Guangdong province. Rock and Mineral Analysis, 38(4):449~460.

Zhao Ruyi, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Leng Chengbiao, Qin Jinhua, Zhao Chenhui. 2020&. The geological characteristics, metallogeny and all-position mineralization model of uranium in the Nanling metallogenic belt. Acta Geologica Sinica, 94(1):1~12.

Zhong Fujun, Yan Jie, Xia Fei, Pan Jiayong, Liu Wenquan, Lai Jing, Zhao Qifeng. 2019&. In-situ U-Pb isotope geochronology of uranium for Changjiang granite-type uranium ore-field in northern Guangdong, China; implications for uranium mineralization. Acta Petrologica Sinica, 35(9):2727~2744.

Zhou Hangbing, Pan Jiayong, Zhong Fujun, Qi Jiaming, Han Shanchu. 2018&. Genesis of fine grained biotite granite in the Changjiang uranium ore field, northern Guangdong of China, and its relation with uranium mineralization. J Mineral Petrol, 38(3):10~19.

Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen, Weizhou, Shu Liangshu, Niu Yaoling. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. Episodes, 29(1):26~33.

Zou Dongfeng, Li Fanglin, Zhang Shuang, Huang Bin, Zong Keqing. 201&1. Timing of No. 335 ore deposit in Xiazhuang uranium orefield, northern Guangdong Province; evidence from LA-ICP-MS U-Pb dating of pitchblende. Mineral Deposits, 30(5):912~922.

Discussion on the basin—granites coupling metallogenic process and dynamics of the granite-related uranium deposits in northern Guangdong

QI Jiaming¹⁾, LIU Bin¹⁾, LIU Wenquan¹⁾, YE Yongqin¹⁾, XU Zhengqi²⁾

1) Research Institute No. 290, China National Nuclear Corporation, Shaoguan, Guangdong, 512029

2) School of Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059

Objectives: Northern Guangdong is an important granite-related uranium ore concentration area in China, for a long time, the huge time difference between granites and uranium ores has led to the ambiguity of uranium metallogenic dynamics, and the genesis of uranium deposits has multiple hypothesis.

Methods: On the basis of the research progress of uranium deposits in northern Guangdong, this paper aims at the unique basin—mountain system formed since Mesozoic—Cenozoic and the internal genesis of uranium deposits in this area, Combing the multiple compressional—extensional coupling evolution process and uranium metallogenic dynamics of rock mass-faulted basin from a unique perspective.

Results: it is considered that hydrothermal uranium deposits in the area have the characteristics of "non-orogenic" mineralization characteristics, and their metallogenic process is controlled by the combination of remelting uranium-rich granite and deep-source fault activity in NE-trending faulted zone. Neither granite magma activity nor regional fault depression activity can lead to independent mineralization. At the same time, it is considered that the deep-source fault depression marked by NE-trending Nanxiong fault basin in 95 Ma period is the main driving force of uranium mineralization, and the late vein magma does not directly participate in mineralization. However, it plays an important role in the activation and precipitation of uranium.

Conclusions: Uranium ore-forming fluid comes from the mixture of early compressional fracture toughness metamorphic thermal fluid and later tensional fracture meteoric water in the deep part of rock mass. Ore-forming fluid is easily mineralized at NW, NNW faults clamped by NE-trending fault zone and unconformity interface of red basin basement. Therefore, it is an important prospecting direction.

Keywords: Granite-related uranium deposit; Basin—granite coupling; Metallogenic dynamics; North Guangdong

Acknowledgements: This study was provided by National Key R&D Program of China (No.

2017YFC06026), Bureau of Geology of the Chinese National Nuclear Corporation (Nos. 202035-6, 202140-2), Joint Foundation between China National Uranium Co. Ltd and East China University of Technology (No. NRE2021-05), Special Foundation of Science and Technology of Guangdong Province (No. 201112166271152) and Science and Technology Planning Program of Shaoguan City (No. 200624094530179)

First author: QI Jiaming, male, born in 1987, senior engineer, engaged in uranium geology research; Email: jiaming_qi@126.com

Corresponding author: LIU Bin, male, born in 1991, engineer, engaged in uranium geology research; Email: 13951651882@163.com

Manuscript received on: 2021-05-14; Accepted on: 2021-12-31; Network published on: 2022-01-20
Doi: 10.16509/j.georeview.2022.01.065 **Edited by:** ZHANG Yuxu

