

铀成矿与红层盆地关系再讨论

——以湘赣边界鹿井铀矿田为例

陈柏林

中国地质科学院地质力学研究所,北京,100081



内容提要:鹿井铀矿田是我国华南地区最重要的硬岩型铀矿田之一,矿田内铀矿床围绕丰州盆地分布,红层盆地与铀成矿的关系已经讨论并争议了近40年。本文开展了铀矿带与丰州盆地红层盖层相关性研究,结合鹿井矿田隆升剥露历史和南雄盆地北缘断裂变形特点,认为丰州盆地是晚白垩世—古近纪红层盆地底部沉积的残留,是一个规模大很多的红层盆地的一小部分,其上有约1.5~2.5 km厚的红层沉积物已经被剥蚀了。铀成矿与红层盆地没有必然的成因关系,热液型铀矿床早期成矿作用发生于红层盆地形成之前,成矿后在约95~75 Ma被抬升剥露至地表;然后被红层盆地覆盖保存,至65~55 Ma被埋藏至最深(约1.5~2.5 km);约55~45 Ma再次被隆升剥露降温,至40 Ma左右已至近地表常温状态,40 Ma以来一直稳定在近地表常温状态。而遂川断裂NW侧在约15 Ma的中新世中期才开始快速隆升剥露,北西盘比南东盘隆升幅度更大,反映了遂川断裂的左行走滑特征,该断裂与热水断裂的叠接带以拉分盆地性质减缓隆升剥露幅度,才得以保存现有的丰州盆地。丰州盆地对早于盆地沉积所形成的铀矿床起到了保矿作用。因此,其找矿方向是除了丰州盆地周边以外,丰州盆地底下是铀矿找矿的非常有利区段,极大地拓宽了鹿井铀矿田的找矿空间。

关键词:铀成矿;丰州盆地;隆升剥露历史;保矿构造;找矿方向;鹿井铀矿田

鹿井铀矿田位于江西省赣州市崇义县西南部与湖南省郴州市汝城县东部相邻区域,是我国华南地区最重要的硬岩型铀矿田之一,也是诸广铀矿集中区内铀矿床开发最早的矿田之一。在鹿井铀矿田内,铀矿床围绕丰州盆地分布。断陷红盆与铀成矿的关系已经讨论了近40年,20世纪80年代,华南断陷红盆与铀成矿具有空间上相伴的关系就引发了学者们的关注,刘义发等(1986)强调红盆形成时干热古气候对铀成矿作用的影响;陈祖伊等(1983)认为红盆底部不整合界面控矿;陈功等(1983)强调红盆反映的拉张断陷和伸展作用对铀成矿作用的重要性;陈跃辉等(1997)比较系统地总结了断陷红盆与热液铀矿的关系;李子颖等(1999)则从地幔柱作用的“热点”角度分析断陷红盆与热液铀矿的关系。胡瑞忠(1989,1990,1993,1994,2004,2007)则从华南花岗岩型铀矿床成矿热液中CO₂来源研究方面强调CO₂的深源特点;温志坚等(1999)指出相山铀矿成矿与地幔流体有关;杜乐天等(2001,2011)将其总结为幔汁成矿作用;林锦荣等(2016)在讨论热

液铀矿床的控制因素中,将红盆沉积作为热液铀矿床定位的最主要控制因素之一,认为断陷红盆与热液铀矿都是在地壳拉张环境下区域性深源断裂构造强烈断陷作用的产物,两者关系的实质是控盆深源断裂构造与铀成矿的关系。但张万良(2011)认为丰州盆地与铀矿床的关系是控制铀矿床的保存。本文以湘赣边界的鹿井铀矿田为例,从铀矿带的展布特点与丰州盆地的红层盖层相关性研究入手,同时结合同位素来源的讨论、鹿井矿田主要铀矿床的最新十几年勘查成果以及南雄盆地北缘低角度断裂的特征,重新梳理了红盆与铀成矿的时空与成因关系,认为“铀成矿与红层盆地没有必然的成因关系,早期铀成矿早于红盆沉积”,鹿井铀矿田的丰州红层盆地对铀矿床起到保护作用。

1 区域构造背景

1.1 大地构造背景

鹿井铀矿田位于湘粤赣交界的诸广南部岩体中北部,在行政区上属于湖南省汝城县与江西省崇义

注:本文为国家重点研发资助项目(编号:2017YFC0602602,2016YFC0600207)的成果。

收稿日期:2024-01-01;改回日期:2024-06-28;网络首发:2024-07-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.055

作者简介:陈柏林,男,1962年生,研究员,博导,主要从事区域构造、矿田构造和找矿预测研究;Email: cblh6299@263.net。

县交界部位。大地构造位置上处于扬子板块与和华南板块缝合线(NEE 向钦杭构造带)的南侧,华夏地块中部(图 1a, Hu Ruizhong et al., 2008);也地处南岭纬向构造带与新华夏第二隆起带的交汇部位。在中国东部中—新生代陆缘弧盆系构造图上属于华南弧盆系的东南沿海内带岩浆弧区,其东侧为东南沿海外带岩浆弧区,西侧为江南(雪峰)基底逆推带南段和湘东拉分盆地群。区域构造受九峰—大余 EW 向隆起带、万洋—诸广 SN 向隆起带和万长山 NE 向隆起带的三重控制(黄国龙等,2006)。在区域成矿带上属于赣杭火山岩成矿带南侧的赣中南—粤北花岗岩成矿带内的桃山—诸广花岗岩型铀成矿带的南段(杨明桂等,2009)(图 1a)。

1.2 区域地质概况

诸广铀矿集中区位于湘粤赣毗邻的诸广山地区,诸广山复式岩体的中南部。诸广山复式岩体由印支期、燕山早期花岗岩为主组成,少量露出燕山晚期和古生代岩体。复式岩体外侧露出泥盆系—石炭系碳酸盐岩和震旦系—寒武系浅变质碎屑岩。断裂构造为 NE 向和 NNE 向,属于区域性遂川—热水断

裂的组成部分(图 1b)。矿集区由鹿井、城口、长江、百顺、澜河和全安 6 个铀矿田及热水、三九地区零散铀矿床(点)组成(图 1b)(董恒达等,2015;钟福军等,2019)。

2 鹿井铀矿田地质概况

鹿井铀矿田位于诸广铀矿集中区北部,是诸广山地区勘查和开发铀矿资源最早的地区之一。矿田内出露中生代中酸性侵入岩、震旦系—奥陶系浅变质碎屑岩及晚中生代红盆沉积。铀矿化受区域性遂川—热水断裂带的低序次走滑断裂及更低序次断裂裂隙构造控制。该矿田是诸广矿集区内铀矿床最集中的地区之一,在 200 km² 范围内,发育了鹿井大型铀矿床(322)和沙坝子(327)、高昔(326)、黄峰岭(325)3 个中型铀矿床及牛尾岭(324)、洞房子(328)等众多小型铀矿床及矿点(图 2)(董恒达等,2015)。

2.1 地层特征

鹿井铀矿田出露的地层可以分为两个构造层,下部是震旦系—奥陶系浅变质碎屑岩,上部是上白

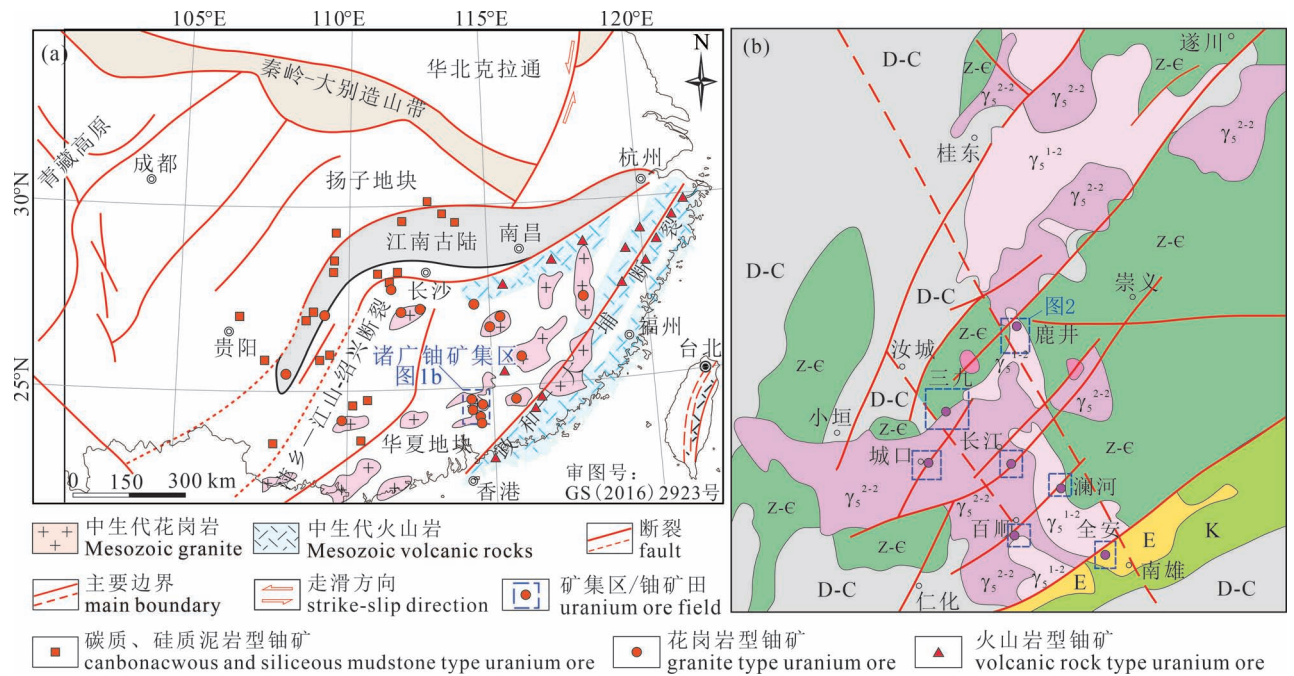


图 1 鹿井铀矿田大地构造(a)(据 Hu Ruizhong et al., 2008)和鹿井铀矿田外围区域构造图(b)(据董恒达等,2015 修编)

Fig. 1 Tectonic map(a) (revised from Hu Ruizhong et al., 2008) and regional geological map of the Lujing uranium orefield(b) (revised from Dong Hengda et al., 2015#)

E—古近系;K—白垩系;D—C—泥盆系—石炭系;Z—E—震旦系—寒武系; γ_s^{2-3} —燕山早期晚阶段花岗岩;

γ_s^{2-2} —燕山早期早阶段花岗岩; $\eta\gamma_s^{1-2}$ —印支中期二长花岗岩

E—Paleogene; K—Cretaceous; D—C—Devonian—Carboniferous; Z—E—Sinian—Cambrian; γ_s^{2-3} —late stage granite

of early Yanshanian; γ_s^{2-2} —early stage granite of early Yanshanian; $\eta\gamma_s^{1-2}$ — middle Indosinian monzonitic granite

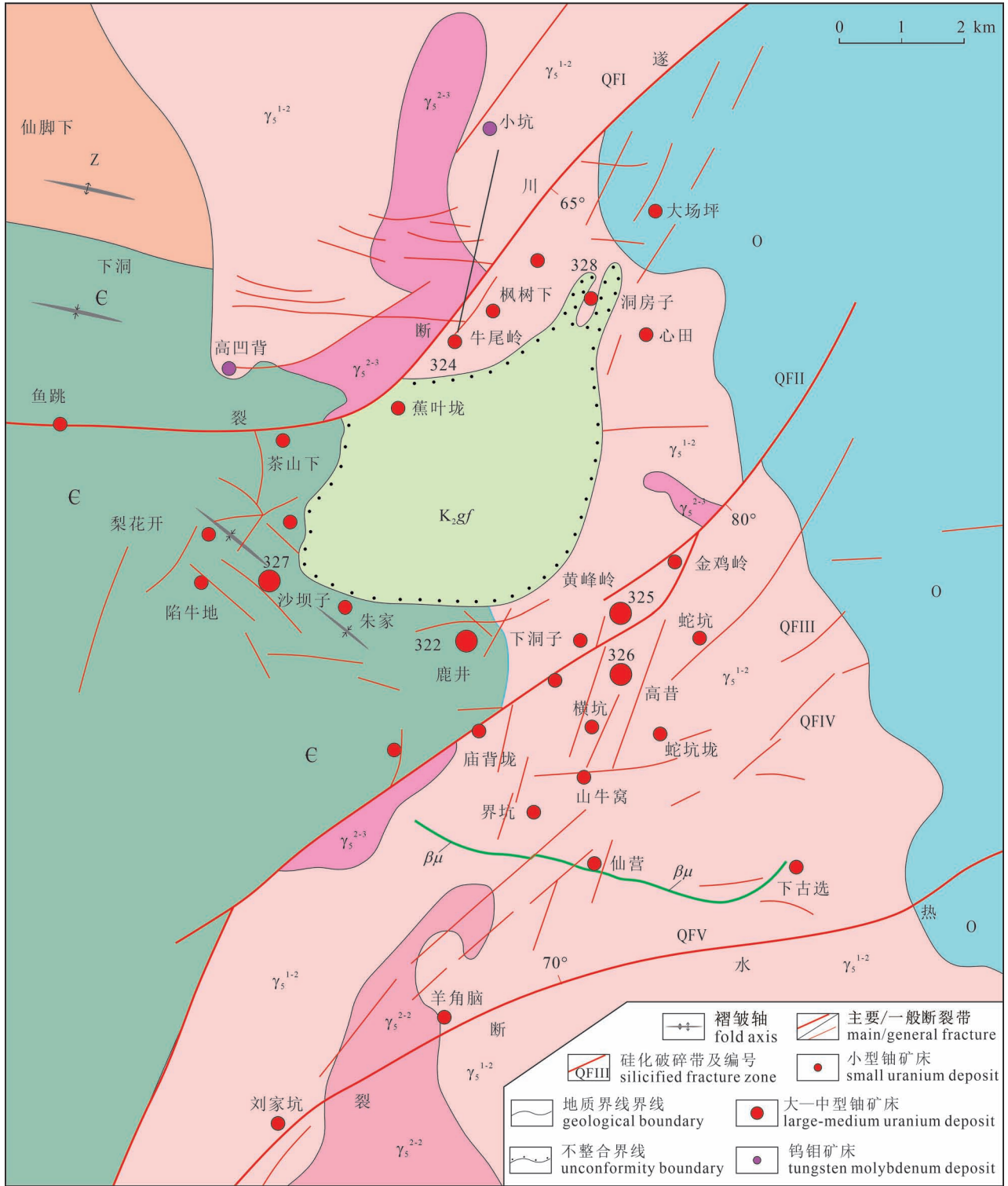


图 2 鹿井铀矿田地质构造图(据董恒达等,2015 修改)

Fig. 2 Geological structure map of Lujiing uranium ore field (modified from Dong Hengda et al. , 2015&)

K_2gf —上白垩统龟峰群;O—奥陶系;E—寒武系;Z—震旦系; γ_5^{2-3} —燕山早期第 3 阶段细粒少斑黑云母花岗岩;
 γ_5^{2-2} —燕山早期第 2 阶段中粒二云母花岗岩; γ_5^{1-2} —印支中期中粗粒斑状黑云母花岗岩; $\beta\mu$ —辉绿岩脉

K_2gf —Guifeng Group of Upper Cretaceous;O—Ordovician;E—Cambrian;Z—Sinian; γ_5^{2-3} —Fine-grained pegmatite biotite granites of third stage of Early Yanshanian; γ_5^{2-2} — Medium- grained dimicite granites of second stage of Early Yanshanian; γ_5^{1-2} —Middle Indosinian medium-coarse speckled biotite granite; $\beta\mu$ —diabase vein

巫统红层沉积。

(1)震旦系(Z):为矿田内出露时代最老的地层,主要为一套浅变质碎屑岩。下部为浅变质细粒石英砂岩夹板岩、砂质板岩,变余长石石英砂岩夹千枚岩及板岩;中部为浅变质细粒、中细粒石英砂岩、长石石英砂岩夹板岩、砂质板岩、含凝灰质砂岩;上部为浅变质细粒、中细粒石英砂岩、长石石英砂岩夹板岩、砂质板岩等。矿田内出露较局限,仅在西北角的下洞以北、仙脚下一带。下洞—仙脚下一带震旦系与寒武系构成北西西向褶皱构造(图2)。岩石普遍遭受区域低绿片岩相变质作用。面理置换彻底,原始层理难以辨认,局部可见变余砂状构造。

(2)寒武系(C):为矿田内出露时代较老的地层,主要为一套浅变质碎屑岩。下部为变质砂岩夹炭质板岩、含炭变质砂岩互层,以及中厚层状变质砂岩、绢云母板岩互层,局部夹薄层状千枚岩;中部变质砂岩、粉砂岩互层夹黑色炭泥质条带,变质砂岩夹薄层状板岩,绢云母板岩与变质粉砂岩互层;上部灰绿色变质细粒长石石英砂岩夹板岩、绿色板状泥质页岩。矿田内出露较多,主要在矿田西部的下洞以南、鱼跳、罗西坑一带。寒武系浅变质碎屑岩多构成北西西向褶皱构造(图2)。

(3)奥陶系(O):为矿田内出露时代较新的浅变质碎屑岩系。下部为板岩、砂岩、炭质板岩、泥质炭质页岩;中部石英粉砂岩、泥质页岩、硅质岩;上部条带状板岩、含炭细晶灰岩、黑云母千枚岩、变余长石石英砂岩、大理岩化灰岩。主要在矿田东部的心田、下古选以东一带。奥陶系浅变质碎屑岩产状比较复杂,多构成近南北向、北北东向褶皱,局部近东西向褶皱(图2)。

(4)上白巫统龟峰群(K_2gf):仅发育于丰州盆地,是一套陆相红层沉积(图2)。下部棕红色花岗质砂砾岩、砾岩、粗砂岩、中细粒长石砂岩、粉砂岩;中部砾岩、砂砾岩、粗砂岩、含砾中粗粒长石砂岩、中细粒长石砂岩、粉砂质泥岩;上部砂砾岩、砾岩、含砾粗砂岩、中细粒长石砂岩。

2.2 矿田岩浆侵入岩特征

鹿井铀矿田岩浆侵入岩以中酸性侵入岩为特色,另有少量基性岩脉。中酸性侵入岩按侵入时代分为印支中期、燕山早期第二阶段和燕山早期第三阶段。

(1)印支中期黑云母二长花岗岩($\eta\gamma_5^{1-2}$):是鹿井铀矿田出露面积最多的岩浆侵入岩类型。分属古亭岩体和乐洞岩体北部、大窝子岩体北部(也称为

热水—文英岩体),岩性为灰白色、弱肉红色中—中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩。岩体年龄 247 ± 2.2 Ma(张万良等,2018a)、 235.4 ± 2.2 Ma(韩娟等,2011)。具富硅、高铝、高钾等特征,为高钾钙碱性岩石系列,具有富集 Rb、K 等大离子亲石元素和 Th、U、Ta、Nb、Hf 高场强元素特征,为轻稀土较富集且轻重稀土分馏明显类型,形成于碰撞构造环境(张万良等,2018b);低 Hf 同位素组成反映其主要来源于地壳岩石的部分熔融(韩娟等,2011)。

(2)燕山早期第二阶段黑云母花岗岩(γ_5^{2-2}):在鹿井铀矿田出露有限,主要在南部的羊角脑矿床西侧及以南地区,侵位于印支中期二长花岗岩中(图2)。岩性为灰白色中粒斑状黑云母花岗岩。

(3)燕山早期第三阶段黑云母花岗岩(γ_5^{2-3}):在鹿井铀矿田出露有限,主要在中—北部的下茶园、蕉叶垅、金鸡岭附近、牛尾岭—枫树下一带及北侧地区,侵位于印支中期二长花岗岩中(图2)。岩性为灰白色细粒、中细粒斑状黑云母花岗岩。岩体年龄 155.2 Ma(吴俊奇等,1998)。从诸广铀矿集中区上对比,与长江铀矿田的长江岩体相当。

3 断陷红盆与铀成矿关系研究现状

对于断陷红盆与铀成矿的关系,经过众多学者近 40 年的研究,其认识主要体现在时间、空间和成因 3 个方面。认为在时间上断陷红盆与铀成矿阶段相吻合,空间上红盆控盆深源断裂构造在区域上控制了热液型铀矿田的空间定位,深源断裂构造的次级断裂带控制了铀矿床、矿体的空间定位;成因上,控盆深源断裂构造的断陷作用将深部基性岩浆、幔源流体与地壳及浅部沟通,从而诱发了热液铀成矿作用,控盆深源断裂构造为铀成矿流体提供流通、运移通道。

3.1 空间关系

华南中—新生代红盆与热液铀矿具有空间重叠性。从华南中—新生代红盆分布图可见(图3),铀矿区都有中—新生代红盆伴生,铀矿床在空间上都紧靠红盆边缘,在盆地基底中也发育铀矿脉,甚至直接产在红盆地层中,如南雄红盆中的中村东、暖水塘铀矿床,河源红盆中的黄子洞、牛牯寨铀矿床以及宁都红盆中的三槽岭、天子地铀矿床(夏宗强等,2016)。平面上距红盆的最大距离只有 10~20 km,一般都在 0~3.5 km(陈跃辉等,1997;张万良,2007),常见不同类型铀矿化沿同一条断裂—红盆带或围绕同一个红盆发育(陈祖伊等,1983)。

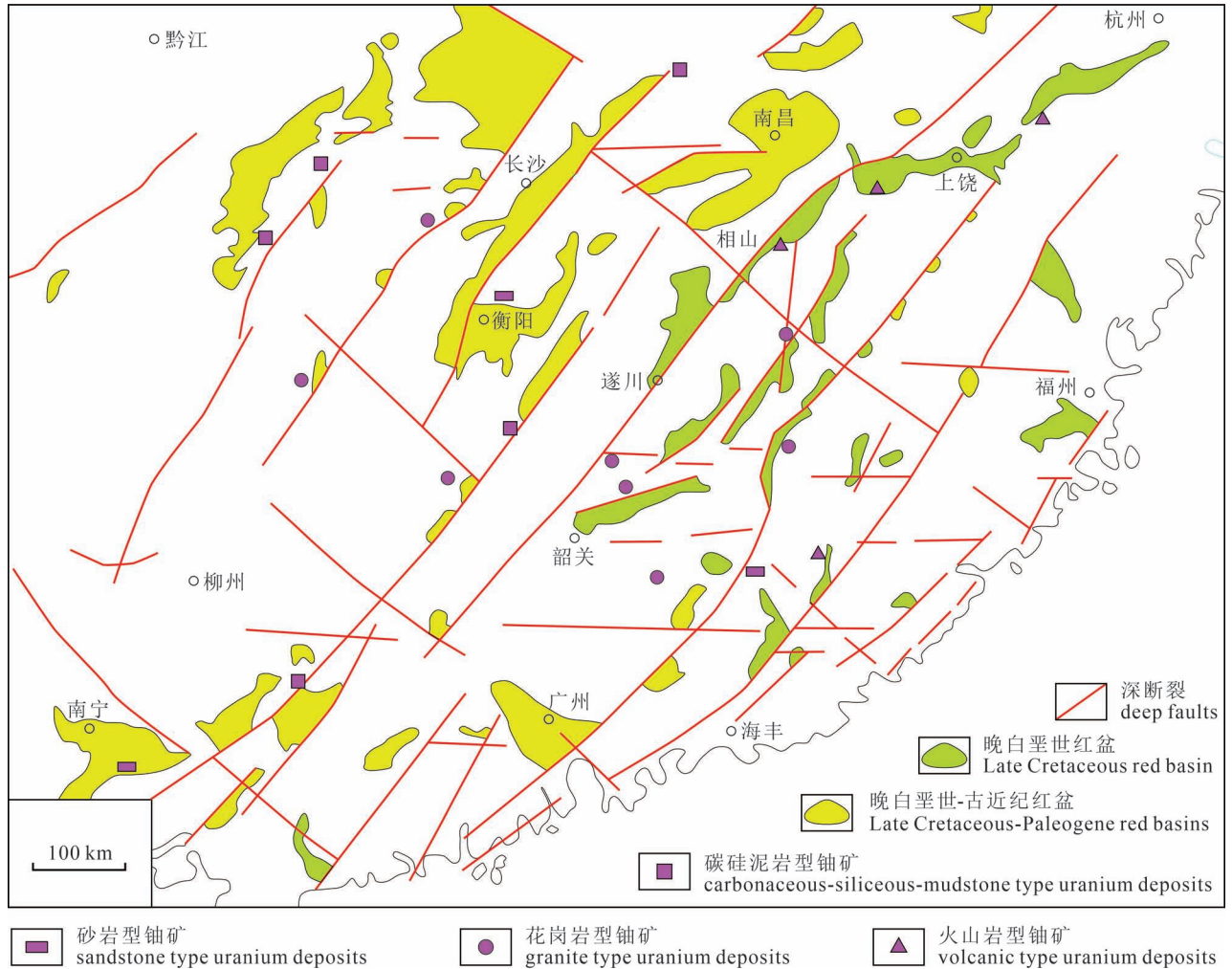


图 3 中国大陆东南部中—新生代红盆与铀矿分布示意图 (据陈跃辉,1997)

Fig. 3 Distribution of Mesozoic—Cenozoic red basins and uranium deposits in Southeastern China continental (from to Chen Yuehui, 1997&)

不同类型的铀矿床实际上是受伸展拆离的深大断裂统一控制的热液型铀矿床 (黄世杰,2006)。华南热液型铀矿田均分布在红盆控盆断裂带及附近次级构造带中 (图 3)。火山岩型铀矿田分布于红盆附近的火山盆地中,矿体受控盆断裂的次级断裂及其裂隙带控制,以赣杭火山岩型铀成矿带为例,沿赣杭构造带形成狭长的 NE 走向的中—新生代断陷红盆,一系列火山岩型铀矿床就分布于红盆附近的火山盆地中。花岗岩型铀矿床也分布于红盆附近,以粤北诸广—贵东地区的花岗岩型铀矿集中区为例,靠近控 (红) 盆深大断裂带的花岗岩体发育成群的基性岩脉 (煌斑岩脉、辉绿岩脉等),铀矿床就位于靠近控盆深大断裂带的次级断裂及其裂隙带中。在垂向空间上,红盆基底不整合面与深源断裂、晚期岩脉复合部位为铀成矿有利部位 (林锦荣等,2016),

基底不整合面拉张构造破碎带可形成产状平缓板状矿体,不整合面之下基底中则形成陡倾脉状矿体,红层中也形成受断裂控制的陡倾脉状矿体 (林锦荣等,2016)。

3.2 时间关系

华南热液型铀矿成矿时代可划分为 7 个阶段: 194~153 Ma、138~135 Ma、127~118 Ma、113~92 Ma、87~80 Ma、75~52 Ma、47~38 Ma,其中 113~92 Ma、87~80 Ma、75~52 Ma 3 个阶段为主成矿阶段,期间成矿强度明显更强。这 3 个热液铀矿主成矿阶段正好与华南红盆 3 个拉张断陷—接受沉积的阶段 (132~96 Ma、85~79 Ma、79~50 Ma) 相对应,在时间上高度重叠 (胡志华等,2022)。

认为华南红盆于早白垩世晚期发生断陷作用并开始接受沉积,经多次下沉接受沉积、抬升遭受剥蚀

等主要阶段,最终于古近纪末完全封闭。其中早白垩世晚期开始断陷接受沉积、晚白垩世早期强烈断陷形成断陷盆地、晚白垩世晚期开始再次断陷形成拗陷盆地等3个阶段为盆地主要成盆期,也是盆地3个强烈拉张伸展期(胡志华等,2022)。而华南热液铀成矿的3个主成矿期正好与红盆3个强烈拉张伸展、成盆期相对应,两者在时间上高度重合(李延河等,2016),具有时间重叠性。

我国典型火山岩型热液铀矿田——相山矿田铀成矿阶段与赣杭红盆带拉张—成盆时间基本一致,相山矿田早期碱性铀矿化(125.6~119.8 Ma,林锦荣等,2019)与早期断陷红盆阶段、晚期酸性铀矿化(100.0~86.7 Ma,林锦荣等,2019)与中期断陷盆地阶段时间相吻合(胡志华等,2022),最新发现的79.6~66.4 Ma的酸性硅化型铀矿化阶段(林锦荣等,2019)与晚期拗陷阶段重叠。华南热液铀矿主成矿期为113~52 Ma,而华南断陷红盆发育始于早白垩世晚期,在113~52 Ma期间为区域强烈伸展—拉张时期,为红盆主要成盆期(胡志华等,2022)。

3.3 成因关系

热液铀矿床多种地质特征和系列同位素特征显示幔源物质参与了铀成矿作用。热液型铀成矿流体具有幔源组分参与,部分成矿物质来源于地幔(胡瑞忠等,2004;李子颖等,2004,2014)。

李海东等(2015)认为热液型铀矿多种地质特征显示地幔物质参与铀成矿作用,如铀成矿时代接近或略晚于矿区发育的基性岩脉(辉绿岩、煌斑岩)成岩年龄,铀矿石通常伴生大量具有幔源性质的萤石、方解石和富磷矿物等,矿化蚀变岩石稀土元素特征指示成矿热液具有深源性。Li Zhiying等(2015)在花岗岩型铀矿床中发现零价态铀。胡志华等(2018)从钛铀矿稀土元素特征指示铀来自深部(幔源)。

一系列同位素地球化学特征也指示华南热液铀成矿有地幔物质参与。He—Ar同位素特征显示相山矿田、河草坑矿田、白面石矿田、下庄矿田的成矿流体中存在大量幔源稀有气体,指示铀成矿流体为壳幔混合来源(胡瑞忠等,2004;李子颖等,2004,2014;庞雅庆等,2019;林锦荣等,2016);与铀矿共生脉体包裹体碳同位素组成范围为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = -3.3\% \sim -8.6\%$,指示成矿流体中的碳具幔源碳特征(林锦荣等,2016);共生黄铁矿的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值(0.72258)介于辉绿岩(0.70518~0.70656)与花岗岩(0.71959~0.78374)之间,指示Sr以地幔来源为主(王正其等,2007;林锦荣等,2016)。幔源物质参

与铀成矿作用,需要以深部幔源岩浆作用为动力、以区域性控盆断裂带为上升通道、以伸展—拉张作用为垂向上升环境。

胡瑞忠等(2004)认为华南热液铀矿与中—新生代红盆具有时、空双重叠特征,显示两者很可能存在密切的成因联系。红盆和热液铀矿都是在拉张或岩石圈减薄的构造背景下形成的,岩石圈减薄事件致使控盆深断裂带发生断陷作用,从而导致红盆的形成,同时该事件诱发了深部基性岩浆、深源(碱性、酸性)流体上升、侵位,致使深部幔源物质与浅部地壳沟通。幔源流体携带深部物质和能量沿深断裂带上升,导致红盆及其周边较广泛的热液成矿活动,形成了热液型铀矿及其伴生的萤石、重晶石等矿产(杨明桂,2009)。深部幔源岩浆作用致使岩石圈伸展减薄,诱发了断陷红盆的加剧扩张和流体活动,控盆深源断裂的断陷作用沟通了深部热液、矿化剂和铀源,最终成矿物质上升至浅部地壳析出、富集成矿(林锦荣等,2016)。

多位学者强调红盆参与了热液铀成矿作用(漆富成等,2012;张宇龙等,2012;汪昌亮等,2016;黎广荣等,2019)。认为来自红层的碱性强氧化性卤水溶液淋滤富铀岩石形成富氧富铀溶液(李延河等,2016),当这种溶液沿控盆深断裂下渗过程中遇到上升岩浆水或者来自深部的高温还原性流体汇合时(黎广荣等,2019),或与基性岩脉相遇时,铀被还原、析出成矿(李延河等,2016;李欢,2018)。

林锦荣等(2016)和胡志华等(2022)分析铀成矿的控矿因素,认为华南中—新生代红盆与热液铀矿是在岩石圈减薄事件的构造背景下形成的,红盆参与了热液铀成矿作用,控盆深断裂带沟通了深部与浅地表,成为深部高温还原性含铀热液向上运移、浅部红层碱性强氧化性富铀卤水溶液向下运移的通道,两者混合,在流体物理化学条件急剧变化过程中,铀被析出、富集成矿。

纵观前人对铀成矿与红盆的关系研究,归纳起来有两方面,一方面都是基于铀矿床与红盆空间上的相邻关系,主要依据又是比较纯粹依据测年结果进行推断的;另一方面,认为铀成矿有深源流体参与,而红盆控盆断裂是深源断裂,因此铀成矿与红盆有成因关系。但是,对于鹿井铀矿田丰州红层盆地基底花岗岩中也发现铀矿脉的客观地质事实,却未能谈及。

4 鹿井矿田铀成矿与丰州盆地空间关系

鹿井铀矿田是诸广铀矿集中区最北侧的铀矿

田,位于江西省赣州市崇义县西部与湖南省郴州市汝城县东部交界部位,也是诸广铀矿集中区发现和开发比较早的铀矿田。铀矿田出露的岩浆岩有印支期乐洞岩体北部和古亭岩体中北部,围岩主要为寒武系浅变质碎屑岩。铀矿体受 NE 向断裂构造控制,并与硅化带伴生,至目前已经勘查的铀矿床有鹿井大型铀矿床,黄峰岭、高昔和沙坝子中型铀矿床,还有蕉叶垅、枫树下、牛尾岭、梨花开、洞房子、小山、下洞子、庙背垅、羊角脑小型铀矿床及众多铀矿点(图 2)。

4.1 平面关系

在平面上,鹿井铀矿田范围内宏观上看,几乎所有的铀矿床都围绕丰州盆地红层周边发育和分布,北侧有蕉叶垅、牛尾岭、枫树下、蔡家等铀矿床(点),东侧有洞房子、大场坪、心田等铀矿床(点),南侧有金鸡岭、黄峰岭、高昔、下洞子、庙背垅、鹿井等铀矿床(点),西侧有沙坝子、石灰窑、梨花开、龙头等铀矿床(点)(图 2)。这种空间关系给人的初步印象是丰州盆地(红层盆地)控矿,即目前比较流

行的红层盆地控盆断裂控制铀矿床的产出(林锦荣等,2016)。

但是,在矿田的东北部,特别是洞房子铀矿床附近,大比例尺地质填图表明,多处红层沉积呈半岛状、孤岛状覆盖在中三叠世黑云母二长花岗岩及其中的矿化蚀变带之上(图 2、图 4a)。在洞房子铀矿区,其南西侧为丰州盆地主体的北东侧边界,红层沉积与中三叠世花岗岩界线为不规则北西走向;矿区东侧为奥陶纪浅变质碎屑岩,与中三叠世花岗岩接触带界线为北西走向;呈 NE 走向的含矿构造(铀矿化带),其北东端延伸至大场坪、九岭洞一带,穿越岩体接触带,进入浅变质碎屑岩中;其南西端在洞房子铀矿床的南西侧被红层不整合覆盖(图 2、图 4a)。

在牛尾岭铀矿床,矿区南部出露红层沉积;中部和东北部为二长花岗岩,局部有较小的孤岛状红层出露;西北部为寒武纪浅变质碎屑岩,寒武纪浅变质碎屑岩与二长花岗岩以 QF_1 硅化断裂带为界呈断裂接触关系,红层沉积与花岗岩呈不整合接触关系。含矿构造和矿体呈 NE 走向,矿区中部和东北部发

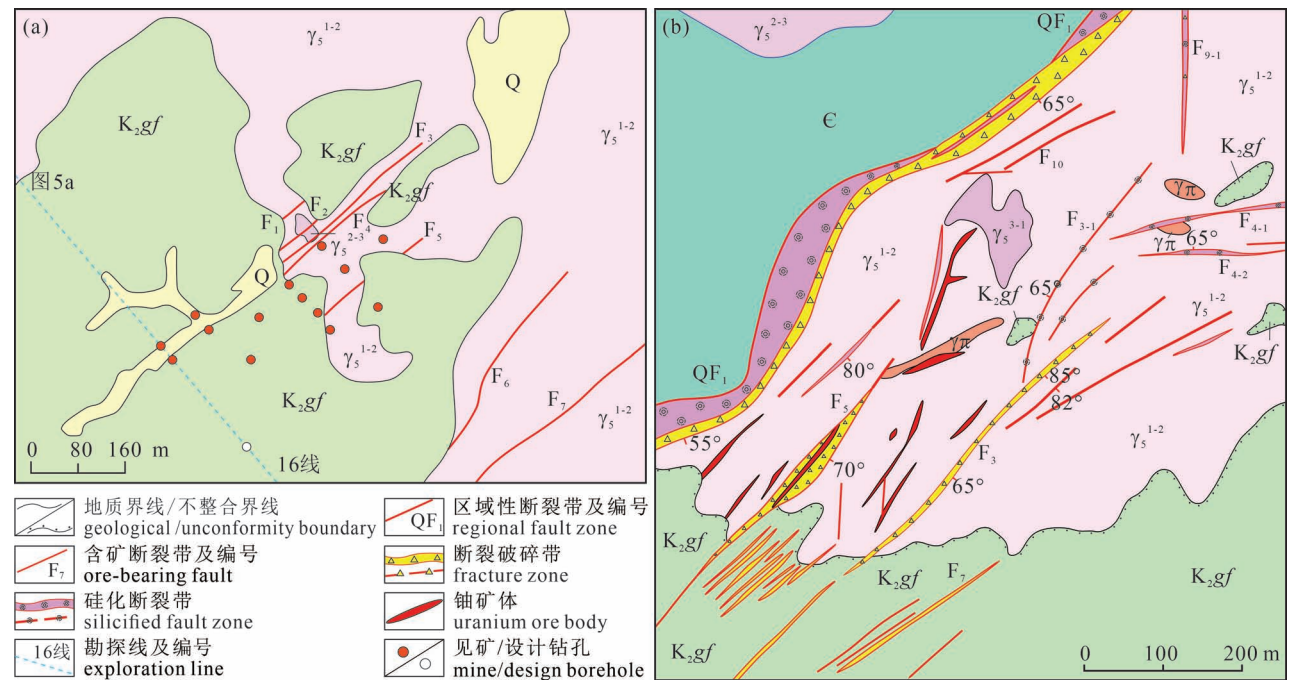


图 4 鹿井矿田洞房子铀矿床(a)(据刘春月,2019 修编)和牛尾岭铀矿床(b)(据黄龙,2017 修编)地质略图
Fig. 4 Geological sketch of the Dongfangzi uranium deposit (a) (modified after Liu Chunyue, 2019&) and Niuweiling uranium deposit (b) (modified after Huang Long, 2017#), Lujing ore field

K_2gf —上白垩统龟峰群; ϵ —寒武系; γ_5^{3-1} —燕山晚期第一阶段细粒花岗岩; γ_5^{2-3} —燕山早期第三阶段细粒
少斑黑云母花岗岩; γ_5^{1-2} —印支中期中粗粒黑云母花岗岩; $\gamma\pi$ —花岗岩斑岩

K_2gf —Guifeng Group of Upper Cretaceous; ϵ —Cambrian; γ_5^{3-1} —fine-grained granite of first stage of late Yanshanian; γ_5^{2-3} —fine-grained oligoporphyry biotite granite of third stage of early Yanshanian; γ_5^{1-2} —middle Indosinian medium-to-coarse-grained biotite granite, $\gamma\pi$ —granite porphyry

育于花岗岩中,矿区西南部含矿构造和铀矿体延伸到红层沉积物之下(图4b)。

4.2 剖面关系

在鹿井铀矿田东北部的洞房子铀矿床、西北部的蕉叶垌铀矿床、牛尾岭铀矿床、枫树下铀矿床,现有勘查资料显示,在红层沉积(不整合面)之下都发现了铀矿体,尤其以洞房子、蕉叶垌铀矿区最为典型(图4、图5)。

在洞房子铀矿床的16线地质剖面(剖面方向 140°),从半岛状红层之上施工的ZK16-2和ZK16-5钻孔穿过不整合面,进入印支中期似斑状中粗粒花岗岩中控制到2层铀矿体(图5a)。物探资料显示,在已控制的铀矿体沿勘探线 140° 方向250~400m处具有良好异常,设计了ZK2钻孔(图5a)。同时,沿矿带走向西南方向200m的32线的红层覆盖区,物探资料显示,红层覆盖层之下花岗岩中异常明显,是铀矿床非常有利的找矿区段(刘春月,2019)。

在蕉叶垌铀矿区的16勘探线剖面(剖面方向 140°),从 QF_1 上盘的红层之上施工了ZK16-1(孔深734.68m)、ZK16-2(孔深814.80m)和ZK16-3(孔深901.19m),分别于约140m、110m、100m穿透红层,控制到了红层之下的印支期花岗岩及发育于花岗岩中的含矿构造破碎带(包括 QF_1 及其上盘的次级断裂裂隙构造),其中ZK16-2在约510m、680m和730m处发现了铀矿体(图5b),ZK16-3在约620m、630m、680m、690m、710m、720m、740m、820m和890m处发现了铀矿体,其中740m和890m处为较厚铀矿体,厚度达3.27m和1.93m(图5b)(黄龙,2017)。

在蕉叶垌铀矿区的75勘探线剖面(剖面方向 140°),从 QF_1 上盘的红层之上施工了ZK75-1(孔深854.33m)和ZK75-2(孔深817.15m),分别于约120m、170m穿透红层,控制到了红层之下的印支期花岗岩及发育于花岗岩中的含矿构造破碎带(包括 QF_1 及其上盘的次级断裂裂隙构造),其中ZK75-2在约370m处发现了铀矿体(图5c)(李嘉等,2019)。

此外,在竹子坑矿点等有零星发育于红层中铀矿化,区域上在粤北南雄盆地、赣东信江盆地也有类似的铀矿化,但是这些很可能是属于另一种与硬岩型(花岗岩型)完全不同的铀矿化形式——砂岩型铀矿化。

5 鹿井矿田铀成矿与丰州盆地成因关系

前人对于红层沉积与铀成矿成因关系分析的逻

辑是这样的:铀矿成矿流体具有部分幔源(深源)特征,红盆控盆断裂是深断裂,所以,深源成矿流体应该是通过控盆深断裂上升至浅表的,因此铀成矿与红盆具有成因联系。其中两个关键点是成矿流体深源性、控盆断裂是深断裂。对此,我们进行讨论。

5.1 铀矿成矿流体不一定深源

对于华南花岗岩型铀矿床成矿热液中 CO_2 来源的研究,最早始于胡瑞忠(1989)“XW铀矿床成矿机理”一文和胡瑞忠等(1990)“花岗岩型铀矿床一种可能的成矿模式”,随后胡瑞忠(1993)在“华南花岗岩型铀矿床成矿热液中 CO_2 来源研究”中作了比较系统论述。之后胡瑞忠(1994,2004,2007)作了进一步补充和强调。对于铀成矿流体的来源问题,杜乐天等(2001,2011)将其总结为幔汁成矿作用,李子颖(1999)和赵军红等(2001)则将地幔柱与铀成矿联系起来。

确定 CO_2 来源主要从成矿热液的碳同位素组成、富铀花岗岩浆和幔源基性岩浆提供 CO_2 的潜力两方面进行分析的。

首先是碳同位素,胡瑞忠等(1993)文中列举了诸广及下庄地区7个铀矿床共32样品 $\delta^{13}C_{\Sigma C}$ 数据,其变化范围很窄,为 -3.31‰ ~ -10.72‰ ,且绝大多数样品集中在 -5‰ ~ -9‰ 之间,说明来源稳定,具有共源性。

而据魏菊英等(1988)提出地球岩石中碳同位素组成是:大洋玄武岩 -2.6‰ ~ -12.4‰ ,橄榄岩约 -20‰ ,岩浆成因碳酸岩 -4‰ ~ -7.5‰ ,沉积碳酸盐岩 1‰ ~ 3‰ ,生物成因碳酸盐岩 -6‰ ~ -9‰ ,近代陆相沉积物 -10‰ ~ -36‰ ;中高温岩浆热液型锡矿 -5‰ ~ -14‰ 。包括胡瑞忠(1993)、赵军红(2001)等在内,都承认花岗质岩浆岩(壳源)和基性岩浆岩(幔源)的碳同位素组成是相似的,从碳同位素组成本身是无法区分的。所以对于铀矿成矿热液中 CO_2 的来源就只能归结到花岗岩浆和幔源基性岩浆提供 CO_2 的潜力上了。

胡瑞忠(1993)认为“高酸度花岗岩贫 CO_2 ”,文中列举的 CO_2 含量数据是基性岩脉平均2.42%、黑云母花岗岩平均1.41%、白(二)云母花岗岩平均1.16%。据此推断花岗岩没有提供 CO_2 的潜力,排除了花岗岩,就剩下基性岩脉了。所以,胡瑞忠(1993)认为是幔源基性岩脉提供了铀矿成矿热液中的 CO_2 (作为矿化剂)。

但是岩石中某种组分含量的高低是衡量能否提供该组分潜力的重要因素,但不是唯一因素,关键还

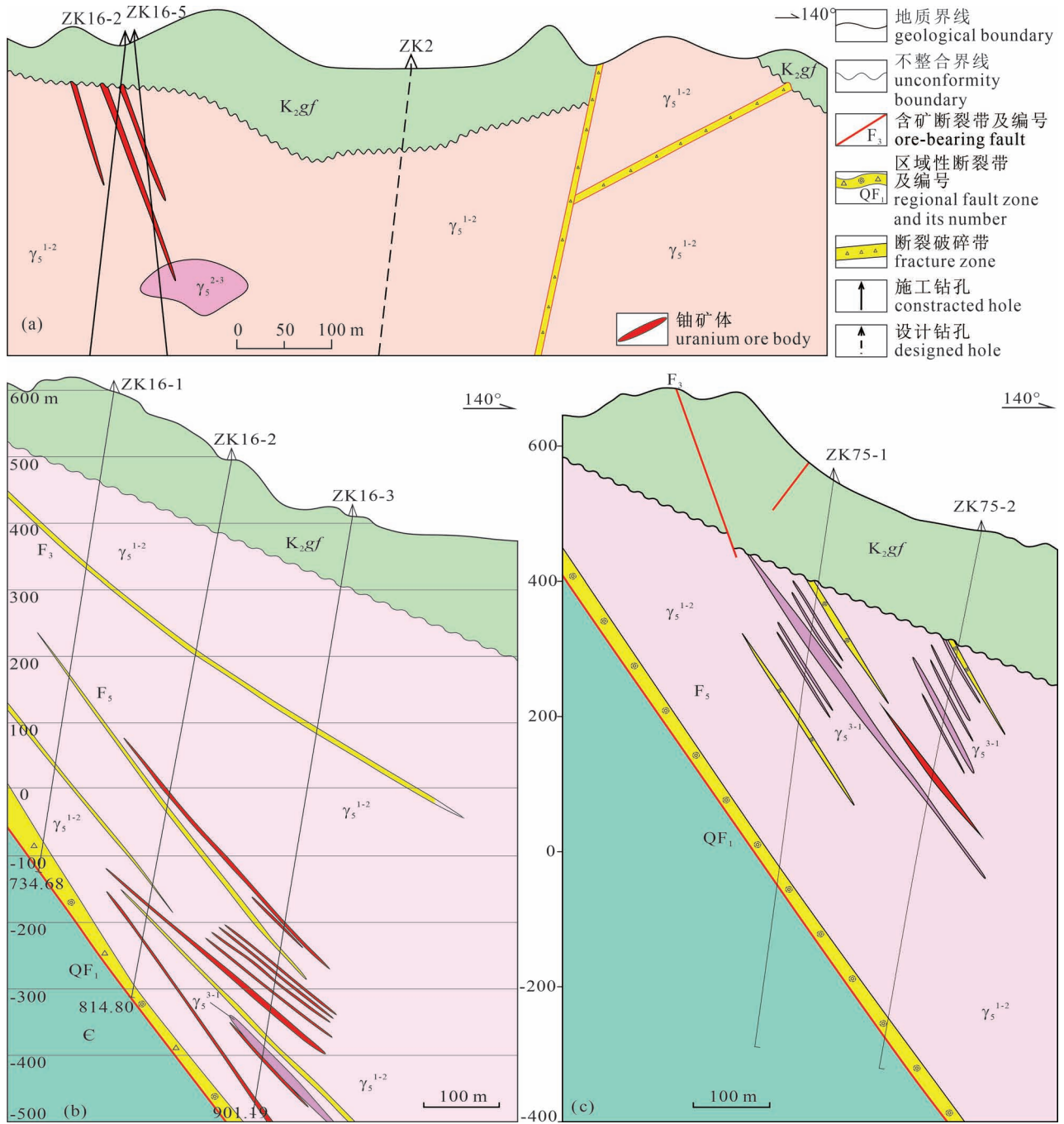


图 5 洞房子铀矿 16 线 (a) 蕉叶垅铀矿 16 线 (b) 和 75 线 (c) 地质剖面图 (据刘春月, 2019; 黄龙, 2017; 李嘉等, 2019 修编)

Fig. 5 Geological profiles of line 16 of Dongfanzhi uranium deposit (a) and line 16 (b) and line 75 (c) of the Jiaoyelong uranium deposit (Revised from Liu Chunyue, 2019&; Huang Long, 2017# and Li Jia et al. , 2019&)

K_2gf —上白垩统龟峰群; ϵ —寒武系; γ_5^{3-1} —燕山晚期细粒花岗岩; γ_5^{2-3} —燕山早期

第三阶段细粒少斑黑云母花岗岩; γ_5^{1-2} —印支期早中粗粒黑云母花岗岩

K_2gf — Guifeng Group of upper Cretaceous; ϵ —Cambrian; γ_5^{3-1} — fine-grained late Yanshanian granites; γ_5^{2-3} —fine-grained oligoporphyry biotite granite of third stage of early Yanshanian; γ_5^{1-2} —middle Indosinian medium-to-coarse -grained biotite granite

要看另外两个因素,一个是活性,另一个是体量。要综合考虑含量、活性、体量 3 个因素,才能比较准确地确定是否具有提供该组分的潜力。

对于含量,胡瑞忠 (1993) 已经给出了测试结果,不需要讨论了,这里讨论余下的两个因素。第一个是活性,按照胡瑞忠 (1993) 文,酸性花岗岩中 CO_2

的活性比较低,不容易分异出富含 CO_2 的成矿热液,而基性岩脉中 CO_2 的活性较大。第二个是体量,诸广复式岩体和贵东岩体的出露面积约 6000 km^2 ,而该两岩体内的基性岩脉总面积不足 3 km^2 。含量有了,体量有了,假设两者活性差按 1:10 计算(这个假设已经是对花岗岩类不利、对基性岩脉有利的极限了),但是由于花岗岩类岩石的巨大体量,可以提供进入成矿流体的 CO_2 总量的潜力,花岗岩类岩石是基性岩脉类岩石的 100 倍以上。也就是说,“铀矿成矿流体中 CO_2 来源于幔源”的结论是值得商榷的。

陈衍景(2013)系统总结大陆碰撞成矿理论时,认为与中酸性岩浆热液成矿系统有关的云英岩型、石英脉型钨、锡、铋、钼、稀土、铀矿床的成矿流体,常富含 CO_2 包裹体, CO_2 - H_2O 包裹体、含子晶多相包裹体和水溶液包裹体;成矿流体具有富 CO_2 的特点,且往往富 F 和富 K。所以,中酸性岩浆(壳源重熔成因)热液并不一定是贫 CO_2 的,况且重熔岩浆的原岩也可以是富含 CO_2 的岩石类型。在宏观上,典型与花岗岩有关的石英脉型钨锡矿床中均有方解石脉的发育。因此,铀矿成矿热液中 CO_2 的来源不一定是深源或幔源的,应该针对具体情况具体分析。

幔源锶与壳源锶的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值界线是 0.707,一般 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值 >0.707 为壳源, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值 <0.707 为幔源(魏菊英等,1988)。范洪海等(2001)研究相山铀矿田成矿期萤石的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值 = 0.7145~0.7207,显示为壳源。刘军港等(2019)对相山西部深部的多金属矿化的成矿流体的研究显示,其初始 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值 = 0.718865,反映壳源来源。Zhang Chuang et al(2019)研究诸广南部花岗岩型铀矿成矿作用,认为存在两期铀成矿,晚期铀成矿的同成矿方解石的 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值为 0.719250~0.721327,同样显示壳源特征。

5.2 红盆控盆断裂不一定是深断裂

作为红层沉积形成的盆地,红盆既有特殊性(发育于晚白垩世—古近纪,代表了潮湿炎热氧化环境条件),更有其普遍性(沉积盆地,相对低洼地区,接受来自周边较高地区搬运来的物质的沉积)。

有盆就有山,盆山是地球表面的最基本地貌格局,控盆也就是造盆,造盆与造山是同时发生的,是同一地质作用过程在地球表面(地貌上)表现出一对矛盾统一体。造山作用主要有三种类型,即挤压

造山、伸展造山和走滑造山,所以对应的控盆断裂无非就是逆冲断裂、伸展断裂和走滑断裂三种类型。逆冲断裂除了板块边界深插地幔外,绝大多数板内中等规模逆冲断层都是铲形断层,上陡下缓,切割深度不是太深,到了一定深度就沿水平滑塌面运动。如我国最典型的压陷盆地河西走廊,其南侧祁连山以低角度逆冲在河西走廊之上(陈柏林等,2005,2006,2008);又如塔里木盆地,南侧昆仑山北缘断裂以中低角度逆冲在塔里木盆地上,导致昆仑山巨大隆升(程晓敢等,2012;谢会文等,2012;梁瀚等,2014)。

受大型走滑断裂控制的堑垒式盆地,其控盆断裂切割深度比较大,如郯庐断裂带山东沂沭段的“两堑夹一垒”构造(张尚坤等,2021;朱裕振等,2023)。伸展盆地大部分受低角度伸展断裂控制,我国东部晚白垩世—古近纪的红层盆地绝大多数是伸展盆地,南雄盆地就是最典型的实例。

南雄盆地控盆断裂是南雄盆地北缘断裂(也称南雄断裂),属于典型的低角度伸展断层,显然不是深断裂,而是低角度正断层(图 6)。苍石剖面所在区段拆离断裂构造带由下至上分别为糜棱岩化花岗岩、糜棱岩、面理化石英带(硅质糜棱岩)和角砾岩(图 6a)。塘坡剖面所在区段拆离断裂带亦呈现构造变形的脆韧性转换特征,尚发育拆离断层系的特征组成单元—绿泥石化带(图 6b),构造变形带主要由糜棱岩化石英砂岩、糜棱岩、绿泥石化带、面理化石英带和角砾岩(图 6b)。脆韧性转换构造面—拆离断层发育在角砾岩与硅质初糜棱岩之间。

在乌坭水库北侧,南雄盆地北缘断裂脆性断裂及硅化带走向 NE 向,呈低缓的 $25^\circ\sim 35^\circ$ 倾角,倾向南东(图 7a);其下盘发育韧性变形带,也呈中等倾角倾向南东(图 7b);反映脆性正断的硅化带表面发育微角砾岩(图 7c、d),下盘依次出现绿泥石化带、糜棱岩带,这是低角度伸展的典型标志。在上头园村,出露南雄盆地北缘断裂的硅化带及沿硅化带上部的脆性断裂,呈 NE 走向,低角度倾向 SE(图 7e、f)。

同时从诸广山复式岩体的隆升剥露与南雄盆地的形成时序来看,诸广山复式岩体隆升在先,北起桂东—炎陵一带,经诸广,南至翁源一带贵东岩体,这个近南北向复式岩体长度达 250 km ,其近南端被后期南雄盆地所截成两段。南雄盆地南北两侧岩体可以对应,盆地中西段北侧的诸广岩体南部(龙华山岩体)对应盆地南侧青嶂山岩体,盆地东段北侧的油山岩体对应盆地南侧的坪田岩体(图 6)。

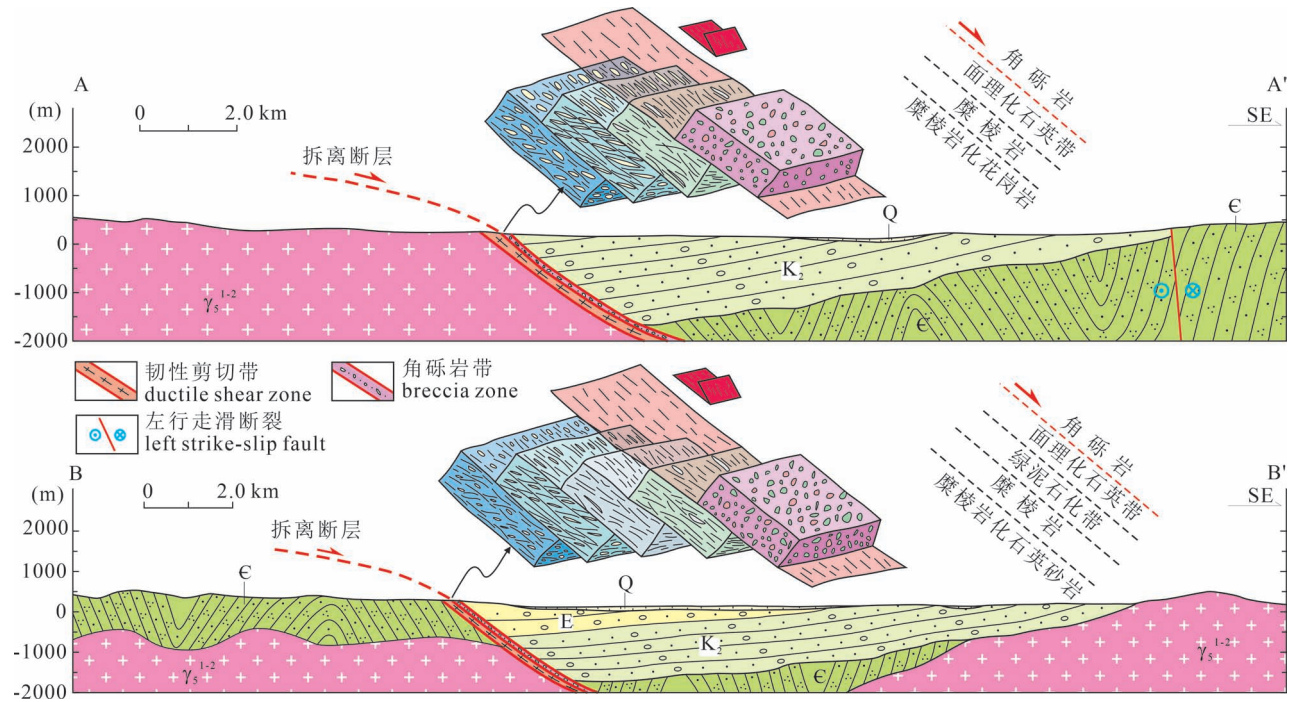


图 6 南雄盆地北缘低角度正断层剖面

Fig. 6 Low angle normal fault section in the northern margin of the Nanyang Basin

Q—第四系; E—古近系; K₂—上白垩统; C—寒武系; γ₅¹⁻²—印支期花岗岩

Q—Quaternary; E—Paleogene; K₂—Upper Cretaceous; C—Cambrian; γ₅¹⁻²—Indosinian granite

从诸广地区高海拔地区残留少量钨矿床的地质事实(黄国龙等, 2015)可以看出, 诸广复式岩体在晚侏罗世与花岗岩有关的石英脉型钨矿形成之后发生了一次隆升剥露, 之后才发生铀成矿作用, 接着发生了第二次隆升剥露, 使已经形成的铀矿床出露至近地表, 这前两期隆升剥露可能呈南北向隆起, 东西向有差异。之后再发生以南雄盆地为代表的伸展盆地, 将原先呈南北向的诸广山复式岩体截断, 呈现北东走向隆起带和盆地, 差异升降呈北西向。

所以, 铀成矿流体(CO₂ 矿化剂)不一定是深源的, 而红层盆地的控盆断裂也不一定是深源断裂。因此, 铀成矿与红层盆地没有必然的成因关系。

张万良(2011a)较早就注意到红层盆地可能的保矿作用, 提出了红层及其相关的古气候环境与铀成矿关系的质疑: ①许多狭长的带状红层, 铀矿主要分布在红层的一侧, 另一侧矿床较少, 如崇抚盆地南侧的相山火山岩区矿床多, 北侧的玉华山火山岩区矿床少, 会昌红层东侧花岗岩区矿床多, 西侧花岗岩仅产少量矿点, 这种分布格局显然不是红层两侧在构造和气候背景不同造成的, 而且, 既然构造和古气候作用是大范围的, 为什么铀矿化仅分布在红层附

近不远的地方? ②相山矿田北面 45 km 处的清江盆地、东南 45 km 处的南城盆地、西南 40 km 处的永丰盆地旺田一带, 除了白垩纪红层外, 还有古近纪新余群的沉积, 而且从新余群中的钙芒硝、硬石膏、岩盐等沉积物以及诸如旱梅、麻黄等生物遗迹的存在, 可以看出, 这个时期也是以干燥炎热为主的古气候, 但是为什么处于这些盆地包围中的相山矿田在古近纪却没有显著的成矿作用呢? ③在江西中部的峡江 632 矿床和江西北部的修水董坑矿床, 虽然它们附近也分布有武宁群和新余群红层(E₁₋₂), 但它们的成矿年龄却只有 33~25 Ma, 这已相当于古近纪的渐新世(E₃), 已是以温湿为主的古气候环境。

回到丰州盆地, 早期认为是遂川—热水的两条次级断裂(热水断裂北东段、遂川断裂南西段)的左行走滑活动在叠接带形成的拉分盆地(李先福等, 1999)。但是, 从两条次级断裂末端转向(遂川断裂南西端向西偏转、热水断裂北东端向东偏转)与左行走滑断裂末端破裂形式在动力学上是相矛盾的(另文详述)。虽然遂川断裂南西段与红层盆地北西侧呈断裂接触, 但是显然是后期的破碎带, 同时, 盆地南东侧并未受热水断裂北东段控制, 所以丰州

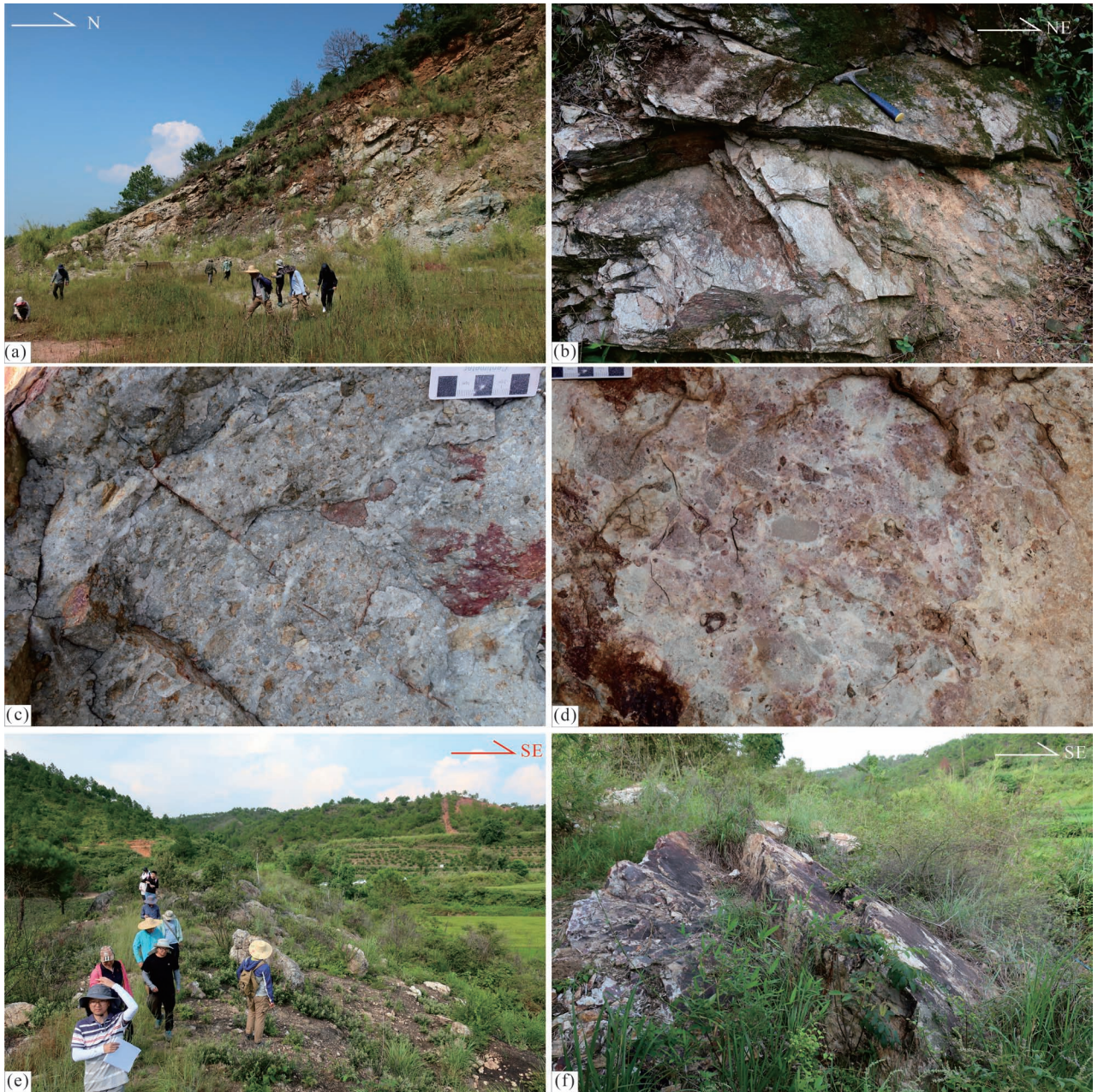


图7 南雄盆地北缘断裂产状特征

Fig. 7 Occurrence characteristics of faults in the northern margin of Nanxiong Basin

(a) 脆性断裂及硅化带,呈中—低倾角倾向南东(倾角约 28°),乌坭水库北;(b) 脆性变形带下盘的韧性变形带,中等倾角倾向南东,乌坭水库北;(c) 图a的局部放大,硅化带中的微角砾岩,乌坭水库北;(d) 图a的局部放大,硅化带中的微角砾岩,乌坭水库北;(e) 脆性断裂及硅化带,呈中—低倾角倾向南东,上头园村北;(f) 脆性断裂及硅化带,呈中—低倾角倾向南东(倾角约 34°),上头园村北

(a) the brittle fracture and silicification zone, with a moderate—low dip to the south-east (dip angle of about 28°), at the north of the Wuni reservoir;(b) the ductile deformation zone of the footwall of the brittle deformation zone, with a moderate dip to the south-east, at the north of the Wuni reservoir;(c) local enlargement of figure a with micro-breccia in the silicification zone, at the north of Wuni Reservoir;(d) local enlargement of figure a with micro-breccia in the silicification zone, at the north of Wuni Reservoir;(e) brittle fracture and silicification zone, at the north of Shangtouyuan village;(f) brittle fracture and silicification zone, with middle—low dip angle to SE (dip angle about 34°), at the north of Shangtouyuan village

盆地不是受热水—遂川断裂控制。控矿构造的形成早于热水—遂川断裂,主要介于(但不限于)热水—

遂川断裂的两条次级断裂(遂川断裂南西段与热水断裂北东段)之间,控矿构造包括发育于印支期、燕

山期早期花岗岩的 NNE 向(近 SN 向、NE 向及 NEE 向)为主的裂隙带,也包括形成更早的、发育于震旦系—寒武系浅变质碎屑岩中的以 NWW 向为主(以及近 EW 向、NW 向)的裂隙带(另文详述)。

5.3 丰州盆地及邻区的隆升剥露历史

Sun Yue 等(2021)最新对鹿井铀矿田开展了磷灰石裂变径迹低温年代学研究,揭示了鹿井铀矿田的隆升剥露演化历史,对进一步厘定鹿井矿田铀成矿与盆地演化的关系、铀成矿时代及其成矿后构造活动都提供了重要的启示。

根据 Sun Yue 等(2021)的模拟结果(图略)可以获得鹿井铀矿田不同构造部位的样品所经历的热演化历史。

(1)丰州盆地红层沉积砂岩的模拟曲线:物源岩石(包括三叠纪和侏罗纪花岗岩,也包括更老的岩石)在 135 Ma 后处于隆升降温状态,至 110~90 Ma 左右处于近地表常温状态,即遭受剥露侵蚀;80~70 Ma 开始被埋深增温,至约 60 Ma 被埋藏增温至最深,按平均地温梯度 30 °C/km 估算,埋深在 1.5~2.5 km;约 45 Ma 左右的古近纪开始降温剥露,直至目前状况。

(2)丰州盆地南东侧较近(QF₂ 北侧)的三叠纪花岗岩类(未矿化)的模拟曲线:岩体侵位后在 135 Ma 后处于隆升降温状态,至 100~80 Ma 左右处于近地表常温状态;80 Ma 开始被埋深增温,至约 40 Ma 被埋藏增温至最深;约 40 Ma 左右的古近纪开始降温剥露,直至目前状况。同在丰州盆地南东侧、更远离丰州盆地(QF₃ 附近)的三叠纪花岗岩类(未矿化)的模拟曲线:前期热演化相似,在晚白垩世重新被埋深增温的幅度较小一些,约浅 0.5~1.5 km,约 65~55 Ma 就开始隆升降温,至 40 Ma 左右已至近地表常温状态,40 Ma 以来一直稳定在近地表常温状态。

(3)丰州盆地西北侧遂川断裂南西端的北西盘花岗岩样品(三叠纪花岗岩和侏罗纪花岗岩)的模拟曲线:岩体侵位后在 135 Ma 后处于隆升降温状态,至 100~70 Ma 左右处于近地表常温状态;约 70 Ma 的晚白垩世末期开始被埋深增温,至约 15 Ma 的中新世中期被埋藏增温至最深;约 15 Ma 左右的中新世中期开始快速冷却,直至目前状况。

(4)丰州盆地北侧(牛尾岭铀矿床)和南东侧(金鸡岭铀矿床)的矿化花岗岩样品的模拟曲线:岩体侵位后在 135 Ma 后处于隆升降温状态,至 95~70 Ma 左右处于近地表常温状态;65 Ma 开始被埋深加热,但幅度较小,至约 50 Ma 被埋藏加热至最深;约

50 Ma 左右的古近纪开始冷却,直至目前状况。

(5)上述花岗岩类及晚白垩世砂岩的磷灰石裂变径迹模拟的自早白垩世晚期以来的热历史在寒武纪浅变质砂岩样品的磷灰石裂变径迹模拟得到很好的印证,两个寒武纪浅变质砂岩样品自 130 Ma 以来均具有降温剥露、又增温埋深、再降温剥露的热演化历史。

总之,丰州盆地及邻区的 5 种不同地质体在 135 Ma 以来都经历了两阶段的热演化历史,最终达到目前的近地表状态。

5.4 热演化历史所反映的铀成矿和控矿构造演化特征

根据上述不同构造部位样品热历史的模拟结果所反映的隆升剥露历史(Sun Yue et al., 2021),可以得出有关鹿井铀矿田及其邻区铀成矿及控矿构造演化的相关信息。

(1)目前出露地表的丰州盆地红层沉积是盆地底部沉积的残留,即红层盆地沉积底部的一小部分,其上有约 1.5~2.5 km 的红层沉积物已经被剥蚀了。

(2)热液型铀矿床成矿作用不可能发生于常温的地表环境(砂岩铀成矿作用除外),而是具有一定的成矿深度,按照目前有关的流体包裹体研究估算成矿深度在 1.5~2.5 km,结合鹿井铀矿田的勘查剖面,所以早期铀成矿只能是晚白垩世早期剥露至地表之前,即 95 Ma 之前,这与目前铀成矿年代学研究确认的第 1 期成矿时间 113~92 Ma(Bonnetti et al., 2018;夏毓亮,2019)相吻合。

(3)矿化花岗岩,也可能包括早期铀矿体在其形成后,曾经隆升剥露至近地表,而后经历了与晚白垩世晚期到古近纪红层底部的沉积物相似的增温被埋藏过程,最后再被隆升降温,到达目前的近地表状态。

(4)丰州红层盆地周边的地层岩石(包括寒武纪浅变质碎屑岩、三叠纪花岗岩、侏罗纪花岗岩及前述的铀矿化花岗岩),都经历过晚白垩世早期的降温剥露过程、晚白垩世中晚期—古近纪早期的埋藏增温过程、古近纪中晚期以来的再隆升剥露过程。说明在晚白垩世中晚期—古近纪早期,鹿井铀矿田及其周边地区存在广泛的红层沉积盆地,其范围比现在残留的丰州红层盆地要大很多。

(5)遂川断裂南西端在古近纪早期以前断裂两侧岩石热历史相似,古近纪中期以来断裂两侧热演化历史差异很大,其北西侧样品埋深增温幅度更大、时间更长,直至约 15 Ma 的中新世中期才开始快速隆升剥露的降温过程,反映了遂川断裂在晚白垩世

中晚期—中新世早期表现为右行走滑,其末端的北西盘出现拉张,指示了一期近EW向挤压的区域构造应力场;中新世以来在整体隆升剥露的背景中,遂川断裂转化为左行走滑,导致其末端的北西盘出现快速隆升(其结果是导致包括小坑钨矿在内的高温热液矿床抬升剥露至地表浅部);而在走滑断裂叠覆区由于具有“拉分盆地”性质,大大减缓了隆升速率,使得丰州盆地红层沉积得以保留一部分,形成目前的状态。以此推断,热水断裂北东端的南东侧塘洞—乐洞一带,可能存在与遂川断裂南西端的北西侧相似的中新世以来快速隆升剥露历史(遂成为湘粤赣三省的分水岭)。

5.5 找矿预测意义

按照前人的认识,认为铀成矿受红层盆地周缘断裂控制,铀矿床只发育在丰州盆地的周边。铀矿找矿方向是沿着红层盆地(丰州盆地)的周边开展找矿。而按照本文的认识,铀矿床形成后,经历隆升剥露、红层覆盖埋藏、再隆升剥露的历史,丰州盆地为残留盆地,丰州盆地对早已形成的矿床起到了保矿作用。因此,其找矿方向是除了丰州盆地周边以外,丰州盆地底下是铀矿找矿的非常有利区段,极大地拓展了鹿井铀矿田的找矿空间。

6 结论

丰州盆地是晚白垩世—古近纪红层盆地底部沉积的残留,是一个规模大很多的红层盆地的一小部分,其上有约1.5~2.5 km的红层沉积物已经被剥蚀了。铀成矿与红层盆地没有必然的成因关系,热液型铀矿床早期成矿作用发生于红层盆地形成之前,成矿后被抬升剥露至地表(约95~75 Ma),再被红层盆地覆盖保存;至65~55 Ma被埋藏至最深(约1.5~2.5 km);约55~45 Ma再次被隆升剥露降温,至40 Ma左右已至近地表常温状态,40 Ma以来一直稳定在近地表常温状态。而遂川断裂NW侧在约15 Ma的中新世中期才开始快速隆升剥露,北西盘比南东盘隆升幅度更大,反映了遂川断裂的左行走滑特点,该断裂与热水断裂的叠接带以拉分盆地性质减缓隆升剥露幅度,才得以保存现有的丰州盆地。丰州盆地对早于盆地沉积所形成的铀矿床起到了保矿作用。因此,其找矿方向是除了丰州盆地周边以外,丰州盆地底下是铀矿找矿的非常有利区段,极大地拓宽了鹿井铀矿田的找矿空间。

致谢:野外调查及论文成文过程与核工业270研究所的同行进行了有益的交流,两位审稿专家提

出宝贵建议对提高本文受益匪浅,一并感谢。

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)
- 陈柏林, 刘建生, 张永双, 刘建民. 2005. 玉门断裂全新世活动特征及其与玉门地震的关系. 地质论评, 51(2): 138~142.
- 陈柏林, 刘建民, 刘建生, 王春宇, 张永双, 董诚, 吴乃芬. 2006. 高台车站断裂全新世活动特征. 地质学报, 80(4): 497~507.
- 陈柏林, 王春宇, 崔玲玲, 刘建民. 2008. 祁连山北缘—河西走廊西段晚新生代逆冲推覆断裂发育模式. 地学前缘, 15(6): 260~277.
- 陈功, 邓金贵, 田儒, 陈戴生. 1983. 我国中、新生代盆地铀矿的成矿条件及成因模式探讨. 地质学报, 57(3): 283~293.
- 陈衍景. 2013. 大陆碰撞成矿理论的创建及应用. 岩石学报, 29(1): 1~17.
- 陈跃辉, 陈祖伊, 蔡琨琦, 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): 129~146.
- 陈祖伊, 张邻素, 陈树崑, 郭葆墀, 陈伟鹤, 王正邦. 1983. 华南断块运动—陆相红层发育期与区域铀矿化. 地质学报, 57(3): 294~303.
- 程晓敢, 黄智斌, 陈汉林, 杜治利, 李康, 师骏. 2012. 西昆仑山前冲断带断裂特征及构造单元划分. 岩石学报, 28(8): 2591~2601.
- 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: 0~237.
- 杜乐天. 2011. 中国热液铀成矿理论体系. 铀矿地质, 27(2): 65~68.
- 董恒达, 郑翔. 2015. 湘东南鹿井矿田与花岗岩有关铀矿床地质特征及成因. 江西科学, 33(1): 20~24.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 沈渭洲, 刘昌实, 姜耀辉. 2001. 江西相山铀矿田成矿物质来源的Nd、Sr、Pb同位素证据. 高校地质学报, 7(2): 139~145.
- 韩娟, 王彦斌, 王登红, 陈郑辉, 王清利, 侯可军. 2011. 江西黄峰岭铀矿床花岗岩时代、成因: 锆石U-Pb年龄和Hf同位素证据. 地质与勘探, 47(2): 284~293.
- 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. 矿床地质, 26(2): 139~152.
- 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, 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. 地质论评, 36(4): 317~325.
- 胡瑞忠, 李朝阳, 倪师军, 刘莉. 1993. 华南花岗岩型铀矿床成矿热液中 ΣCO_2 来源研究. 中国科学(B辑), 23(2): 189~196.
- 胡瑞忠. 1989. XW铀矿床成矿机理. 成都地质学院学报, 16(3): 1~9.
- 胡瑞忠. 1994. 花岗岩型铀矿床成因讨论——以华南为例. 地球科学进展, 9(2): 41~46.
- 胡志华, 林锦荣, 陈柏林, 陶意, 王勇剑. 2022. 华南中—新生代红盆与热液铀矿时空双重叠及其动力学探讨. 铀矿地质, 38(2): 221~237.
- 胡志华, 林锦荣, 王勇剑, 王峰, 陶意. 2018. 相山矿田邹家山铀矿床钛铀地球化学特征及其成矿意义探讨. 世界核地质科学, 35(2): 63~70.
- 黄国龙, 吴烈勤, 邓平, 朱捌, 张彦春, 谭正中, 曹豪杰. 2006. 粤北花岗岩型铀矿找矿潜力及找矿方向. 铀矿地质, 22(5): 267

- ~275.
- 黄国龙, 曹豪杰, 徐文雄, 沈渭洲. 2015. 诸广棉花坑铀矿床垂向分带模式及深部找矿潜力. 铀矿地质, 31(3): 355~362.
- 黄龙. 2017. 鹿井地区深源铀找矿方向探讨. 资源信息与工程, 32(1): 54~58.
- 黄世杰. 2006. 略谈深源铀成矿与深部找矿问题. 铀矿地质, 22(2): 70~75.
- 黎广荣, 郭福生, 金腾瑞, 张炜强, 张运涛, 杨庆坤, 陈留勤, 周万蓬, 于玉帅. 2019. 江西省峡江—广丰地区白垩纪红盆火山盆地铀成矿的制约探讨. 大地构造与成矿学, 43(3): 542~557.
- 李海东, 潘家永, 夏菲, 孟华. 2015. 江西乐安居隆庵铀矿床热液蚀变地球化学特征. 矿物学报, 35(增刊): 303.
- 李欢, 魏俊浩, 李艳军, 肖飞, 梁胜男, 周红智, 翟玉林. 2018. 新疆东准格勒顿巴斯套金矿床成因: H—O—C—S—Pb 同位素制约. 大地构造与成矿学, 42(5): 846~861.
- 李嘉, 张万良, 高梦奇, 党飞鹏. 2019. 鹿井铀矿田细粒花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及意义. 矿产与地质, 33(3): 489~496.
- 李先福, 李建威, 傅昭仁, 陈小东. 1999. 湘赣边界鹿井矿田走滑构造特征分析. 大地构造与成矿学, 23(2): 123~129.
- 李延河, 段超, 赵悦, 裴浩翔, 任顺利. 2016. 氧化还原障在热液铀成矿中的作用. 地质学报, 90(2): 201~218.
- 李子颖, 黄志章, 李秀珍, 林锦荣. 2004. 贵东岩体铀成矿交代作用特征研究. 矿物岩石地球化学通报, 23(2): 100~104.
- 李子颖, 黄志章, 李秀珍, 张金带, 林子瑜, 张玉燕. 2014. 相山火成岩与铀成矿作用. 北京: 地质出版社, 1~324.
- 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. 铀矿地质, 15(1): 9~17.
- 梁瀚, 汪新, 陈伟, 王宇. 2014. 西昆仑山前和田—柯克亚挤压构造带新生代变形时序及其地质意义. 大地构造与成矿学, 38(1): 27~37.
- 林锦荣, 胡志华, 王勇剑, 张松, 陶意. 2019. 相山铀矿田铀多金属成矿时代与成矿热历史. 岩石学报, 35(9): 2801~2816.
- 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.
- 刘春月. 2019. 综合物化探方法在鹿井矿田洞房子地区找矿中的应用. 世界有色金属, (11): 59~62.
- 刘军港, 李子颖, 聂江涛, 张万良, 王勇剑, 田明明. 2019. 相山铀矿田西部地区深部多金属矿化成矿年代与成矿流体演化: Rb-Sr 同位素体系的制约. 岩石学报, 35(9): 2787~2800.
- 刘义发. 1986. 赣杭构造带火山岩型铀矿床的形成与白垩纪红层具有时空一致性. 华南地质与矿产, (2): 1~2.
- 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氩同位素组成及成矿流体来源示踪. 岩石学报, 35(9): 2765~2773.
- 漆富成, 张宇龙, 李治兴, 何中波, 王文全. 2012. 中国碳硅泥岩型铀矿床时空演化规律. 铀矿地质, 28(2): 65~71.
- 汪昌亮, 徐萍. 2016. 中国南方红盆区铀矿床成矿模式探讨. 矿产与地质, 30(2): 188~192.
- 王正其, 李子颖. 2007. 壳幔铀成矿作用探讨. 地质论评, 53(5): 608~615.
- 魏菊英, 王关玉. 1988. 同位素地球化学. 北京: 地质出版社: 1~166.
- 温志坚, 杜乐天, 刘正义. 1999. 相山铀矿田特富矿成矿模式. 地质论评, 45(7): 763~767.
- 吴俊奇, 闵茂中, 翟建平, 罗兴章, 赖贻堂, 魏元泵. 1998. 华南诸广山复式岩体中段花岗岩的碱交代蚀变. 岩石学报, 14(1): 90~98.
- 夏毓亮. 2019. 中国铀成矿地质年代学. 北京: 中国原子能出版社, 1~301.
- 夏宗强, 李伟林, 范洪海, 庞雅庆, 张敬燕. 2016. 华南花岗岩体外带上覆盆地型铀矿床地质特征及成矿模式探讨. 铀矿地质, 32(2): 99~103.
- 谢会文, 王春阳, 王智斌, 程晓敢, 杜志利, 师骏, 陈汉林, 李康. 2012. 基底滑脱层分布对褶皱冲断带变形影响的物理模拟研究: 以塔西南西昆仑山前褶皱冲断带为例. 高校地质学报, 18(4): 701~710.
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用. 中国地质, 36(3): 528~543.
- 张尚坤, 罗文强, 于学峰, 田京祥, 唐璐璐, 陈军, 杨斌, 杜圣贤, 刘凤臣, 仵康林. 2021. 基于深反射地震剖面的沂沭断裂带岩石圈精细结构. 地质学报, 95(11): 3192~3204.
- 张万良, 高梦奇, 吕川, 黄超, 黄迪, 谢智聪. 2018a. 湘赣边境鹿井地区花岗岩斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及意义. 地质调查与研究, 41(3): 161~167.
- 张万良, 高梦奇, 吕川, 黄超, 黄迪, 谢智聪. 2018b. 湘赣边界鹿井地区印支早期花岗岩的发现及意义. 现代地质, 32(5): 863~873.
- 张万良. 2007. 华南红盆与铀矿保存. 矿产与地质, 21(2): 118~121.
- 张万良. 2011. 华南铀矿保存因素探索. 北京: 地质出版社: 1~190.
- 张宇龙, 漆富成, 何中波, 李治兴, 王文全, 于金水. 2012. 扬子陆块区东南缘碳硅泥岩型铀矿床与断陷红盆控矿机制. 世界核地质科学, 29(3): 125~129.
- 赵军红, 胡瑞忠, 蒋国豪, 谢桂青. 2001. 初论地幔热柱与铀成矿的关系. 大地构造与成矿学, 25(2): 171~178.
- 钟福军, 潘家永, 张伟盟, 赖静, 周堂波, 刘文泉. 2019. 粤北诸广南铀矿聚集区岩浆、构造与铀成矿活动. 地质力学学报, 25(5): 108~114.
- 朱裕振, 强建科, 李强, 沈立军, 贾金荣. 2023. 基于地球物理反演结果对沂沭断裂带中段深部结构再认识. 地质论评, 69(1): 113~122.
- Bonnetti C, Liu X D, Mercadier J, Cuney M, Deloule E, Villeneuve J and Liu W Q. 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.
- Chen Bailin, Liu Jianmin, Liu Jiansheng, Wang Chunyu, Zhang Yongshuang, Dong Cheng and Wu Naifen. 2006. Study on the activity and chronology of the Gaotai railway station fault during Holocene epoch. Acta Geologica Sinica, 80(4): 497~507.
- Chen Bailin, Liu Jiansheng, Zhang Yongshuang and Liu Jianmin. 2005. Activity of the Yumen fault during the Holocene and its relation to the Yumen earthquake. Geological Review, 51(2): 138~142.
- Chen Bailin, Wang Chunyu, Cui Lingling and Liu Jianmin. 2008. Developing model of thrust fault system in western part of northern Qilian Mountains margin—Hexi Corridor basin during late Quaternary. Earth Science Frontiers, 15(6): 260~277.
- Chen Gong, Deng Jingui, Tian Ru and Chen Daisheng. 1983. Discussion on the mineralization conditions and the genetic model for uranium deposits in Meso—Cenozoic basin of China. Acta Geologica Sinica, 57(3): 283~293.
- Chen Yanjing. 2013. The development of continental collision

- metallageny and its application. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 1~17.
- Chen Yuehui, Chen Zuyi, Cai Yuqi, Feng Quanhong and Fu Jin. 1997&. Spase—time evolution of Meso—Cenozoic extensional tectonics and distributions of uranium mineralization in Southeastern China. *Uranium Geology*, 13(3): 129~146.
- Chen Zuyi, Zhang Linsu, Chen Shukun, Guo Baochi, Chen Weihe and Wang Zhengbang. 1983&. The stages of development of fault-block movement and continental reds with respect to the regional uranium mineralization in South China. *Acta Geologica Sinica*, 57(3): 294~303.
- Cheng Xiaogan, Huang Zhilong, Chen Hanlin, Du Zhili, Li Kang and Shi Jun. 2012&. Fault characteristics and division of tectonic units of the thrust belt in the front of the west Kunlun Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2591~2601.
- Dong Hengda and Zheng Xiang. 2015#. Geological characteristics and genesis of granite-related uranium deposits in Lujing ore field, Southeastern Hunan, China. *Jiangxi Science*, 33(1): 20~24.
- Du Letian. 2001#. *Fundamental Metallogenic Rules and General Hydrothermal Mineralization*. Beijing: Atomic Energy Press: 1~237.
- Du Letian. 2011&. On the theory system of hydrothermal uranium metalization in China. *Uranium Geology*, 27(2): 65~68.
- Fan Honghai, Ling Hongfei, Wang Dezi, Shen Weizhou, Liu Changshi and Jiang Yaohui. 2001&. Ore-forming material sources for Xiangshan uranium ore-field in Jiangxi Province: Evidence from Nd—Sr—Pb isotopes. *Geological Journal of China Universities*, 7(2): 139~145.
- Han Juan, Wang Yanbin, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Wang Qingli and Hou Kejun. 2011&. Age and genesis of the granite in the Huangfengling uranium deposit, Jiangxi Province: evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopes. *Geology and Exploration*, 47(2): 284~293.
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Zhou Meifu, Peng Jiantang, Su Wenchao, Liu Shen and Qi Huawen. 2008. Uranium metallogenesis in south China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary. *Economic Geology*, 103(3): 583~598.
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, Liu Shen, Zhong Hong, Zhao Junhong and Jiang Guohao. 2007&. Some problems concerning relationship between Mesozoic - Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China. *Mineral Deposits*, 26(2): 139~152.
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Su Wenchao, Peng Jiantang and 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 and Jin Jingfu. 1990&. Mechanism of the migration and deposition of uranium in ascending hydrothermal solutions—Evidence from the Xiwang uranium deposit. *Geological Review*, 36(4): 317~325.
- Hu Ruizhong, Li Chaoyang, Ni Shijun and Liu Ke. 1993. Research on ΣCO_2 source in ore-forming hydrothermal solution of granite type uranium deposits, South China. *Science in China*, 36: 1252~1262.
- Hu Ruizhong. 1989&. Mineralizing mechanism of XW uranium deposit. *Journal of Chengdu college of Geology*, 16(3): 1~9.
- Hu Ruizhong. 1994&. A commentary on genesis of granite - type uranium deposit; as exemplified by South China. *Advance in Earth Sciences*, 9(2): 41~46.
- Hu Zhihua, Lin Jinrong, Wang Yongjian, Wang Feng and Tao Yi. 2018&. Discussion on geological characteristics of the brannerite and its metallogenic significance in Zoujiashan uranium deposit, Xiangshan ore field. *World Nuclear Geoscience*, 35(20): 63~70).
- Hu Zhihua, Lin Jinrong, Chen Bailin, Tao Yi and Wang Yongjian. 2022&. Discussion on temporal—spatial overlapping and dynamics of Meso—Cenozoic red basins and hydrothermal uranium mineralization in South China. *Uranium Geology*, 38(2): 221~237.
- Huang Guolong, Wu Lieqin, Deng Ping, Zhu Ba, Zhang Yanchun, Tan Zhengzhong and Cao Haojie. 2006&. Prospecting potential and direction for granite uranium deposit in north Guangdong, China. *Uranium Geology*, 22(5): 267~275.
- Huang Guolong, Cao Haojie, Xu Wenxiang and Shen Weizhou. 2015&. Vertical zoning model and prospecting potential in depth of Mianhuakeng uranium deposit in Zhuguang. *Uranium Geology*, 31(3): 355~362.
- Huang Long. 2017#. Discussion on deep source uranium prospecting in Lujing area. *Resource Information and Engineering*, 32(1): 54~58.
- Huang Shijie. 2006&. Preliminary discussion on deep - sourced uranium metallogenesis and deep prospecting. *Uranium Geology*, 22(2): 70~75.
- Li Guangrong, Guo Fusheng, Jin Tengrui, Zhang Weiqiang, Zhang Yuntao, Yang Qingkun, Chen Liubin, Zhou Wanpeng and Yu Yushuai. 2019&. Contribution of red bed and volcanic basin to uranium mineralization in Xiajiang—Guangfeng belt Northeastern Jiangxi. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(3): 542~557.
- Li Haidong, Pan Jiayong, Xia Fei and Meng Hua. 2015#. Characteristics of hydrothermal alteration geochemistry in Julong'an uranium deposit, Le'an, Jiangxi Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, 35(S): 303.
- Li Huang, Wei Junhao, Li Yanjun, Xiao Fei, Liang Shengnan, Zhou Hongzhi and Zhai Yulin. 2018&. Origin of the Dunbasitao gold deposit in eastern Junggar, Xinjiang, H—O—C—S—Pb isotopic constraints. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(5): 846~861.
- Li Jia, Zhang Wanliang, Gao Mengqi and Dang Feipeng. 2019&. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating age of fine-grained granite in Lujing uranium field and its geological significance. *Mineral Resources and Geology*, 33(3): 489~496.
- Li Xianfu, Li Jianwei, Fu Zhaoren and Chen Xiaodong. 1999&. Analysis of strike-slip tectonics in the Lujing ore field at the border between Hunan and Jiangxi Province, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(2): 123~129.
- Li Yanhe, Duan Chao, Zhao Yue, Pei Haoxiang and Ren Shunli. 2016&. The role of oxidizing reducing barrier in mineralization of hydrothermal uranium ore. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 201~218.
- Li Ziyang, Huang Zhizhang, Li Xiuzhen, Guo Jian and Fan Chou. 2015. The discovery of natural native uranium and its significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(5): 1561~1567.
- Li Ziyang, Huang Zhizhang, Li Xiuzhen and Lin Jinrong. 2004&. Characteristics of metasomation associated with uranium mineralization in the Guidong granite rock. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(2): 100~104.
- Li Ziyang, Huang Zhizhang, Li Xiuzhen, Zhang Jindai, Lin Ziyu and Zhang Yuyan. 2014#. Pyrogenesis and Uranium Metallogeny in

- Xiangshan Volcanic Basin, South China. Beijing: Geological Publishing House, 1~324.
- Li Ziyang, Li Xiuzhen and Lin Jinrong. 1999#. On the Meso—Cenozoic mantle plume tectonics, its relationship to uranium metallogenesis and prospecting direction in South China. *Uranium Geology*, 15(1): 9~17.
- Liang Han, Wang Xin, Chen Wei and Wang Yu. 2014#. Cenozoic deformation sequence of Hetian—Kekeya structural belt in the piedmont of west Kunlun Mountains. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(1): 27~37.
- Lin Jinrong, Hu Zhihua, Wang Yongjian, Zhang Song and Tao Yi. 2019#. Ore-forming age and thermal history of uranium—polymetallic mineralization in Xiangshan uranium ore field. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2801~2816.
- Lin Jinrong, Li Ziyang, Hu Zhihua, Wang Yongjian and Wang Feng. 2016#. Controlling factors for the spatial positioning of hydrothermal uranium ore field. *Uranium Geology*, 32(6): 333~339.
- Liu Chunyue. 2019#. The application of the comprehensive geophysical and geochemical methods in the Dongfangzi area of Lujing ore-field. *World Nonferrous Metals*, (11): 59~62.
- Liu Jungang, Li Ziyang, Nie Jiangtao, Zhang Wanliang, Wang Yongjian and Tian Mingming. 2019#. The timing and ore-forming fluid evolution of deep polymetallic mineralization in western Xiangshan uranium ore field, South China: Constraints from Rb-Sr isotope systematics. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2787~2800.
- Liu Yifa. 1986#. Consistency in time and space between the formation of volcanic-type uranium deposits and the Crstaceous red beds in Ganhang tectonic belt. *Geology and Minerals in South China*, (2): 1~2.
- Pang Yaqing, Fan Honghai, Gao Fei, Wu Jianyong and Xie Xiaozhan. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2765~2773.
- Qi Fucheng, Zhang Zilong, Li Zhixin, He Zhongbo and Wang Wenquan. 2012#. Temporal and spatial evolution pattern of carbonaceous—siliceous argillaceous rock type uranium deposits in China. *Uranium Geology*, 28(2): 65~71.
- Sun Yue, Kohn B P, Boone S C, Wang Dongsheng and Wang Kaixing. 2021. Burial and exhumation history of the Lujing uranium ore field, Zhuguangshan complex, South China: Evidence from low-temperature thermochronology. *Minerals*, 11, 116. <https://doi.org/10.3390/min11020116>
- Wang Changliang and Xu Ping. 2016#. Metallogenic model of uranium deposits in red basin area of Southern China. *Mineral Resources and Geology*, 30(2): 188~192.
- Wang Zhengqi and Li Ziyang. 2007#. Discussion on Mantle - derived uranium mineralization. *Geological Review*, 53(5): 608~615.
- Wei Juying and Wang Guanyu. 1988#. *Isotope Geochemistry*. Beijing: Geological Publishing House: 1~166.
- Wen Zhijian, Du Letian, Liu Zhengyi. 1999#. Ore-forming Model of the Extremely-rich Ores in Xiangshan Uranium Orefield, Jiangxi. *Geological Review*, 45(7): 763~767.
- Wu Junqi, Min Maozhong, Zhai Jianping, Luo Xingzhang, Lai Yitang and Wei Yuanbang. 1998#. Alkali metasomatic alteration of the granite in middle Zhuguang Mountain, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 90~98.
- Xia Yuliang. 2019#. *Geochronology of Uranium Mineralization in China*. Beijing: China Atomic Energy Press, 1~301.
- Xia Zongqiang, Li Weilin, Fan Honghai, Pang Yaqing and Zhang Minyan. 2016#. Geological features and metallogenic model of granite - peripheral uranium deposits on overlying basin in south China. *Uranium Geology*, 32(2): 99~103.
- Xie Huiwen, Wang Chunyang, Wang Zhibin, Cheng Xiaogan, Du Zhili, Shi Jun, Chen Hanlin and Li Kang. 2012#. The effect of spatial distribution of basement detachment on deformation in a fold and trust belt: an analogue modeling approach an example of west Kunlun fold-and-trust belt. *Geological Journal of China Universities*, 18(4): 701~710.
- Yang Minggui, Huang Shuibao, Lou Fasheng, Tang Weixin and Mao Subin. 2009#. Lithospheric structure and large-scale metal- logenic process in Southeast China continental area. *Geology in China*, 36(3): 528~543.
- 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.
- Zhang Shangkun, Luo Wenqiang, Yu Xuefeng, Tian Jingxiang, Tang Lulu, Chen Jun, Yang Bin and Wu Kanglin. 2021#. Research on fine lithospheric structure of Yishui fault zone based on deep reflection seismic profile. *Acta Geologica Sinica*, 95(11): 3192~3204.
- Zhang Wanliang, Gao Mengqi, Lu Chuan, Huang Chao, Huang Di and Xie Zhicong. 2018a#. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and its geological significance in Lujing area of Hunan and Jiangxi border. *Geological Survey and Research*, 41(3): 161~167.
- Zhang Wanliang, Gao Mengqi, Lu Chuan, Huang Chao, Huang Di and Xie Zhicong. 2018b#. Discovery of the early Indosinian granite in Lujing area, Hunan and Jiangxi border and its geological significance. *Geoscience*, 32(5): 863~873.
- Zhang Wanliang. 2007#. Red basin in South China and uranium ore conservation. *Mineral Resources and Geology*, 21(2): 118~121.
- Zhang Wanliang. 2011#. *Exploration on Preservation Factors of Uranium Deposits in South China*. Baijing: Geological Publishing House: 1~190.
- Zhang Zilong, Qi Fucheng, He Zhongbo, Li Zhixin, Wang Wenquan and Yu Jinshui. 2012#. Ore-forming mechanism of down-fault red basin over carbonaceous—siliceous pelitic rock type uranium deposits at the southwestern of Yangzte continental block. *World Nuclear Geoscience*, 29(3): 125~129.
- Zhao Junhong, Hu Ruizhong, Jiang Guohao and Xie Guiqing. 2001#. Discussion of the relationship between mantle plume and uranium mineralization. *Geotectonica et Metallogenia*, 25(2): 171~178.
- Zhong Fujun, Pan Jiayong, Zhang Weimeng, Lai Jing, Zhou Tangbo and Liu Wenquan. 2019#. Magmation, tectonic activity and uranium mineralization events of Southern Zhuguang uranium ore-concentrated district, Northern Guangdong, China. *Journal of Geomechanics*, 25(S1): 108~114.
- Zhu Yuzhen, Qiang Jianke, Li Qiang, Shen Lijun and Jia Jinrong. 2023#. Understanding of deep structure of Yishui fault zone based on three-dimensional gravity inversion model. *Geological Review*, 69(1): 113~122.

Re-discussion on the temporal relation between uranium mineralization and red bed basin

—Taking Lujing uranium ore field in the Hunan—Jiangxi border as an example

CHEN Bailin

Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081

Abstract: Lujing uranium ore field is one of the most important hard rock-hosted uranium ore fields in South China. The uranium deposits in the field are distributed around Fengzhou Basin. In this paper, a study on the correlation between the uranium ore belt and the red-bed cap rock in the Fengzhou Basin has been carried out, taking into account the uplift and denudation history of the Lujing ore field and the characteristics of the faults in the northern margin of the Nanxiong basin, it is considered that the Fengzhou basin is a remnant of the late Cretaceous—Paleogene red-bed basin and is a small part of a much larger (at least 5~10 times) red-bed basin, about 1.5~2.5 km of red layer sediments have been eroded. There is no necessary genetic relationship between uranium mineralization and red bed basin. The hydrothermal uranium deposits occurred before the formation of the red-bed basin, and were exhumed to the surface (about 95~75 Ma) and then covered by the red-bed basin, it was buried to the deepest depth (about 1.5~2.5 km) at 65~55 Ma. It began to rise again and exfoliation from 55~45 Ma, and is near the surface at about 40 Ma and stable in the normal temperature of the surface since then. The NW side of the Suichuan fault began to uplift and exfoliate rapidly in the middle Miocene about 15 Ma, and the uplift range of the NW plate is larger than that of the SE plate, which reflects the left-lateral strike-slip characteristics of the Suichuan fault, the superimposed zone of the fault and the Reshui fault can preserve the existing Fengzhou basin by pulling apart the basin to slow the uplift and exhumation. The Fengzhou basin plays an important role in the preservation of uranium deposits formed before the basin sedimentation. Therefore, in addition to the surrounding area of Fengzhou basin, there is a favorable area for uranium exploration under the basin, which greatly expands the prospecting space of Lujing uranium ore field.

Keywords: uranium mineralization; Fengzhou basin; uplift and denudation history; ore-preserving structure; prospecting direction; Lujing uranium ore field

Acknowledgements: This study is supported by the National Key Research and Development Program of China (Nos. 2017YFC0602602, 2016YFC0600207)

First of author: CHEN Bailin, male, bore in 1962, Ph. D, professor, is mainly engaged in regional structure, ore-field structure and prospecting prediction; Email: cblh6299@263.net

Manuscript received on: 2024-01-01; Accepted on: 2024-06-28; Published online on: 2024-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.055

Edited by: ZHANG Yuxu