

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.04.004

江西相山矿田铀成矿的特征、演化及启示

胡宝群¹, 王运¹, 高海东², 邱林飞³, 周万蓬¹, 郭福生¹, 孙占学¹, 刘广伟⁴

HU Baoqun¹, WANG Yun¹, GAO Haidong², QIU Linfei³, ZHOU Wanpeng¹, GUO Fusheng¹,
SUN Zhanxue¹, LIU Guangwei⁴

1. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013;

2. 山西工学院能源产业学院, 山西 朔州 036000;

3. 核工业北京地质研究院/中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029;

4. 山东金山地质勘探股份有限公司, 山东 烟台 264000

1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. Shanxi College of Technology, College of Energy Industry, Shuozhou 036000, Shanxi, China;

3. CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology/Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;

4. Shandong Jinshan Geological Exploration Co., Ltd., Yantai 264000, Shandong, China

摘要:寻找富大硬岩型铀矿一直以来面临挑战。据深大断裂-临界水耦合成矿机制等新认识,重新梳理相山矿田火山杂岩铀成矿的主要特征,结合其他富大热液矿床的研究,探索富大热液矿床的共同规律。富大热液矿床多具有以下特征:首先,常有深大断裂与岩浆杂岩隆起组合的“一刀加一饼”的外形,深大断裂这“一刀”具多期次活动特点,因降压、升温、聚水,改变了周边区域的物理化学环境,驱动成岩成矿相关的物质运移、相变等,从而控制着与成矿密切相关的赋矿岩浆杂岩的形成、热液蚀变和铀成矿期次。其次,有 3 个主要构造层及与其相对应的三阶段式演化。再次,有 2 个主成矿期,早期高温成矿期(在相山铀矿田是 115 ± 0.5 Ma)与岩浆杂岩形成相关,而晚期低温成矿期(在相山铀矿田是 98 ± 8 Ma)与控盆断裂活动、盆地脱水相关,2 期成矿叠加是富大矿体形成的必要条件。上述富大热液矿床的特征主要体现为具有“一刀加一饼”外形的、由深大断裂与岩浆杂岩隆起组成的构造岩性组合,其形成机制实质上仍是深大断裂多期活动成岩成矿。这些认识可能给中国富大热液铀矿成矿和找矿研究带来一些启示。

关键词:深大断裂-临界水耦合成矿机制;岩浆杂岩;铀矿床;相山矿田

中图分类号:P619.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)04-0540-14

Hu B Q, Wang Y, Gao H D, Qiu L F, Zhou W P, Guo F S, Sun Z X, Liu G W. The characteristics, evolution and enlightenment of uranium mineralization in Xiangshan ore-field, Jiangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(4): 540-553

Abstract: Finding the rich and large hard rock type uranium deposits has always been a challenge. Using some new ideas to study the characteristics of some known rich and large uranium deposits and to explore constantly their mineralization process may bring some new understanding. According to the metallogenic mechanism by coupling the deep and large fault with the critical water, this paper has re-analyzed the characteristics and metallogenic process of uranium deposit in Xiangshan magmatic complex uplift, and explores the common law of the rich and large hydrothermal deposit by combining with the research of other rich and large hydrothermal deposits.

收稿日期:2022-07-18; **修订日期:**2022-09-20

资助项目:国家自然科学基金项目《江西邹家山铀矿床中的重稀土富集成矿机制研究》(批准号:41472069)、《江西相山铀矿田控矿界面三维结构研究》(批准号:41972080)和江西省技术创新引导类计划《江西相山铀矿田三维地质-成矿模型构建与深部找矿突破》(编号:20212AEI91008)

作者简介:胡宝群(1965-),男,博士,教授,从事岩矿地球化学研究。E-mail: bqhu@ecut.edu.cn

These rich and large hydrothermal deposits have the following characteristics: First of all, there is often the shape of "one knife overlying one cake" formed by combining the deep and large fault with the magmatic complex uplift. This deep and large fault with the shape of a knife is a multi-stage activity. Due to the pressure reduction, temperature rise and water accumulation, this fault will change the physical-chemical environment of the surrounding area, which drives the material migration and phase transformation related to the mineralization, so as to control the formation of the magmatic complexes uplift, hydrothermal alteration and uranium mineralization stages. Secondly, there are usually three main tectonic layers and their corresponding three-stage evolution. Thirdly, there are always two main mineralization stages in the rich and large hydrothermal deposits. The early high-temperature mineralization stage (115 ± 0.5 Ma in Xiangshan ore field) is related to the formation of magmatic complex, while the late low-temperature mineralization stage (98 ± 8 Ma in Xiangshan ore field) is related to the basin-controlling fault activity and basin dehydration. The superposition of the two stages of mineralization is a necessary condition for the formation of rich and large ore bodies. These above characteristics are mainly reflected in the structural and lithologic combination composed of deep and large faults and magmatic complex uplift with the shape of "one knife overlying one cake", which their formation mechanism is still the multi-stage diagenesis and mineralization by activity of the deep and large faults in essence. These understandings may bring some enlightenment to the study of mineralization and prospecting of rich and large hydrothermal uranium deposits in China.

Key words: the metallogenic mechanism by coupling the deep and large fault with the critical water; magmatic complex; uranium deposits; Xiangshan ore-field

富大矿床是区域地质作用长期演化的综合结果,研究其特征和形成过程,在成矿作用、找矿方向和构造演化等方面有重要意义。迄今为止,抚州相山矿田仍是中国最大的火山岩型铀矿田,其成岩成矿过程复杂,研究成果非常丰富且源源不断(徐海江等,1984;邱爱金等,1999;范洪海等,2003;张万良,2007;黄锡强等,2008;张树明等,2009;胡宝群等,2011a;2015;陈正乐等,2013;胡荣泉等,2013;杨水源,2013;吴赞华,2015;郭福生等,2016;2017;李子颖等,2016),可作为热液成矿、找矿、构造演化等研究的天然实验室。通过不断深入挖掘其中的地学信息,结合业内提出的新问题、新思路(胡宝群等,2009;2011b;2022b;;吕古贤等,2016;吕古贤,2019;李子颖等,2020;刘云鹏等,2021)开展新探索,对热液成矿过程、控矿因素、成矿边界极限等理论研究有重要意义,对中国东部地区火山岩型铀矿新区和深部找矿实践也有一定的启示。

1 相山矿田铀成矿的主要地质特征及演化概要

据现有研究(徐海江等,1984;邱爱金等,1999;范洪海等,2003;黄锡强等,2008;张树明等,2009;胡宝群等,2011a;2015;陈正乐等,2013;胡荣泉等,2013;杨水源,2013;吴赞华,2015;李子颖等,2016;郭福生等,2016;2017),

相山矿田铀成矿的总体特征大致归纳如下。

(1) 有 3 个主要构造层

相山矿田的地层(郭福生等,2016;2017)(表 1)总体分为 3 个构造层,即前震旦系的基底构造层、火山沉积构造层(加上花岗斑岩等次火山岩构成火山杂岩隆起)、红盆(即断陷红色盆地)构造层。

前震旦纪的基底构造层(AnZ):主要为青白口系的片岩、千枚岩等浅变质岩。火山沉积构造层(K_1):总厚度 3816 m,出现 2 个火山喷发的主旋回,对应打鼓顶组流纹英安岩(K_{1d})和鹅湖岭组(K_{1e})的碎斑熔岩,2 个主旋回之间有平行不整合的沉积间断;在这个构造层形成时被英安斑岩、花岗斑岩等次火山岩侵入,从而形成岩浆杂岩隆起。相山火山杂岩年龄(张树明等,2009;陈正乐等,2013;郭福生等,2016)在 $132.4 \pm 1.2 \sim 141.6 \pm 1.7$ Ma 表明,火山杂岩隆起形成不超过 10 Ma(胡宝群等,2015)。红盆构造层(K_2):总厚度 3114 m,分布于矿田的西北,倾向 WS,小角度不整合于相山火山杂岩之上,为抚州-永丰盆地的一部分(与相山邻近段常被称为抚-崇盆地)。

(2) 有 3 套不同性质的构造体系

据矿田及周边的构造特征,自 145 Ma 起相山矿田构造(主要表现为断裂)总体可分为 3 套体系(胡宝群等,2015)。

早期的火山构造体系,包括环状塌陷及放射状

表 1 相山铀矿田主要地层(据郭福生等,2016;2017)
Table 1 Main strata of Xiangshan uranium ore-field

统	组	段	厚度/m	岩性、岩相	构造层
全新统	联圩组	Qh ¹	<3.5	黄色砾石、砂层、粘土	
古新统	新余组	E ₁ x	60.2	紫红色泥质粉砂岩中部分夹杂砾岩	
上白垩统	莲荷组	二段	132.3	紫红色砾岩,夹含砾中—粗砂岩	红盆构造层
		(K ₂ —E ₁ lh) 一段	528.9	砖红色含砾中砂岩、含砾细砂岩	
	塘边组(K ₂ t)	二段	319.6	紫红褐色的泥质粉砂岩、泥岩、含砾细砂岩	
		一段	379.6	红色的含砾粗细砂岩	
	(龟峰群)	一段	84.3	砖红色厚层泥质粉砂岩及中层泥质粉砂岩,夹杂含砾细砂岩	
		三段	127.2	深红色含砾细砂岩、含砾粉砂岩	
	河口组(K ₂ h)	二段	495.3	深红色含砾砂岩,分选性磨圆度较差	
		一段	1046.4	深红色砾石	
	鹅湖岭组(K ₁ e)	二段	3218.5	边部发育碎斑熔岩,中部发育变质角砾岩,以碎斑熔岩为主,中间夹杂部分花岗质团块,溢流侵出相沉积	
		一段	12.4	凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩、晶屑玻屑凝灰岩等,为火山爆发—浅湖相沉积	
下白垩统	打鼓顶组(K ₁ d)	二段	560.8	流纹英安岩、流纹英安质角砾岩,局部见火山集块岩具流纹构造,酸性喷溢相沉积	火山沉积构造层
		一段	24.5	杂色砂岩、粉砂岩、底砾岩及熔结凝灰岩,粉砂岩中有钙质或铁锰质结核,火山爆发—浅湖相沉积	
	上施组(Qb ^{ss})	二段	437.1	浅灰色千枚岩组成,原岩泥岩、含泥质粉砂岩	
青白口系上部(潭头群)	(Qb ^{ss})	一段	310	青灰色(黑云母)千枚岩、大理岩,原岩粉砂岩、泥质粉砂质	前震旦纪的基底构造层
	库里组(Qbk)	二段	285.8	浅灰白色绢云千枚岩、细砂岩,原岩泥质粉砂质夹少量细砂岩	
	(Qbk)	一段	1208.9	石英岩、石英片岩及千枚岩组成,原岩石英细砂岩、泥质粉砂岩	
	神山组(Qb ^s)	二段	1518.3	灰色炭质千枚岩夹石英,变余水平层理,原岩泥质砂岩	
	(Qb ^s)	一段	>968.2	深灰色绢云石英片岩、绢云千枚岩,局部见含炭质千枚岩,原岩粉砂岩、泥岩夹少量炭质页岩	

断裂,有的断裂或塌陷被英安斑岩和花岗斑岩等次火山岩充填。考虑到挤压条件下难于重熔形成火山岩,仅有深大断裂拉张减压时才能造成重熔(万天丰等,2012),因此形成火山杂岩的断裂应是张性的。

中期的 SN 走向构造体系,形成时间介于早、晚两期之间。尽管火山杂岩隆起中 SN 向断裂断续而不连续,但仍可辨认,可能是被晚期 NE 向控盆断裂体系所改造。相山矿田北部近 EW 走向的褶皱及推覆断裂,推测是在这期断裂体系的同一应力场作用下的结果。

晚期的盆地构造体系,主要是 NE 走向断裂。这些断裂在相山矿田非常明显,控制着盆地的形

态、沉积及演化,相山附近的控盆断裂是德兴-遂川深大断裂带的中段,矿田内的邹家山-石洞断裂(简称邹-石断裂)是属于德兴-遂川深大断裂平行次生断裂;NW 走向的断裂,推测为与 NE 走向断裂配套的共轭断裂。尽管从交错关系看,德兴-遂川深大断裂带(包括邹-石)等控盆断裂是晚期的,但应该是之前就已形成的,只是长期、多期次活动(邱爱金等,1999)。德兴-遂川断裂带及其东南侧平行的邹-石断裂,在相山矿田周边不仅控红盆,还控制着两侧的火山盆地;沿抚州-永丰狭长盆地往 EN 方向除相山外还发育一系列火山岩,如玉华山、谭港、谕源、礼陂、高家、林家等火山岩;尽管岩性等方面有一定的差异(徐海江等,1984;邱爱金等,1999;郭福

生等,2017),但推测是控盆深大断裂活动引发重熔而成的,这一系列火山岩应不是同一火山口喷出的,而是各自有不同的喷发口。

(3) 铀矿化主要特征

在矿床类型划分上,相山矿田中火山岩型铀矿床可分为3个亚类,即火山熔岩亚型(如邹家山、云际等矿床)、次火山岩亚型(如山南、沙洲等矿床)和爆发角砾岩亚型,以前两者为主,最后一亚类仅发现一个巴泉矿床(胡宝群等,2011a)。

在矿床空间分布方面,矿田内产出有20多个铀矿床,主要集中分布于矿田的西部(邹家山-李家岭)和北部(山南-沙洲),东部仅发现云际矿床。矿田内所发现的矿床,特别是大型矿床多是沿着邹-石断裂分布(图1);相山矿田已勘查出的铀矿储量 $2/3$ 以上集中分布于邹-石断裂两侧2 km的范围(胡宝群等,2011a;胡荣泉等,2013),由此不难看出邹-石断裂的控矿意义。

据铀矿体产出状态看,断裂控矿明显。火山熔岩亚型矿体主要赋存于切过熔岩的断裂带中,矿体具体走向主要受邹-石断裂活动所产生的次级断裂控制,矿田东部的云际矿床(矿体赋存于近SN走向的断裂中)除外;次火山矿体主要赋存于花岗岩、斑状花岗岩中,矿体走向与岩体的长轴方向大体一致。矿石主要为充填状和交代蚀变状,前者为含铀矿物的萤石、方解石、黄铁矿等混合物充填于断裂带中,后者为含铀矿物的断裂破碎带或断层泥、常被脉石矿物胶结的交代蚀变矿物组合。铀矿物主要有沥青铀矿、钛铀矿及其变种、铀石等,在火山熔岩亚型富矿石中钛铀矿增多。矿床中铀平均品位为 $0.2\% \sim 0.4\%$,在极个别矿体的局部可达 12% (如在邹家山铀矿4号带中)。按矿石化学组成和矿物组合,相山矿田矿石总体分为铀-钼-稀土-磷-钍和铀-铅-锌-银两大类(胡宝群等,2015)。

矿体周围蚀变强烈,主要有红化(赤铁矿化)、水云母化(伊利石化),此外还有碳酸盐化、萤石化、硅化、绿泥石化等。按形态划分,可分为面形和线形蚀变。矿田内发育的面形蚀变广泛,多为水云母化,蚀变强烈,此外还有钾化、钠化等。线形蚀变多沿着断裂破碎带分布,发育多种蚀变,水云母化也很强烈,沿铀矿体周围常有强弱不同的带状红化。

相山矿田铀成矿多被认为有2期,即早期铀-赤铁矿型矿化, 115 ± 0.5 Ma(北部-东部、碱性蚀

变);晚期铀-萤石型矿化, 98 ± 8 Ma(西部,酸性蚀变)(范洪海等,2003;胡宝群等,2015)。

铀矿石中石英、萤石等透明矿物气液包裹体的均一温度变化于 $85 \sim 460^\circ\text{C}$ 之间,多集中于 $120 \sim 400^\circ\text{C}$ 之间,通常分为 $2 \sim 3$ 个峰值 220°C 、 310°C 、 394°C (黄锡强等,2008;张树明等,2009;邱林飞等2012;胡宝群等,2015)。

(4) 相山矿田火山杂岩的区域地质特征

抚州-永丰盆地南缘分布有一系列火山杂岩,沿着抚州-永丰盆地东南缘,从南西到东北依次分布谭港、相山、礼陂、谕源、林家、高家(东乡)6个大小不一的火山盆地,这几处火山岩的岩性相似,但有一些差异(徐海江等,1984;郭福生等,2016,2017);除相山外,鲍家、林家、高家火盆(即火山沉积盆地)中也发育一些小型铀矿床及铀矿化点,这些矿床的矿石矿物组成和化学成分有很大的相似性,如均富含钛铀矿及Mo、REE、P等。

根据“无红盆、无铀矿”的铀成矿认识(陈祖伊等,1983;张万良,2007;胡宝群等,2015),若从深大断裂、红盆、火山杂岩相互联系分析,深大断裂控制着“火盆”和“红盆”分布(陈祖伊等,1983;郭福生等,2017),并控制着赋存于火山杂岩盆地中的铀成矿作用(图1、图2)。

相山火山盆地的铀矿因其大而富,受关注度高,研究专家学者众多。区域上,沿着抚州-永丰盆地向北、向南的周边,乃至整个赣-杭构造带,分布着一系列红盆和火山盆地(图2),在这一系列火山杂岩盆地中也都有铀矿床和铀矿化,如玉华山、盛源、广丰、新路、大洲等盆地。首先,玉华山火山杂岩中也有一些铀矿床和铀矿化点。相山和玉华山火山杂岩分别位于抚州-永丰盆地的东南侧和西北侧,2个火山杂岩隆起的岩性及铀矿化特征也很相似(胡宝群等,2015;黎广荣等,2019),推测火山盆地、红盆及其铀矿化都是受控于德兴-遂川深大断裂。其次,沿着抚崇盆地的东南侧的东北方向,有临川正南方向的施家、鲍家铀矿床。抚崇盆地再往东北和北东东方向,沿着赣杭构造的深大断裂,已勘探发现了大批铀矿床和矿化点,如盛源盆地的65、70号2个矿床(张万良,2000)。再次,沿着抚崇盆地向西南方面,进入到诸广山岩体,控盆的深大断裂两侧附近,产有营盘圩、桂东、鹿井等花岗岩型铀矿床(田)。此外,沿深大断裂控制的红盆、火盆

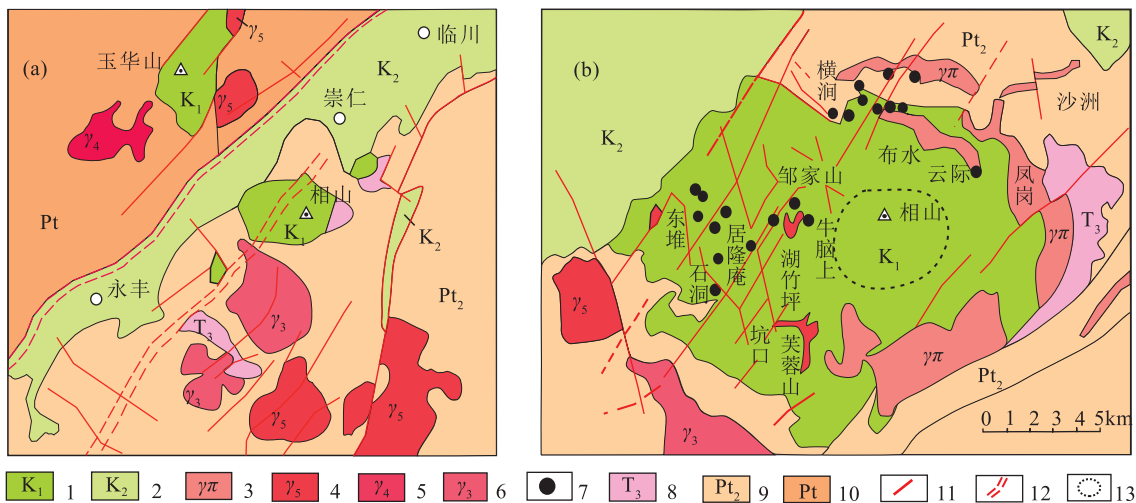


图1 相山铀矿田区域(a)和矿床分布图(b)(据胡宝群等,2011a)

Fig. 1 The geological map(a) and uranium deposit distribution(b) in Xiangshan uranium ore field
 1—上白垩统砂砾岩;2—下白垩统中酸性火山杂岩;3—一次花岗斑岩;4—燕山期花岗岩;5—华力西期花岗岩;
 6—加里东期花岗岩;7—铀矿;8—上三叠统砂岩;9—中元古界变质岩;10—元古宇(未分)变质岩;
 11—断裂;12—推测深大断裂;13—火山颈(推测)

的周边,还产有一系列金、铜、铅锌矿化和矿床,如东乡铜矿、桐源金矿、金山岭金矿等(郭福生等,2017)。

相山铀矿田区域地质背景的这些特征,概括起来就是深大断裂多期次活动控制红盆、火盆的形成及相关的铀金等多金属矿化。

(5) 相山铀矿田的成岩成矿演化的总体分析

相山火山杂岩隆起铀矿田,从空间形态特征角度可简化为“一刀加一饼”的深大断裂加火山杂岩隆起组合形式(简称为“刀加饼”,“刀”为多期次活动的深大断裂,“饼”为杂岩隆起,隆起也可被称为穹隆),即相山铀矿田是一个产有二十几个铀矿床的

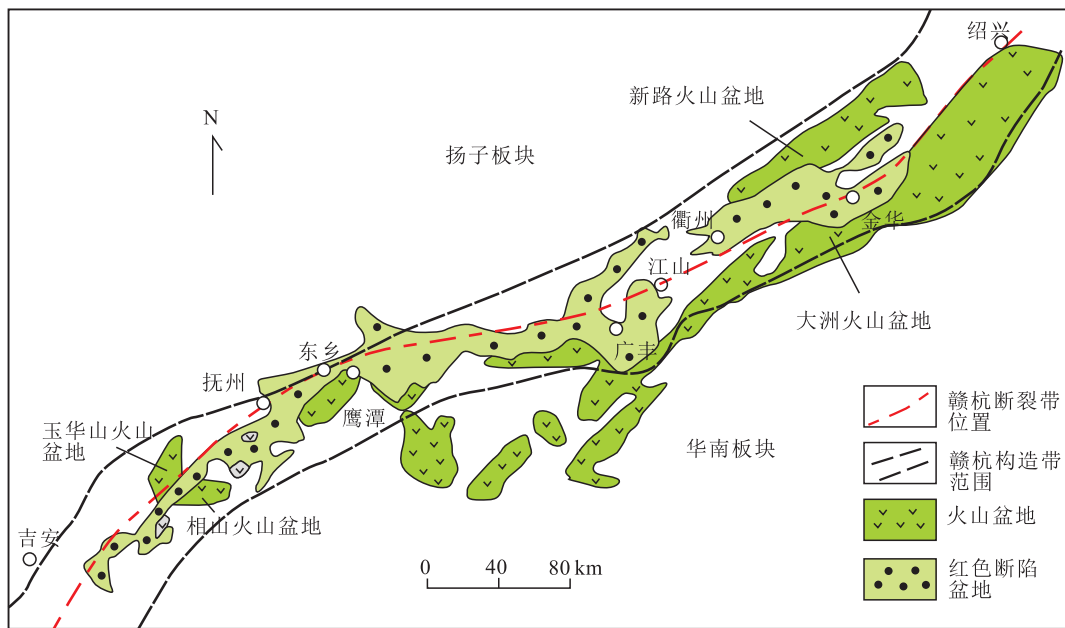


图2 赣杭构造带中沉积盆地与含铀火山盆地分布示意图(据周聪,2013;郭福生等,2016;2017)

Fig. 2 The distribution of sedimentary basins and uranium-bearing volcanic basins in Gan-hang structural belt

椭圆形、面积约 300 km² 的火山杂岩隆起,被 NE 走向的邹-石断裂带斜切。

综合前述,相山火山杂岩铀矿田的成岩成矿特征及其相互关系分析,矿田的形成演化主要是控盆断裂带长期活动的结果,区域性多期次活动的深大断裂控制着盆地和火山杂岩的形成,所产生的次级断裂控制矿体的定位。矿田内 3 个体系的构造,总体与控盆深大断裂的 3 次活动对应(图 3):深大断裂早期活动形成了相山等一系列火山岩盆地,推测是张性断裂降压重熔、形成成分略有差异的火山杂岩(徐海江等,1984;郭福生等,2017),本期火山杂岩形成时的热液活动交代改造周边老地层形成铅锌(金)矿化,沉淀于相对应的断裂、裂隙中(郭福生等,2016;2017);中期形成 SN 向断裂,矿田东、西差异抬升隆起,与矿田东部相比西部抬升强烈、破裂

更强,改造已形成的火山机构的同时还发生早期碱交代铀矿化,红化特别强烈;晚期 NE 向德兴-遂川深大断裂再次活动,在其派生的邹-石断裂附近为左行剪切(邱爱金等,1999;周聪,2013;胡荣泉等,2013;吴赞华,2015),形成如居隆庵等地的菱形块体,铀沉淀于局部张性空间,主要有酸交代蚀变,叠加改造早期碱交代的铀矿化,露头上可见在红化蚀变之上叠加绿化蚀变(水云母化、伊利石化)。仅有早期红化多形成贫、小矿体,早晚 2 期成矿叠加才能形成富大矿体、绿化叠加红化可成富大矿。地处矿田东部的云际矿床特征独特,与邹-石断裂附近的铀矿床有较大的不同,SN 走向断裂清晰,保持很好,铀矿石强烈红化,为富含大量方解石和磷灰石的碱性矿石(胡宝群等,2015;郭福生等,2016;2017),推断是受与抚州-永丰盆地及 NE 走向控盆

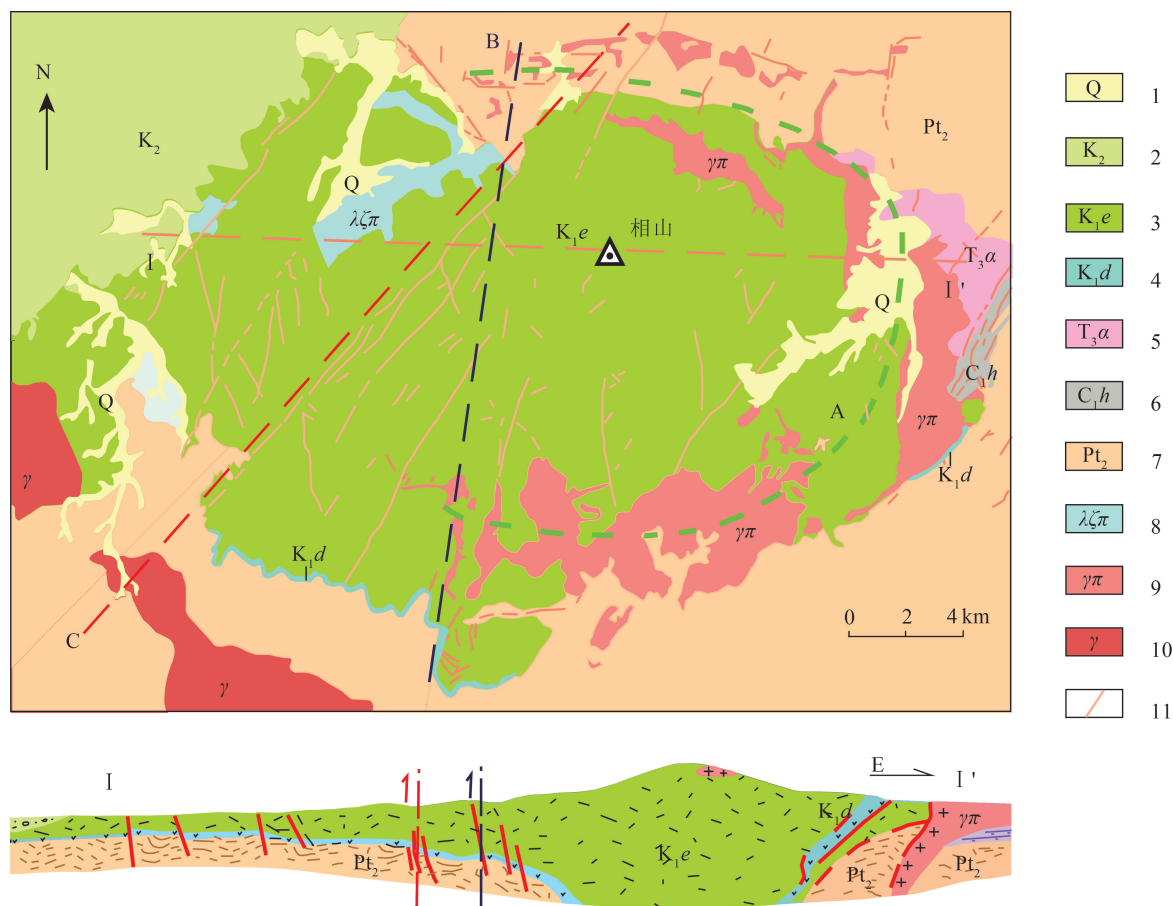


图 3 相山铀矿田构造演化示意图及 I-I' 剖面(据胡宝群等,2015)

Fig. 3 The sketch map of tectonic evolution and section I-I' in Xiangshan uranium ore-field

1—第四系;2—上白垩统;3—下白垩统鹅湖岭组;4—下白垩统打鼓顶组;5—上三叠统安源组;6—下石炭统华山岭组;7—前震旦系;8—流纹英安斑岩;
9—花岗斑岩;10—花岗岩;11—断裂;3 套构造体系:A—火山环形构造体系位置;B—相山东、西两部分差异抬升剥蚀分界线,即 SN 向构造体系的位置;C—红盆断裂体系东南边缘,相山 NW 和 SE 两部分的分界线,相当于邹-石断裂位置,即 NE 向断裂体系的位置

断裂活动的影响较小所致。

德兴-遂川深大断裂带控岩控矿的具体体现:其多期次活动不仅控制着红盆的形成和演化,控制着基底重熔(固熔之间的一级相变)形成火山杂岩,该深大断裂派生的次级断裂还控制着岩浆期后热液、盆地脱水热液等的活动;热液与围岩发生水岩反应,并可引发水的一、二级相变而成矿,在相山地区导致铀、铅、锌、金等多金属成矿作用;除相山矿田外,还影响着玉华山铀矿、鲍家铀矿、东乡铜矿、桐源和金山岭金矿等矿床的形成。

2 相山铀矿田成矿规律对富大热液矿床成矿研究的启示

国内外许多富大热液矿床都有与相山矿田相似的地质特征(罗毅等,1997;胡瑞忠等,2004;李子颖,2006;张万虎,2011;Petrov et al.,2015;周永恒等,2018;付建等,2018;Bonnetti et al.,2018;阎鸿铨,2019;薛伟,2019;吕古贤,2019;李晓光,2020;肖凡等,2021;胡宝群等,2001,2021;Li et al.,2022;宋明春等,2022),常有深大断裂与岩浆杂岩隆起组合的“一刀加一饼”的外形等,总体表现为深大断裂控岩控矿(有时也称成岩成矿)。通过大量富大热液矿床特征的总结分析,探索其中深层次的内在原因。

2.1 国内外富大热液矿床的共同特征和演化过程

世界最大的铀矿田俄罗斯斯特列措夫火山岩型矿田(Petrov et al.,2015;罗毅等,1997;周永恒等,2018;阎鸿铨,2019;薛伟,2019;李晓光,2020)和蒙古国多尔诺特超大型火山岩型铀矿田(薛伟,2019),同属额尔古纳火山岩成矿带,铀成矿特征与相山铀矿田非常相似。

斯特列措夫矿田仅品位 0.2% 以上的储量就有 28×10^4 t(U_3O_8),不少铀矿石品位可达百分之几到十几(罗毅等,1997;Petrov et al.,2015;周永恒等,2018;阎鸿铨,2019;薛伟,2019;李晓光,2020)。有 19 个铀矿床,万吨级矿床 9 个(其中 3 个超 5×10^4 t),斯特列措夫矿床最大,达 6×10^4 t。火山杂岩面积 200 km² 左右(图 4),也有变质基底(P_1)、火山杂岩($K_1^1—J_3$)和盖层(K_1^2)三层式的构造层结构。含矿主岩为酸性火山岩、次火山岩。含矿构造为不同方向断裂、环状和放射状火山构造、层间破碎带等降压空间,断裂控矿明显。铀矿物除了沥青铀矿

还含较多钛铀矿,铀矿石富钼、含量可达千分之几到百分之几,有的矿床伴生有铅锌金等矿化。

多尔诺特铀矿田为前寒武系基底上的火山塌陷盆地($J_3—K_1^1$)(薛伟,2019),被夹持于裂隙盆地(K_1^2)之间(图 5),基底 NE 向和 NW 向断裂带控制着盆地内火山杂岩的形成及矿田定位(罗毅等,1997;周永恒等,2018;薛伟,2019;李晓光,2020)。也有三层式结构,基底为古元古代片麻状花岗岩、片岩、大理岩、角闪岩等,有多期花岗岩化;中间层为陆相火山杂岩层,为双峰式玄武岩-流纹岩组合;盖层是陆源含煤沉积(K_1^2)。主要有 3 个铀矿床(万吨级 2 个),储量约 4×10^4 t,平均品位 0.18% 左右;伴生有铅锌金矿床和萤石矿床等。构造控矿特征明显,有似网脉状、似脉状、似层状 3 种矿体,铀成矿分早、晚 2 期,铀矿物主要有沥青铀矿、钛铀矿、铀石等,蚀变强烈,主要有赤铁矿化、钠长石化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化、萤石化等。

华南鹿井、下庄、桃山、诸广山等花岗岩型铀矿田(胡宝群等,2001;胡瑞忠等,2004;李子颖,2006;Bonnetti et al.,2018),与相山等火山岩型铀矿田也有很多相似之处,只是含矿主岩为花岗杂岩而非火山杂岩。也可分出三层式的岩性结构,即变质基底、岩浆杂岩体(层)和红盆,只是中间的岩浆杂岩层不是火山杂岩层而是花岗杂岩体,这些杂岩都经历了多期的岩浆活动;也有早、晚 2 个成矿期,形成高温和中低温的 2 个期次矿石矿物组合(胡宝群等,2001);有“一刀加一饼”的深大断裂与含矿主岩(为多期次的花岗杂岩岩体)的组合方式,深大断裂切过杂岩体隆起,“一刀”多为一组平行或共轭断裂,断裂控矿明显。

按照深大断裂控岩控矿、深大断裂切过岩浆杂岩组合的思路重新梳理国内外富大热液矿床的特征发现,除铀矿田外,国内外许多富大热液多金属矿床(田)有相似的地质特征(张万虎,2011;吕古贤等,2016;付建等,2018;肖凡等,2021;胡宝群等,2021)。如江西德兴的银山铅锌铜银多金属矿床(图 6),岩层组合可分为 3 个构造层,矿田发育于双桥山群变质基底之上的火山杂岩中,矿田西南方向伴随有下白垩统的沉积断陷盆地,火山杂岩隆起矿田被一条 NE 走向深大断裂像刀一样切过,其活动所产生的次级断裂控矿明显,矿体呈组带总体分布于“刀加饼”的交切部位(张万虎,2011)。又如胶

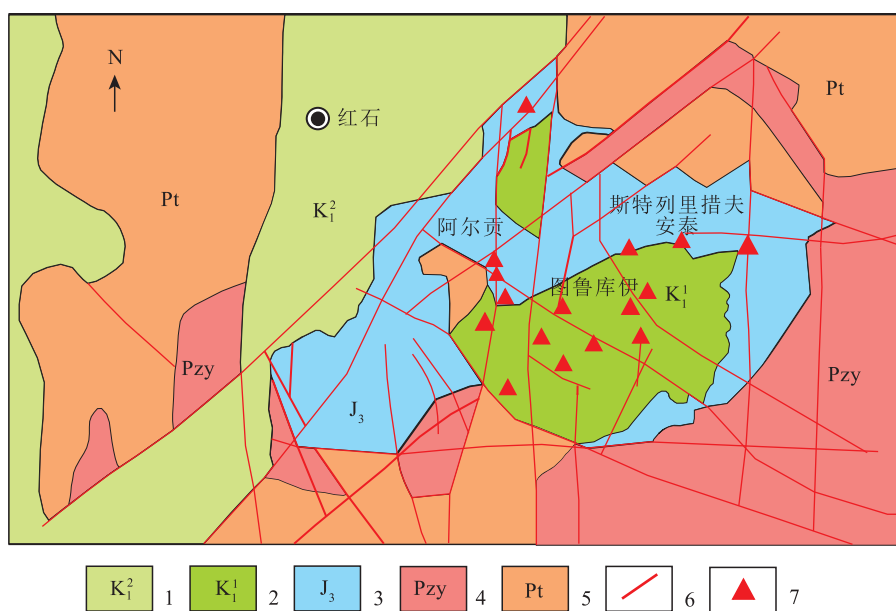


图 4 俄罗斯斯特列措夫铀矿田地质略图(据薛伟,2019)

Fig. 4 The geological sketch map of Streltsovsky uranium ore-field in Russia

1—含煤沉积岩;2—上层火山—沉积岩;3—下层火山—沉积岩;4—花岗(质)岩;5—变质岩;6—断层;7—铀矿床

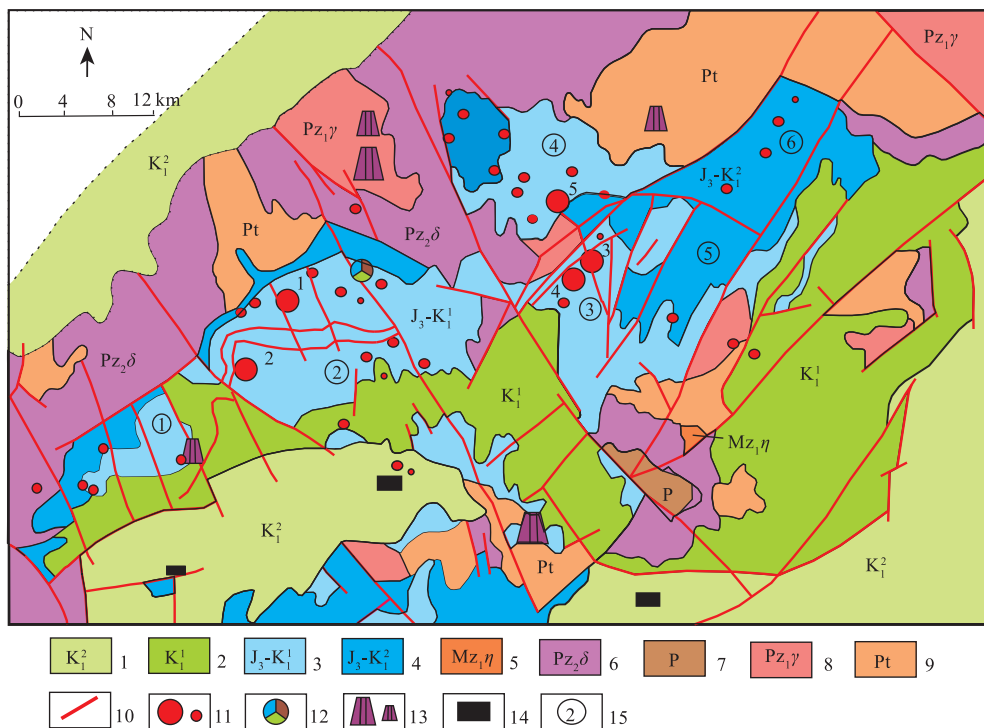


图 5 蒙古东部多尔诺特矿田地质略图(据薛伟,2019)

Fig. 5 The geological sketch map of Dornott ore-field in Eastern Mongolia

1—下白垩统陆源含煤沉积;2—下白垩统安山玄武岩、粗面安山岩;3—上侏罗统—下白垩统(中亚层)流纹岩、流纹质角砾岩、熔结凝灰岩、沉凝灰岩;4—上侏罗统—下白垩统(下亚层)安山玄武岩、流纹英安岩、粗面英安岩、流纹斑岩、熔结凝灰岩、凝灰岩夹砾岩、砂岩和粉砂岩层;5—早中生代杂岩;二长岩、正长闪长岩、花岗正长岩;6—晚古生代杂岩;闪长岩、花岗闪长岩;7—二叠系英安岩、流纹岩和沉积岩;8—早古生代花岗岩、花岗闪长岩;9—元古代片岩、角闪岩、花岗片麻岩、混合岩;10—断层;11—铀矿床(1—古尔万布拉克;3—多尔诺特;5—马尔达因戈利)、矿点、已圈出含铀区段(2—尤哥—扎帕得;4—哈瓦尔);12—多金属矿;13—萤石矿床、矿点;14—褐煤;15—多尔诺特火山盆地主要构造块段:

①—布东;②—乌兰;③—埃尔基因;④—马尔达加哥尔;⑤—查干诺尔;⑥—乌尔顿

东金矿聚集区(图 7),总体上是老地层基底上发育有玲珑、昆崮 2 个岩浆杂岩(主体为多期次花岗岩),后被深大断裂切过并经多次活动改造,围绕 2 个岩浆杂岩体分布有许多富大金矿床(吕古贤等, 2016;胡宝群等, 2021;宋明春等, 2022)。

上述这些富大热液矿田(床),有一些共同特征:①3 个构造层式的结构,即基底层、岩浆杂岩层(或体)、盆地盖层,对应 3 个主要演化阶段。在研究富大热液矿田时,可以把含矿的岩浆杂岩作为中间层,之前的为基底层,之后为盖层,相对应的为 3 个演化阶段。②出现 2 期特征差别较大的成矿期,早期高温、晚期低温 2 个成矿期次,前者多与岩浆杂岩形成有关,后者多与沉积盆地相关,且受控盆断裂活动及盆地脱水影响,盖层盆地演化阶段对富大矿床成矿作用有较大的影响,甚至是不可或缺。③这些矿田总体上可简化为一个岩浆杂岩体加上一条深大断裂的组合方式,即“一刀加一饼”的构造与含矿主岩组合的模式。“一饼”是多期次的岩浆杂岩(体),常是不规则圆、椭圆形态的多期次活动的岩浆杂岩,可以是火山杂岩,也可以是侵入杂岩,岩浆杂岩(体)隆起特征明显,且为多期次、差异性隆起;“一刀”多为一组大致平行的、活动时间长且多期次活动的深大断裂带。④构造控岩控矿特征明显。微观上矿体就是断裂充填物或交代蚀变的断裂破碎带等;宏观上深大断裂多次活动不仅控制着含矿主岩、次火山和脉岩及盆地沉积岩形成过程,还控制着不同期次的蚀变、成矿等。

2.2 深大断裂-临界水耦合成矿机制对富大热液矿床成矿的分析

矿床形成的影响因素很多,如地层、岩浆岩、构造、热液、蚀变、物源、物理化学条件等,这些因素或多或少地对成矿富集和保存及破坏等有一定影响,如何研究才能有所新发现?思路很重要。在广泛研究富大矿床地质特征的基础上,抓住几个关键因素或过程,分析成矿主要过程,探索成因,或许能得出一些新认识,为找矿突破提出一些新方向。

通过大量的研究,提出热液矿床水相变控矿理论(胡宝群等, 2009; 2011b),认为在热液矿床大规模成矿或形成富大矿床研究时,聚焦考虑深大断裂降压和临界水这 2 个主要因素(胡宝群等, 2021)。

(1) 富大热液矿床的深大断裂-临界水耦合成矿的大致过程

首先,含矿主岩岩浆杂岩的形成。深大断裂活动,特别是在断裂相交部位,因降压而重熔形成“下小上大”的蘑菇状侵入岩或火山岩,并发生抬升隆起。其岩性主要取决于当地背景岩性和断裂下切的深度,因深大断裂减压、升温、聚水相关而成,下切的深度越大,形成的岩性就可能偏向基性,深度小则偏向为酸性;背景岩性可能是老变质岩,或为已形成的侵入或火山岩。其次,早期高温成矿作用的形成。深大断裂活动,改变了区域内的力学状态,有减压、升温、聚水作用,改造已形成的岩浆岩等背景区岩性,形成不同期的岩浆杂岩,甚至可能形成新的火山岩、次火山岩等。这个阶段可能形成早期高温的成矿作用。再次,晚期中低温成矿作用的形成。因深大断裂垂向活动或水平调整,区域上伸展而成盆地,垂向上加大地压梯度,导通晚期低温热液或热水,改造已有的岩性并溶解矿质等,在地压梯度的驱动下,含矿热液向浅部运移,在减压空间沉淀成矿。最后,深大断裂继续活动,区域继续隆起抬升,继承和改造矿田内原有的构造和岩性,加上岩性及构造破碎程度不同而出现差异性剥蚀,岩浆杂岩剩余根部,“饼”状隆起形成,与深大断裂一起组成“一刀加一饼”式含矿主岩与深大断裂的组合。富大热液矿床的“刀加饼”式的含矿主岩与深大断裂形态组合,不仅是外在形式上构造与岩浆杂岩的组合,而且有成矿机理上的内在联系,是深大断裂-临界水耦合成矿机制在形态上的具体表现。

深大断裂-临界水耦合成矿机制的核心内容是:深大断裂活动,有降压、升温、聚水三重作用,可能驱动物质运移和相关组分的一、二级相变,固-熔体之间的一级相变形成岩浆杂岩主体,水的一、二级相变形成蚀变和成矿(活化、迁移、沉淀);深大断裂(及派生次级断裂)是成岩成矿物质运移的通道及场所,还控制着红盆和火盆的形成和形态。深大断裂-临界水耦合成矿机制是构造控岩控矿(或成岩成矿)的具体过程(胡宝群等, 2009; 2011a, b; 2021; 吕古贤等, 2016; 吕古贤, 2019)。

(2) 富大热液矿田常有 3 个主要构造层和构造演化阶段

①基底构造层(或体)的形成阶段,这个阶段可

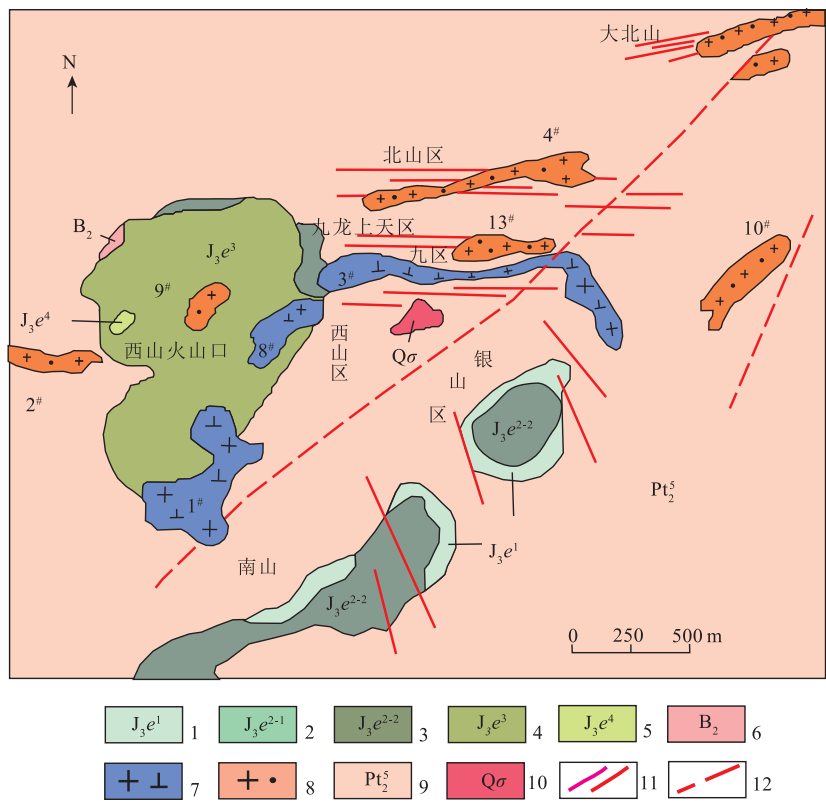


Fig. 6 The geological sketch map of Yinshan ore-field in Jiangxi Province
1—千枚质角砾岩;2—流纹质集块岩;3—角闪流纹岩;4—英安质角砾岩、角砾熔岩;5—安山玢岩;
6—爆破角砾岩;7—英安斑岩;9—双桥山群千枚岩;10—变质石英闪长岩;11—矿脉;12—断裂

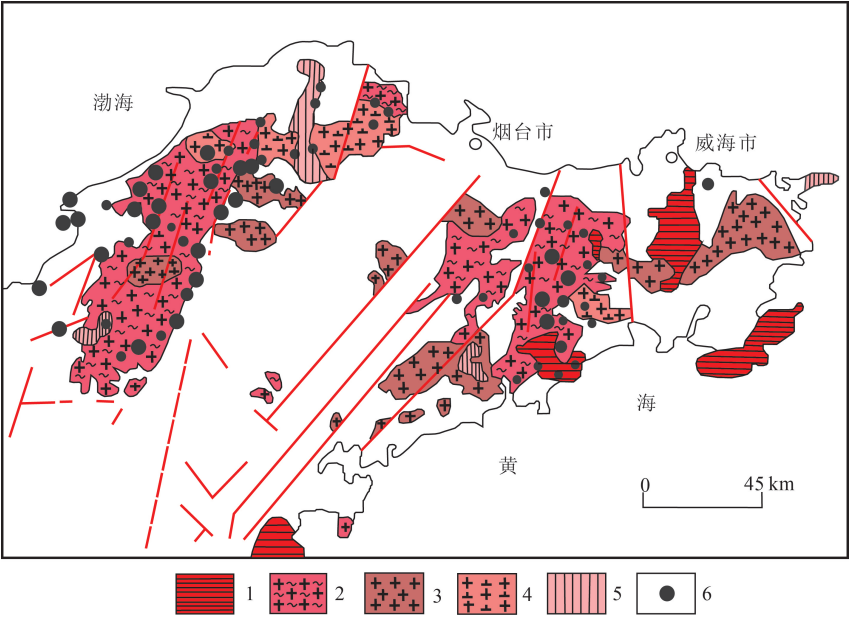


Fig. 7 The distribution map of gold deposits in Jiaodong, Shandong Province
1—印支期-燕山期侵入岩;2—玲珑-崑崙山型似片麻状黑云母花岗岩;3—栾家河型和伟德山型中粗粒二长花岗岩;
4—郭家岭型似斑状花岗闪长岩;5—崂山-艾山花岗岩;6—金矿

能很长;②含矿主岩构造层的形成阶段,形成岩浆杂岩隆起,这个构造层遭受构造尤其是断裂的破坏,导致热液活动,有强烈的蚀变,可形成早期高温成矿期;③盆地盖层的形成阶段,形成中低温热液蚀变和成矿,沉积盆地盖层不仅只起到覆盖保矿作用,还可提供大量的热液和矿质来源,是晚期中低温热液蚀变和成矿的主要物质来源,推断是形成富大矿田不可或缺的因素。在多数情况下,早期成矿和晚期成矿 2 期叠加才能形成大矿和富矿,仅有早期成矿多形成低品位、大而分散的矿化(胡宝群等, 2015;2021)。

(3)富大热液矿田多有“一刀加一饼”式深大断裂与岩浆杂岩的构造-岩性组合模式

岩浆杂岩隆起作为含矿主岩再叠加深大断裂的组合,是前述许多富大热液矿床的共性。这些矿床,总体是一个岩浆杂岩岩盘,叠加上一条多期次、长期活动的深大断裂。控岩控矿的深大断裂与岩浆杂岩组合可通俗称为“一刀加一饼”组合模式(胡宝群等,2021)。两者组合有内在联系,受区域大地构造演化的控制,具有重要的成岩成矿意义。

含矿主岩的形态特征,对成矿和找矿有很大的意义。根据含矿主岩的形态特征或含矿主岩与主要控矿构造组合等方面研究,多年来学者们提出了一系列的创新性概念及其相关联的成矿理论,形象、直观且通俗易懂,诸如变质核杂岩体、穹窿、穹窿带、热点、热穹窿、热窿、隆起、穿刺体、爆破角砾岩筒、小岩体(成大矿)、小斑岩(成大矿)、红盆和火盆(实为火山杂岩隆起)等(李子颖,2006;吕古贤等,2016;付建等,2018;肖凡等,2021;胡宝群等,2015;2021;Li et al.,2022)。近年有学者提出“岩浆核杂岩隆起-拆离带”成矿模式(吕古贤等,2016),可与变质核杂岩的构造-岩性组合类比,两者都表现出相似的深大断裂与(岩浆或变质)核杂岩隆起组合“一刀加一饼”的外形。为什么会有如此形态上的共性?据多年的研究,推断为点状降压所致(胡宝群等,2017)。作为含矿主岩的岩浆杂岩隆起,总体上多发育于变质岩基底中,是由不同时期的侵入杂岩或火山杂岩组成;有多期的岩浆活动叠加,常是深大断裂早期、切至中下地壳及以下深度时降压、升温、聚水共同作用的结果;之后深大断裂可能再次活动,引发岩石重熔,或由于高温热液改造而形成岩浆杂岩体。岩浆杂岩不仅是 3 个构造层中的含

矿核心层,还是矿床集中分布所围绕的核心。

深大断裂既控岩又控矿(胡宝群等,2011a;2015;2017;2021):深大断裂可作为矿质和流体等成矿物质的通道或沉淀的场所,是被广泛认可的;但在此特别强调,深大断裂还控制着含矿主岩的形成,深大断裂降压作用导致压力差而聚水、升温,可使断裂深部周边物质重熔或改造而成岩浆杂岩,诸如花岗岩补体实则是经高温热液局部改造后的花岗岩(胡宝群等,2001);深大断裂降压,加大垂向和横向上的地压梯度,以及降压、升温加大矿物脱水的可能,从而增加了形成热液的能力,当热液向浅部运移后,发生水岩反应形成相应的蚀变,甚至在局部地段发生沉淀成矿。

富大热液矿床“一刀加一饼”的深大断裂与岩浆杂岩含矿主岩的形态组合模式,是有内在关系的组合,是断裂构造控岩控矿的具体表现(吕古贤等,2016;胡宝群等,2009;2011a, b;2021;吕古贤,2019)。深大断裂不仅是通道,还是岩浆杂岩形成及成矿、蚀变热液活动的原因。成矿过程总体上会分为 2 期次,即早期与岩浆杂岩相关,后期则与控盆地断裂活动有关。

(4)巨量热液的必要性

富大热液矿床,在成矿过程中必须有大量的热液参与,且绝大多数热液以水为主体。水由地下向浅部运移过程中一定会经过水临界温度,在深大断裂降压和升温作用下,可能引发水的一、二级相变,造成水对矿质溶解度的突变,从而促使矿质在很小的时空范围内沉淀成矿(胡宝群等,2009;2011b;2021)。

(5)矿质沉淀空间

矿质沉淀场所要相对狭小,或者沉淀机制稳定且作用时间长,或者矿质活化时间长而沉淀过程迅速,否则难以形成富大矿床。矿体或矿床,常不是直接赋存于深大断裂中,而是产在次一级断裂中,一方面是沉淀机制所决定的,在较小的降压空间,引起水的相变才有可能在不大的空间中形成富大矿体(Weatherley et al.,2013;胡宝群等,2017);另一方面是深大断裂长且深,若矿质分布空间过大,难于形成很高的富集系数,则可能只是一些大空间的弱矿化。若有某种长期、重复多次作用的机制,不断地从围岩中溶解活化铀,之后又在狭小的空间沉淀成矿,就有可能在狭小的空间内超强、超大富集

成矿。

(6) 深大断裂多期活动是富大矿床成矿和找矿研究的重点

所论及的深大断裂, 规模至少要切到中下壳, 长度多以上百千米计。一个地区的地质演化, 或一个富大矿床的形成, 影响因素很多, 深大断裂的多期次活动是重点, 因其深和大, 通常是区域力学体系的变化即大地构造运动的反映, 对较大区域内的成岩、成矿、流体活动等产生很大的影响, 因此以其为地质演化研究的主线讨论相关的成岩成矿过程。

从另外一个角度看, 要形成富大热液矿床, 必须要有大量的热液及热量来源, 就必须要有深大断裂, 甚至可以不要大型岩浆杂岩体(也多是深大断裂降压重熔而来)。因此, 可以通过矿田这个级别的深大断裂活动期次分析成矿期次及其成矿作用过程。

据热液矿床水相变控矿理论(胡宝群等, 2009; 2011a, b; 2017; 2021), 构造降压是热液成矿的必要条件, 事实上几乎所有热液成矿过程和建模都要有降压, 因深大断裂活动是降压、升温、聚水的过程, 其切至深部引发固-熔体相变而产生不同性质的岩浆杂岩, 还可聚水并向浅部低温压地区运移, 引发水的二、一级相变而控矿。因此从这个角度看, 要形成富大热液矿床必须要有深大断裂的活动, 所以也称这是富大热液矿床的深大断裂-临界水耦合成矿模式。

2.3 对富大热液铀矿找矿的探讨

结合铀矿地质勘查规范, 国内现在热液型铀矿找矿的出路主要是找富(0.3%以上)、大(3000 t以上)铀矿床, 且要找大脉型矿床(即一条矿脉占整个矿床储量的60%以上、大于500 m长×250 m垂幅深)。

要形成大型甚至超大型矿床, 就必须要有大量矿质来源和热液。按形成3000 t铀金属量矿床估算所需要的热液总量, 水中铀的浓度按一般pH值为4~9, 热液中U金属为5 mg/L(大致变化于1~10 mg/L之间)(王哲等, 2022), 需要有 6×10^8 t(0.6 km³)含铀热液; 若要形成万吨级铀矿床, 则需要 20×10^8 t(2 km³)含铀热液; 若要形成 3×10^4 t级铀矿, 则需要 60×10^8 t(6 km³)含铀热液。

铀要超强富集, 即富集系数要大。U的克拉克值为 3×10^{-6} (变化于 2×10^{-6} ~ 4×10^{-6} 之间, 分别形成0.3%、1.0%、3%的富集系数就要达到1000、3333、

10000。如此高的富集程度, 要么沉淀机制稳定且作用时间长, 要么就要有沉淀迅速(胡宝群等, 2009; 2011b; 2017; 2021; Weatherley et al., 2013)的特殊机理(如二级相变), 或多期次、长时间成矿叠加, 否则即使有大量的含铀热液也只能形成大而不富的矿床。

要形成富大铀矿, 还要形成主大脉矿体(大于500 m长×250 m垂幅深), 就意味着虽然是深大断裂控矿, 但沉淀场所必须为狭窄的断裂空间。即便有充足的成矿物质或热液, 若产于宽阔的上百千米长的断裂带中, 也只能形成大而不富的矿床, 或只能算矿化, 或只称得上初步富集。

总之, 深大断裂多次活动、大量的含矿热液、狭小的沉淀空间、快速或长期稳定的沉淀机制等, 是形成富大热液矿床的基本条件。

中国内蒙古东北部的大片中酸性火山杂岩, 与俄罗斯斯特列措夫和蒙古多尔诺特铀矿田紧邻, 同属额尔古纳成矿带, 处于世界最大的火山岩型铀成矿带中。但在中国境内这一大片火山杂岩中却一直没有找到大型、超大型热液铀矿床。富大铀矿找矿能否有大突破, 原因还是富大矿床的主控因素及主要成矿过程不清楚。对中国相山、下庄、诸广, 俄罗斯斯特列里措夫和蒙古多尔诺特等已知的大矿田, 不断总结成矿共性和规律, 分析主控因素和主要成矿过程, 了解铀矿床所在地区的地质演化等, 或许能提出一些新思路。以深大断裂-临界水耦合成矿的新认识, 重新梳理找矿未突破地区的地质特征, 结合投入相应的工作量, 或能实现找矿突破。

3 结 论

(1) 总结了相山铀矿田的主要地质特征, 指出145 Ma以来相山矿田的成岩成矿演化可分为3个阶段, 相山铀矿田中岩浆岩的演化、铀多金属热液成矿过程主要受德兴-遂川深大断裂及其次级断裂控制。深大断裂多期次活动, 控制着相山火山杂岩的形成; 深大断裂的降压、升温、聚水, 形成矿质和热液等成矿物质运移通道及沉淀场所, 控制着红化、绿化的蚀变, 引发水相变, 控制着矿质活化、迁移和沉淀。

(2) 深大断裂切穿含矿主岩隆起(多为岩浆杂岩)的构造-岩性组合, 3个构造层的岩性组合, 是大

规模成矿和富大热液矿床的 2 个常见特征。要形成超大富矿床,总体上是岩浆杂岩体加上一组深大断裂,即“一刀加一饼”的模式,“饼”是多期的岩浆杂岩,“刀”则是一组时间长且多期次活动的断裂带。富大矿体和矿床主要定位于 2 期或多期次构造交汇的降压空间。

(3)按深大断裂-临界水耦合控矿思路,对岩浆杂岩体中的成矿作用进行了分析,探讨了富大热液矿床的主要控矿因素和成矿过程,并通过深大断裂活动期次分析富大热液成矿期次和成矿过程。在富大热液矿床形成过程中,深大断裂多期次活动控制着相关的成岩成矿作用。

致谢: 特别感谢两位审稿专家提出的宝贵修改意见;感谢中核抚州金安铀业有限公司的工程技术人员在工作中给作者团队的无私帮助。

参考文献

- Bonnetti C, Liu X D, Mercadier J, et al. 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 mineralisation[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 92: 588-612.
- Li W C, Zhang X F, Yu H J, et al. Geology and mineralization of the Pulang supergiant porphyry copper deposit (5.11 Mt) in Shangri-la, Yunnan Province, China: A review[J]. *China Geology*, 2022, 5(4): 662-695.
- Petrov V A, Rebetsky Y L, Poluektov V V, et al. Tectonophysics of hydrothermal ore formation: an example of the Antei Mo-U deposit, Transbaikalia[J]. *Geology of Ore Deposits*, 2015, 57(4): 292-312.
- Weatherley D K, Henley R W. Flash vaporization during earthquakes evidenced by gold deposits [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(4): 294-298.
- 陈正乐, 王永, 周永贵, 等. 江西相山火山侵入杂岩体锆石定年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 217-231.
- 陈祖伊, 张邻素, 陈树崑, 等. 华南断块运动-陆相红层发育期与区域铀矿化[J]. *地质学报*, 1983, 57(3): 294-303.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 等. 相山铀矿田成矿机理研究[J]. *铀矿地质*, 2003, 19(4): 208-213.
- 付建, 李光明, 王根厚, 等. 北喜马拉雅双穹隆构造的建立: 来自藏南错那洞穹隆的厘定[J]. *中国地质*, 2018, 45(4): 783-802.
- 郭福生, 谢财富, 张树明, 等. 江西相山-鹿冈区域地质及铀多金属成矿背景[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- 郭福生, 杨庆坤, 孟祥金, 等. 江西相山酸性火山-侵入杂岩体地球化学特征与岩石成因[J]. *地质学报*, 2016, 90(4): 769-784.
- 胡宝群, 白丽红, 徐达忠. 下庄矿田早期高温热液铀成矿作用[J]. *铀矿地质*, 2001, 17(3): 280-284.
- 胡宝群, 吕古贤, 王方正, 等. 水的相变: 热液成矿作用的重要控制因素之一[J]. *地质论评*, 2009, 55(5): 722-730.
- 胡宝群, 吕古贤, 孙占学, 等. 江西相山铀矿田中断裂与水相变耦合成矿——以邹家山矿床铀成矿作用分析为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2011a, 35(4): 502-512.
- 胡宝群, 吕古贤, 孙占学, 等. 热液矿床水相变控矿理论初探[J]. *地质通报*, 2011b, 30(4): 565-572.
- 胡宝群, 邱林飞, 李满根, 等. 江西相山铀矿田构造-岩浆演化及其成矿规律[J]. *地学前缘*, 2015, 22(4): 29-36.
- 胡宝群, 王倩, 吕古贤, 等. 岩石圈中的降压作用及其相变过程[J]. *地学前缘*, 2017, 24(2): 31-39.
- 胡宝群, 高海东, 王运, 等. 胶东中生代巨量金矿堆积的深大断裂临界水耦合成矿机制新探[J]. *地质力学学报*, 2021, 27(4): 585-595.
- 胡荣泉, 徐金山, 贾志远, 等. 浅谈邹家山-石洞断裂带成矿条件及其控矿特征[J]. *东华理工大学学报: 自然科学版*, 2013, 36(2): 113-119.
- 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 等. 华南白垩-第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 153-160.
- 黄锡强, 陈正乐, 王平安, 等. 江西相山铀矿田沙洲矿床流体包裹体研究[J]. *地质力学学报*, 2008, 14(2): 176-185.
- 黎广荣, 郭福生, 金腾瑞, 等. 江西省峡江-广丰地区白垩纪红盆-火山盆地成矿的制约探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(3): 542-557.
- 李晓光. 满洲里地区中生代岩浆作用与铀成矿远景分析[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2020.
- 李子颖, 钟军, 蔡煜琦, 等. 乌克兰地盾超大型碱交代型铀矿床特征及热点深源成矿模式[J]. *铀矿地质*, 2020, 36(4): 217-240.
- 李子颖, 张万良. 江西相山矿田主要铀矿化类型及其地球化学特征对比研究[J]. *现代地质*, 2016, 30(1): 1-16.
- 李子颖. 华南热点铀成矿作用[J]. *铀矿地质*, 2006, 22(2): 65-69, 82.
- 刘云鹏, 郭春影, 秦明宽, 等. 基于 PCA-SVM 算法对稀土元素与稀土判别指标耦合数据集的铀矿床分类[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(3): 723-733.
- 罗毅, 王正邦, 周德安. 额尔古纳超大型火山热液铀成矿带地质特征及找矿前景[J]. *华东地质学院学报*, 1997, 20(1): 1-9.
- 吕古贤, 李洪奎, 丁正江, 等. 胶东地区“岩浆核杂岩”隆起-拆离带岩浆期后热液蚀变成矿[J]. *现代地质*, 2016, 30(2): 247-262.
- 吕古贤. 构造动力成岩成矿和构造物理化学研究[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(5): 962-980.
- 邱爱金, 郭令智, 郑大瑜, 等. 江西相山地区中、新生代构造演化对富大铀矿形成的制约[J]. *高校地质学报*, 1999, 5(4): 418-425.
- 邱林飞, 欧光习, 张敏, 等. 相山居隆庵矿床铀成矿流体特征及其来源探讨[J]. *矿床地质*, 2012, 31(2): 271-281.
- 宋明春, 杨立强, 范宏瑞, 等. 找矿突破战略行动十年胶东金矿成矿理论与深部勘查进展[J]. *地质通报*, 2022, 41(6): 903-935.
- 万天丰, 赵庆乐. 中国东部构造-岩浆作用[J]. *中国科学(D 辑): 地球科学*, 2012, 42(2): 155-163.
- 王哲, 朱建林, 张怀胜, 等. 赣杭构造带某铀矿区地下水中铀的存在形式研究[J]. *辐射防护*, 2022, 42(1): 19-24.
- 吴赞华. 江西相山铀矿田构造特征及铀成矿作用研究[D]. 成都理工大学博士学位论文, 2015.
- 肖凡, 王恺其. 德兴斑岩铜矿床断裂与侵入体产状对成矿的控制作

- 用:从力—热—流三场耦合数值模拟结果分析[J].地学前缘,2021,28(3):190-207.
- 徐海江,单林.相山及其邻区火山岩岩性特征及成因探讨[J].华东地质学院学报,1984,7(1):1-19,21-27.
- 薛伟.沽源—红山子铀成矿带中段铀矿地质特征与成矿规律研究[D].中国地质大学(武汉)博士学位论文,2019.
- 阎鸿铨.斯特列措夫矿田一个大型—超大型铀矿床群在苏联时期是怎样被发现和被勘探的[J].吉林大学学报(地球科学版),2019,49(4):909-923.
- 杨水源.华南赣杭构造带含铀火山盆地岩浆岩的成因机制及动力学背景[D].南京大学博士学位论文,2013.
- 张树明,王蕾,蒋振频,等.邹家山铀矿床流体包裹体研究[J].铀矿地质,2009,25(5):263-269.
- 张万虎.江西银山矿田九龙铅锌矿带深、边部成矿预测研究[D].湖南科技大学硕士学位论文,2011.
- 张万良.华南红盆与铀矿保存[J].矿产与地质,2007,21(2):118-121.
- 张万良.盛源盆地铀成矿特征与成矿模式[J].江西地质,2000,(2):113-122.
- 周聪.相山火山盆地主要断裂构造特征研究[D].东华理工大学硕士学位论文,2013.
- 周永恒,刘长纯,吴涛涛,等.俄罗斯后贝加尔地区火山岩型铀矿地质特征与找矿模型[J].地质与勘探,2018,54(6):1238-1246.

《地质通报》第 42 卷第 5 期要目预告

- 南黄海盆地崂山隆起中南部海底沉积物饱和烃类地球化学与热成因烃类输入 李双林等
- 构造特征对南川地区页岩气保存条件的影响 张勇等
- 平庄盆地黑水地区氧化作用与铀成矿地质特征 董方升等
- 新疆塔城结勒迪克增闪长岩体特征及其含矿性研究 刘伟等
- 北山白头山铀矿赋矿花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、分异演化过程及成矿意义 吴世保等
- 青藏高原冰湖溃决灾害隐患识别、发育规律及危险性评价 汤明高等
- 川藏铁路雅安至昌都段泥石流发育特征及选线对策分析 袁东等
- 浙江治岭头地区玄武岩年代学、地球化学特征及构造背景 刘汉仑等
- 伊犁地块北缘早石炭世阿拉斯坦闪长岩的成因及其构造意义 王盟等
- 西藏拉萨地块盐湖复式岩基中花岗斑岩的成因及其对班—怒洋闭合时限的制约 史仲明等
- 北大别山仙桥中生代酸性火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 同位素年龄及成矿构造背景 骆亚南等
- 山东旧店金矿床花岗岩类锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 牛警徽等
- 赣杭铀成矿带马荃盆地安山岩年代学、地球化学特征及岩石成因 祝东等
- 结合 BERT 与 BiGRU-Attention-CRF 的地质命名实体识 谢雪景等