

# 我国铀矿地质科技近十年的主要进展

李子颖, 秦明宽, 范洪海, 蔡煜琦, 程纪星, 郭冬发, 叶发旺, 范光, 刘晓阳

核工业北京地质研究院, 北京 100029

**摘要:** 本文总结了近十年我国铀矿地质工作的主要进展, 包括铀矿成矿理论创新、铀成矿类型和成矿区带划分、全国铀资源潜力评价、主要工业铀矿类型研究评价、相山科学深钻、零价态金属铀的发现及新矿物发现等; 论述了砂岩型铀矿快速评价、热液型铀矿攻深找盲、大数据找矿、遥感高光谱、钻探工艺及分析测试等技术创新成果; 概述了依据理论创新及技术方法集成创新在国内外铀矿找矿领域的重大突破; 展望了铀矿地质发展方向。

**关键词:** 铀成矿理论; 铀矿勘查技术; 铀矿找矿进展; 展望

中图分类号: P619.14 文章编号: 1007-2802(2021)04-0845-13 doi:10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.057

## Main Progresses of Uranium Geology and Exploration Techniques for the Past Decade in China

LI Zi-ying, QIN Ming-kuan, FAN Hong-hai, CAI Yu-qi, CHENG Ji-xing, GUO Dong-fa,

YE Fa-wang, FAN Guang, LIU Xiao-yang

Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

**Abstract:** The main progresses of both uranium geology and exploration techniques for the past decade in China have been summarized in this paper. They include the innovation of metallogenic theories, the classification of uranium metallogenic types and zonations, the evaluation of China's national uranium resource potential, the research and evaluation of main industrial types of uranium deposits, the Xiangshan scientific deep drilling for exploring uranium resource, and the discovery of zero-valent native uranium and new uranium minerals etc. Then, exploration techniques including technical innovation on fast evaluation and exploration of both sandstone-hosted and hydrothermal uranium deposits, hyperspectral remote sensing technology, drilling techniques, big data mining, and chemical analysis, have been described. In addition, an overview of major breakthroughs in domestic and overseas uranium prospecting using those innovative metallogenic theories and techniques has been given. Finally, the development tendency of uranium metallogeny and exploration techniques has been discussed.

**Key words:** uranium metallogenic theory; uranium exploration techniques; uranium exploration progress; development tendency

## 0 引言

近十年来,我国铀矿地质科技工作者继承和发展了铀矿成矿理论,基于我国较复杂的地质构造背景,在砂岩铀矿成矿理论方面,突破了美国学者提出的“卷状砂岩铀成矿”和前苏联学者提出的“次造山成矿”理论,提出了“叠合复成因”和“构造活动带成矿”理论;在热液铀成矿方面,创立了“热点深源铀成矿”理论,推动了我国铀矿找矿的重大突破。

在铀矿成矿规律和预测评价方面取得系列进展和突破。结合我国传统的分类和国际上铀矿的划分方案,对我国铀矿成矿类型和成矿区带进行了重新划分;针对我国发现的不同类型铀矿床,系统建立了各类型的矿床式和成矿模式,建立了铀矿资源潜力评价技术方法,完成了全国铀矿资源潜力评价以及重点成矿区带的动态评价,基本摸清了我国主要铀矿类型的铀资源潜力,提交了一批成矿远景区和找矿靶区;对我国主要工业铀矿类型砂岩型、

花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型铀矿进行了系统研究评价,总结了我国 60 多年来铀矿勘查工作进展和铀矿成矿规律。

在铀矿勘查技术方面,首次建立了我国热液型铀矿攻深找盲技术体系,构建了大型层间氧化带型砂岩铀矿快速评价技术方法体系,优选出适宜于砂岩铀矿成矿环境和条件的不同探测对象的技术方法,实现了地质、遥感、地球物理和地球化学及信息集成处理等多项技术的有效配置;结合计算机信息技术,基本建立了大数据找矿技术方法,向多元大数据的三维数字化-集成化-智能化-信息化预测、找矿迈进。在高光谱遥感方面,核地质系统已形成颇具特色的航空全谱带高光谱测量和应用能力以及地面-钻孔岩心成像光谱编录能力,并开发了一系列技术方法;在钻探装备及施工技术、地浸工艺孔施工技术、铀资源勘查钻探工艺等领域开展了一系列技术研发工作,成功研制了高效、耐久钻头和交流变频电动顶驱式地质岩心新型钻机以及复合式液动冲击器等;核地质分析测试新方法、新技术不断发展,总的向微区更微、精度更高,由二维向三维方向发展,包括二次离子质谱分析技术、FIB-TOF-SIMS 联用技术和基于 X-CT 的岩心三维扫描及铀矿物识别技术等。

理论创新与生产实际密切结合,实现了国内外铀矿找矿的重大突破,使我国砂岩铀矿资源占比由过去的第三位跃升为第一位,热液型铀矿深部取得重大突破,扩大了铀资源量;这些进展和成果也为海外走出去提供了理论和技术支撑,如承担了中沙双边国际合作项目—沙特铀钍资源调查评价项目,实现了铀、钍、铀、钍等找矿的重大突破。

## 1 铀矿成矿理论创新

我国铀矿地质工作始于 1955 年,经过 65 年的发展,已建立起完整的铀矿地质科研和勘查技术体系,在全国发现了砂岩型、花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型(黑色页岩型)铀矿床 350 多个(张金带等,2018),为新中国国防建设和核能发展做出了历史性贡献。

近十年来,我国铀矿地质科技工作者基于我国较复杂的地质构造背景,发展了砂岩铀矿成矿理论,提出了“叠合复成因”和“构造活动带成矿”理论(Li et al., 2008; 李子颖等, 2009, 2019; 张金带, 2016);在热液铀成矿理论方面,创立了“热点深源铀成矿”理论(李子颖等, 1999, 2014a; 李子颖, 2006)。这些工作不但指导推动了我国铀矿找矿工

作的重大突破,而且为世界铀矿地质科技的发展做出了贡献。

### 1.1 叠合复成因砂岩铀成矿

中生代以来,由于受北部西伯利亚、东部太平洋和西南部印度三大板块的夹持碰撞和俯冲作用,造就了我国及其复杂的地质构造演化特征,表现为时间上的多期多阶段,空间垂向上的叠置复合、水平上的差异非均质,且构造活动频繁幅度大。这些特征对我国中生代盆地砂岩型铀矿的形成具有直接的影响,反映在鄂尔多斯盆地北部超大型砂岩铀矿成矿地质特征上,如发现该区铀矿化产于侏罗系直罗组灰绿色砂岩与灰色砂岩之间的过渡带中,矿化目标层砂岩颜色均呈还原色调,矿石中铀矿物主要是铀石,此外还在矿石中发现了大量的多期次油气包裹体,这些特征不同于一般的砂岩型铀矿床,我国学者据此提出了“砂岩铀矿叠合复成因”成矿理论和模式(Li et al., 2008; 李子颖等, 2009, 2019)。

鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿的成矿过程非常复杂,经历了构造的多期次的“动-静”耦合、潜水氧化与层间氧化成矿作用的叠加、油气-热流体的复合改造等地质成矿作用(Li et al., 2008)。砂岩型铀矿叠合复成因成矿主要体现在铀源的叠合、铀成矿流体的叠合和铀成矿作用的叠合方面(Li et al., 2008; 李子颖等, 2009, 2019),其主要内容包括如下几个方面:

(1) 铀源的叠合。主要是指成矿物质铀源来自蚀源区、含矿层和深部油气流体;铀的迁移形式除了碳酸铀酰络合物外,有机酸对铀迁移也具有重要作用,铀的富集是载铀成矿流体在流经特定场所时,由于吸附和还原作用,使铀卸载、富集沉淀。影响含铀成矿流体条件改变和氧化还原作用的重要介质是还原物质,如有机质,它对铀沉淀的作用主要是还原和吸附。

(2) 铀成矿流体的叠合。铀矿的形成经历了大气降水、油气流体和热流体等多种流体作用的叠合,但主体上是由氧化还原作用形成,油气作用是多期次的,它们与铀成矿作用主要表现在三个方面:一是在铀成矿作用时,油气(主要是深部上升的还原气体)形成地球化学还原障促使铀还原沉淀;二是在主要铀成矿作用后,油气的强还原作用导致原氧化砂岩再次被还原,即二次还原,使氧化色砂岩变成还原色的灰绿色砂岩;三是提供一定的铀源,该矿床在铀成矿后,还经历了较强的热流体改造作用,形成了黄铁矿、方铅矿和闪锌矿等低温矿

物组合,使原先沉淀富集的铀重新组合形成铀石。

(3) 铀成矿作用的叠合。鄂尔多斯砂岩型铀矿化的形成经历了原生铀的预富集、潜水氧化与层间氧化成矿作用及油气-热流体的复合改造等成矿作用,预富集阶段发生在 170 Ma,古潜水氧化作用发生在 135~160 Ma,古层间氧化作用阶段发生在 65~125 Ma。矿床形成后,大约在 8~20 Ma 发生了较强烈的热改造作用,叠合复杂的成矿过程使该铀矿床具有上述独特的地质特征。

## 1.2 构造活动带砂岩铀成矿

根据美国、前苏联的成矿理论,构造活动带难以成矿。近十多年来,我国学者通过对我国产铀盆地地质构造和铀成矿特征及成因的系统研究,创新性地构建了多种构造活动背景下的铀成矿模式,提出了构造活动区(带)砂岩型铀成矿理论,打破了构造活动带不能成矿的传统认识,继承发展了前苏联学者提出的“次造山砂岩铀成矿作用”理论,其核心内容包括:①砂岩铀矿形成于构造动力由伸展到挤压的转换阶段,前者有利于含矿建造形成,后者有利于砂岩型铀矿成矿的改造;②构造活动是砂岩型铀矿成矿的原动力,可促进铀的活化迁移;③强构造活动区铀再迁移、再沉淀、再富集,在相对较稳定期(一般不少于 2 Ma)可形成砂岩铀矿;④后期构造活动对先前形成的砂岩型铀矿产生“改造富集”和“再造破坏”的双重作用,使砂岩型铀矿的找矿由盆缘拓展到盆中,大大提升了砂岩型铀矿的找矿前景,如鄂尔多斯盆地西部磁窑堡地区、伊犁盆地南缘中段蒙其古尔地区、松辽盆地西南钱家店地区等典型的构造活动带成矿。构造活动带铀成矿模式丰富和发展了砂岩型铀成矿理论,拓展了砂岩型铀矿的找矿空间。

## 1.3 热点深源热液铀成矿

热点一般被认为是地幔柱到达地表之处的作用形式(Wilson, 1963),是在深部热动力作用下或在其影响下较长时间多期次改造深部壳幔物质于地表的综合地质作用,可起源于地壳或地幔的不同深度(李子颖等, 1999, 2010, 2014b; 李子颖, 2006)。热点活动在浅部地壳或地表是以构造、岩浆、沉积、变质和成矿等地质作用的强度来体现,其变化主要取决于热点活动的强弱和发展演化阶段。它不仅控制着地质构造作用,而且也与成矿作用有着密切的关系,因此,它也是地学研究的热点。

热点铀成矿作用是在热点作用或其影响下产生的铀成矿作用,其核心内容包括:①铀是在复杂的多期次岩浆和流体作用过程中在晚期的熔体或

流体中富集。铀是一种不相容元素,模拟计算表明玄武质和流纹质原岩经部分熔融和分离结晶以及流体的萃取分异可使铀富集,甚至达到矿化浓度,这也是铀矿化为什么产在多期次岩浆作用区的原因;②铀主要来自深部,成矿流体具还原性,是具复杂组成的超临界流体。这可由矿石中普遍存在的硫化物和硒化物、较高的钴、镍、铬含量、成矿流体中含较多的还原组分 CO、S、H<sub>2</sub> 所证明;③铀主要以四价的复杂络合物或配合物形式的迁移;④铀的富集沉淀主要是成矿流体在作用于近地表时,由物理化学条件的改变所致;⑤铀成矿主要形成于热点作用晚期产生的伸展构造动力学背景,控制铀矿的核心因素是热点作用与构造作用的叠合,如下庄、诸广、苗儿山、桃山、会昌、相山铀矿田等。成矿区表现于三个典型的异常场特征:应力形变场、交代蚀变场和元素叠置场(李子颖等, 1999, 2010, 2014; 李子颖, 2006)。

热点铀成矿作用不仅从理论上可以很好地解释铀成矿区集中的地质构造作用、交代变质作用、岩浆作用和成矿作用相互之间的成生联系,而且也可解释为什么在同一构造-岩浆带,有的有矿,有的无矿的现象;热液型铀矿成矿深度可达 3 km;热点作用区的构造薄弱带区(构造破碎带区、不同岩性接触界面、渗透地质体)是成矿的有利部位,而与围岩类型关系不大。这一理论大大拓展了找矿空间,对指导热液型铀矿深部找矿突破发挥了重要作用。近期,由核工业北京地质研究院李子颖团队承担的“华南热液型铀矿基地深部探测技术示范”项目在诸广地区实施的长江科钻 1 号钻孔深部取得重大找矿突破,其中在 950 m 发现厚大铀矿体,在 1535 m 发现我国目前最深的工业铀矿化。

## 2 铀矿地质研究、科学深钻及成矿预测进展

### 2.1 铀成矿类型和成矿区带新划分

铀矿床分类是铀矿成矿作用研究和勘查的基础,对实际找矿和理论研究均有重要意义,不同的学者和不同的国家采用的分类原则及方法不尽相同。国际上是以国际原子能机构的分类为代表,其分类原则以主控矿要素为基础,划分了砂岩型、不整合面型、多金属铁氧化物角砾杂岩型、古石英卵石砾岩型、花岗岩型、变质岩型、侵入岩型、火山岩型、交代岩型、表生型、碳酸盐岩型、塌陷角砾岩型、磷块岩型、褐煤与煤岩型和黑色页岩型等 15 大类(IAEA, 2018),为世界各地的铀矿床成矿类型的研

究和类比以及促进找矿工作发挥了重要作用。

我国已发现的铀矿床产出的地质构造背景复杂,岩类众多,传统上按含矿围岩分为砂岩型、花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型四大类,这在我国实际找矿中发挥了重要作用。随着发现的矿床越来越多,特点各异,成因类型复杂,为此,在考虑传统分类的基础上,按成因大类进行了新的分类。按照我国传统的以含矿主岩为主线进行分类,再按成矿环境分亚类(张金带等,2012)将我国铀矿床主要划分为岩浆型、热液型、陆相沉积型和海相沉积型4个大类,继而分为9类21亚类(表1)。在上述9类中,花岗岩型、火山岩型、砂岩型、碳硅泥岩型(又称黑色页岩型)四大类是我国主要铀矿类型,占我国铀资源总量的90%以上。这一矿床类型的划分还兼顾了IAEA和国内铀矿的传统分类方法,对开展科学研究、找矿勘查和潜力评价及国际上的铀矿类型对比具有重要意义。

表1 中国铀矿床类型划分方案

Table 1 Classification of types of uranium deposits in China

大类	类	亚类
岩浆型	伟晶岩型	/
	碱性岩型	/
热液型	花岗岩型	岩体内带亚类
		岩体外带亚类
		岩体上覆盆地亚类
	火山岩型	火山角砾岩筒亚类
		次火山岩亚类
		密集裂隙带亚类 层间破碎带亚类 火山沉积碎屑岩亚类
陆相沉积型	砂岩型	层间氧化型
		潜水氧化型
		沉积成岩型
		叠合复成因型
	泥岩型	/
煤岩型	/	
海相沉积型	碳硅泥岩型 (黑色页岩型)	沉积-成岩亚类
		沉积-外生改造亚类
		沉积-热液叠加亚类 沉积-热液-淋积亚类
	磷块岩型	/

依据铀成矿区带划分方案,全国范围内共划分为4个铀成矿域、10个铀成矿省、49个铀成矿区带。4个铀成矿域是古亚洲成矿域、秦祁昆成矿域、滨太平洋成矿域和特提斯成矿域。10个铀成矿省是阿尔泰-准噶尔成矿省、天山成矿省、塔里木成矿省、祁连-秦岭成矿省、大兴安岭成矿省、吉黑(造山系)成矿省、华北陆块成矿省、扬子陆块成矿省、华东南

成矿省、冈底斯-三江成矿省。

## 2.2 全国铀矿资源潜力评价

近十年来,针对我国发现的不同类型铀矿床,我国学者系统建立了各类型的矿床式和成矿模式,完成了全国铀矿资源潜力评价以及重点成矿区带的动态评价,基本摸清了我国主要铀矿类型的铀资源潜力,这方面取得的重要创新性成果体现在如下5个方面:

(1)结合铀矿床的含矿建造、成矿时代、成矿作用、矿化特征及其产出的地质背景,厘定了我国铀矿床式75个,完成了111个典型矿床的建模,新建立的成矿条件描述模式,具有实用性强的新特色,为全国铀矿资源潜力评价奠定了坚实基础。

(2)划分了铀矿预测类型,确定了不同类型铀矿预测工作区分布范围。在系统研究已知铀矿床的地质、物化探、遥感影像等特征基础上,提出了铀成矿预测类型划分原则,全国范围内厘定铀矿预测类型39个。分类型建立中国砂岩型、花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型铀矿的成矿预测要素和预测评价模型。

(3)建立了全国铀矿资源潜力评价技术体系,确定了铀矿预测区圈定、优选的技术方法以及资源量估算方法和分类、分级原则。全国共优选出预测区342个(张金带等,2015),厘定了一批万吨级不同铀矿类型预测区,为找矿预测提供了坚实的基础。

(4)动态评估预测全国铀矿资源总量超过200万吨,其中砂岩型铀矿预测资源量约占46%,其次为花岗岩型约占22%、火山岩型约占20%、碳硅泥岩型约占9%和其他类型约1%。

(5)开发了“铀矿资源潜力评价数据管理应用系统”(蔡煜琦等,2012),建立了全国铀矿资源潜力评价成果数据库。全面系统地收集了建国以来全国范围铀矿相关的已有地质工作积累的资料,包括地、矿、物、化、遥和有关科研成果等,按照统一技术要求完成了地物化遥等基础类、信息类和成果类图件共3514幅,基本形成了全国铀矿资源潜力评价成果空间数据库。

## 2.3 铀矿地质基础研究创新

自2008年至今,为加强铀矿地质基础研究力度,形成了产、学、研联合攻关的科研模式,中国核工业地质局联合南京大学、成都理工大学、中国地质大学(武汉)、吉林大学和东华理工大学五所高校,针对铀矿地质勘查过程中的基础地质问题进行联合攻关;中国科学院地球化学研究所胡瑞忠研究员为首的技术团队在华南铀成矿作用以及铀矿

物微区原位 U-Pb 年代学研究领域取得了一系列创新性成果和认识。

(1) 凌洪飞等(2015)提出了华南花岗岩型铀矿床形成过程。元古代基底以泥质岩为主的富铀岩石,在印支期时通过地壳部分熔融,形成印支期强过铝的富铀花岗岩;在燕山早期,这些富铀花岗岩受到了广泛的岩浆热事件的影响而发生成矿前的面型蚀变,使含铀副矿物晶格中的铀发生活化成为活性铀,从而成为铀源体;燕山晚期华南岩石圈发生了强烈的伸展、裂解作用,诱发了地壳隆升、断陷和大规模岩浆活动,为铀成矿提供了断裂构造、热源等流体对流循环条件,以大气降水来源为主的高氧逸度流体,在花岗岩铀源体的构造裂隙系统中,经对流循环同时溶解其中的铀,成为含矿热液;当这种热液运移至扭张性、半封闭、并具有还原障的断裂构造中,或遇到深源的还原性热液时,铀发生沉淀积聚富集成矿。

(2) 张成江等(2015)认为,康滇地轴米易海塔地区富晶质铀矿石英脉产于晚元古代受混合岩化作用影响的五马箐组黑云斜长片岩中,受韧-脆性断裂构造裂隙带控制。晶质铀矿形成于温度压力较高及深度较大的地质环境,是高温偏酸性流体在温度缓慢下降的强还原条件下结晶而成的。康滇地轴具有形成高强度铀矿化的地质背景和成矿条件,在康滇地轴混合岩地区最有找矿前景的铀矿类型应为受韧-脆性构造控制的中高温热液脉型矿化。

(3) 根据构造-沉积-含铀含氧流体在时空上的耦合作用及其结果,建立了二连盆地蒸发沉积-成岩-热流体改造形成的努和廷矿床等“同盆多类型”铀矿成矿模式。同时,依据铀矿床成矿地质作用和地质特征,以及不同类型铀矿化发育的空间部位特点,指出了“同盆多类型”铀矿在盆地凹陷中发育的有利空间位置,总结了裂谷盆地不同阶段的“同盆多类型”铀矿床组合规律,为在东北亚地区类似盆地中找寻相似的铀矿床组合指明了方向(聂逢君等,2015)。

(4) 当成矿期的含矿流场与沉积期的古水流体系基本一致时,铀储层砂体中层间氧化效率最高而且铀搬运通量最大,更加有利于成就大型和超大型铀矿床。在区域古构造等因素的协同影响下,同沉积期的古气候背景是制约铀储层砂体和成矿期层间氧化带发育方向和规模的极为重要的地质因素。同沉积期古气候不仅制约了铀储层砂体发育的结构和规模,同时更重要地制约了铀储层内部和外部

还原介质的类型及其空间分布规律。铀储层砂体的形态和结构制约了层间氧化带发育的方向和轨迹,而铀储层内部和外部的还原介质则控制着古层间氧化带推进的里程及前锋线位置,铀矿化作用则与氧化还原地球化学障有关(焦养泉等,2015)。

(5) 依据与铀储层砂体的产出关系可划分为内部还原介质和外部还原介质,铀储层砂体的双重还原介质对铀成矿同等重要,铀储层砂体中的层间氧化作用直接与内部还原介质相关,但是当叠加有外部还原介质时,外部还原介质将通过不同的方式大大增强铀储层砂体的整体还原能力,这种组合的出现有利于稳定的层间氧化带发育,持续的铀成矿沉积期的古气候和沉积环境决定了含铀岩系还原介质的类型和丰度,以及铀储层砂体双重还原介质的组合规律,从根本上决定了成矿期层间氧化带的发育规模(焦养泉等,2018)。

(6) 在国际上首次开展了铀矿床稀有气体同位素地球化学研究(Hu et al., 2009)。基于华南铀矿床与岩石圈伸展背景下形成的断陷盆地和幔源基性脉岩伴生、铀成矿时代与基性脉岩时代一致、成矿流体中的  $\text{CO}_2$  和 He 具有幔源特征等事实,建立了铀矿床的地幔排气成矿模式(Hu et al., 2008, 2009; 胡瑞忠等,2015)。该模式认为,铀成矿需要的  $\text{CO}_2$ ,主要来自受白垩-古近纪软流圈地幔上涌、岩石圈伸展控制的地幔排气;幔源  $\text{CO}_2$  热流上升加入在地壳浅层断裂系统中循环的雨水成因的地下水,为浸出铀源岩石中的铀而形成成矿流体创造了条件;成矿流体中的铀在不同岩石(花岗岩、火山岩、碳硅泥岩等)的断裂中沉淀下来,分别形成了按围岩划分的三类铀矿床。

(7) 近年来,铀矿物微区 U-Pb 定年技术已成功地应用到华南铀矿床的成矿年代学研究中,为华南铀矿床的精确定年提供了范例。如 Luo 等(2015)采用 SIMS 铀矿物 U-Pb 定年方法确定出仙石铀矿床存在三期铀成矿:( $135 \pm 4$ )、( $113 \pm 2$ ) Ma 和 ( $104 \pm 2$ ) Ma,且这三组年龄与区域上岩石圈伸展背景下形成的幔源基性岩脉的侵位年龄可一一对应;Luo 等(2017)采用沥青铀矿 SIMS 微区原位 U-Pb 定年与 U-Th-总 IPb 化学年龄相结合的方法,确定了桂北孟公界花岗岩型铀矿床的成矿年龄为 2.0 Ma,可能代表了华南新发现的一期最年轻的铀成矿事件。

## 2.4 中国铀矿科学深钻(CUSD1)

利用大比例尺地质调查、高精度地球物理测量、地球化学测量、放射性测量、遥感解译和三维建模等手段,系统研究了铀多金属成矿地质条件、主

要控矿因素、三维地质结构、铀矿床地质特征等,遴选了科学深钻场址。

中国铀矿第一科学深钻(CUSD1)位于江西相山盆地邹家山工区东南部 2.5 km,处,创造了孔径最大 122 mm 的钻探深度 2818.88 m 的记录,在成矿环境、勘查技术和铀多金属找矿方面取得一系列重大突破。

(1)重建相山盆地火山机构。基于铀矿科学深钻和高精度地球物理测量,获取了深部地质信息,揭示了火山机构和火山通道,火山主通道并不是垂直的,而是由北西向南东倾覆的,盆地存在多个岩浆-热液活动中心;相山火山盆地具有“基底-侵入岩-火山岩”三元结构特征,不是传统上认为的二元结构,构建了相山盆地三维地质模型,重塑了相山火山盆地地质结构,解决了找矿重大基础地质问题。

(2)建立标型剖面 and 深部勘查技术方法体系。利用科学深钻获取的岩心、深地探测数据和井中地球物理测量结果,建立了地质和物化探系列标型剖面,主要包括:岩性剖面、构造剖面、密度剖面、磁性剖面、电性剖面、放射性剖面、温度剖面、地球化学元素剖面、高光谱蚀变剖面、井中瞬变电磁测量剖面等。为相山大深度地质结构和成矿环境研究及找矿提供了标准比对和划分依据;这些标型剖面和多参数数据为深部勘查技术方法探测和标定提供了依据,提高了勘查深度和精度。

(3)铀多金属矿化发现及其成矿地质特征。首次在相山科学深钻钻孔岩心中发现了铀、铅、锌、铜、金等矿化,这些矿化在空间上具有分带性,受控于脆性-韧脆性构造带,表现为上铀-中铅锌金-下铜的多金属矿化组合(聂江涛等,2015,王健等,2016)。利用多金属矿化段中的黄铁矿进行 Rb-Sr 等时线法定年,直接获取相山多金属成矿时代为  $(131.3 \pm 4.0) \text{ Ma}$  (Guo et al., 2018),确定相山矿田多金属矿化为紧随火山-侵入岩浆作用之后的一期成矿事件。同位素年龄显示相山铀矿田主要存在两期铀矿化作用:第一期为铀-赤铁矿化阶段,成矿年龄为  $(115 \pm 0.5) \text{ Ma}$ ;第二期为铀-萤石、水云母化阶段,形成年龄为 90 Ma。

铀成矿作用在相山矿田表现为热点作用诱发的高温、高压、富氟的复杂热流体体系作用产物(李子颖等,1999,2014b;李子颖,2006)。这种热系统可以产生多矿种的垂直分带(铀-多金属)、在高温碱性流体的氟碳酸稀土交代(褐帘石被氟碳钙铈矿交代)和高温富铀碱性流体条件下形成锆石、独居石、磷灰石和铀钍石新生矿物组合,在高温富氟的

矿化流体条件下形成萤石-刚玉-钛铀氧化物-含钍沥青铀矿组合。

重新评价了相山盆地深部铀多金属成矿前景。该盆地具有多个岩浆-热液活动中心,不仅盆地西部和北部,而且南部均有较大的铀矿找矿前景,圈定了新的铀多金属成矿远景区。科学深钻揭露的地质条件和成矿环境表明,相山铀矿田深部具有很大的铀多金属找矿潜力,为火山岩型和花岗岩型第二找矿空间,乃至第三找矿空间铀多金属资源勘查提供了很好的示范。

## 2.5 零价态金属铀的发现

铀广泛分布于地球的各种地体中,由于其化学性质活泼,自然界中通常呈+3、+4、+5、+6价态,并总以化合物状态存在,其中+4和+6价铀化合物稳定(李子颖等,2010)。四价态铀通常以沥青铀矿( $\text{UO}_2$ )形成于岩浆、热液和变质作用过程中,而六价态通常以铀酰离子( $\text{UO}_2^{2+}$ )化合物溶于水体中或在沉积、蒸发和氧化的条件下形成各种硫酸盐、碳酸盐、钒酸盐、磷酸盐等各种盐类次生铀矿物。由于铀的不稳定性和变价性,至今人们在自然界中还未发现自然金属态铀。

基于热点铀成矿作用理论认为,铀的来源具有深源性,成矿流体具还原性,铀是成矿流体进入近地表时,由于物理化学条件的改变而沉淀富集成矿的。在这一理论指导下,李子颖团队(李子颖,1999,2014b;李子颖,2006)对热液成矿流体中是否以低价铀的形式进行迁移富集成矿进行了研究。他们以我国南方典型热液铀矿床中深部原生沥青铀矿为研究对象,采用光电子能谱方法,原位分析了天然沥青铀矿中元素组成、价态并开展了与人工合成金属铀和氧化还原铀矿物的对比分析,结果发现沥青铀矿中除  $\text{U}^{4+}$ 、 $\text{U}^{6+}$  外,还有零价态,首次发现了零价态金属铀的存在,并确定了不同价态的比例(李子颖等,2015)。

这一发现为揭示热液型铀矿成矿作用机理和控矿要素提供了关键性判据,证明成矿物质铀来自深部,成矿流体具还原性,为我国铀资源的深部突破提供了理论依据。此外,根据不同价态铀的比例,可以判别矿石形成的深度,为铀成矿深度的定量预测提供依据。由于铀在自然界中是一种非常活泼的放射性元素,对不同地质作用过程是敏感的且具有时间追溯性。因此,金属铀的发现对于研究追溯地质作用过程和地球演化也具有重要意义。该研究成果是我国铀矿地质及基础地质研究领域

原创性成果,突破了人们认为铀在自然界仅以价态的形式存在的惯常认识。

## 2.6 新矿物的发现

核地质系统是我国新矿物研究的重要力量,在1974-1992年间先后发现了6个新矿物种(范光等,2020)。近十年来,新一代矿物学工作者继续加强新矿物的研究,新发现了栾锂云母、氧钠细晶石、冕宁铀矿、羟铅烧绿石4个新矿物种,并获得IMA CNMNC的批准,续写了核地质系统在新矿物发现和 Research 方面的新篇章。

(1)冕宁铀矿(mianningite, IMA 2014-072)。冕宁铀矿为锶铁钛矿(crichtonite)族新矿物,其化学式为: $(\square, \text{Pb}, \text{Ce}, \text{Na})(\text{U}^{4+}, \text{Mn}, \text{U}^{6+})\text{Fe}_2^{3+}(\text{Ti}_{12}\text{Fe}_6^{3+})_{18}\text{O}_{38}$ ,三方晶系,空间群  $R$ , 晶胞参数: $a = 1.034\ 62(5)\ \text{nm}$ ,  $c = 2.083\ 72(2)\ \text{nm}$ 。2013年发现于四川冕宁县牦牛坪稀土矿包子山煌斑岩破碎带中,以产地命名(Ge et al., 2017)。锶铁钛矿族矿物中的 davidite-(La)是澳大利亚镭山铀矿床的主要工业铀矿物,在康滇地轴发现该族的冕宁铀矿对进一步认识康滇地轴及同类铀成矿作用具有指导意义。

(2)羟铅烧绿石(hydroxyplumbopyrochlore, IMA2018-145)。羟铅烧绿石属于烧绿石超族中烧绿石族新矿物,其化学式为: $(\text{Pb}_{1.5}\square_{0.5})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH})$ ,等轴晶系,空间群  $Fd\ m$ , 晶胞参数: $a = 1.055\ 78(17)\ \text{nm}$ ,  $Z = 8$ 。发现于沙特阿拉伯地质的过碱性花岗质伟晶岩中(Li et al., 2020)。羟铅烧绿石富含铌、钽,甚至铀、钍,羟铅烧绿石的发现为该地轴钍铀钽的利用提供了一种工业矿物,同时为研究碱性花岗质伟晶岩的演化过程及铀钍稀有元素的富集规律提供了矿物学证据。

(3)氧钠细晶石(oxynatromicrolite, IMA 2013-063)。氧钠细晶石属于烧绿石超族中细晶石族新矿物,其化学式为: $(\text{Na}, \text{Ca}, \text{U})_2(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_6(\text{O}, \text{F})$ ,等轴晶系,空间群为  $Fd\ m$ , 晶胞参数: $a = 1.0420(6)\ \text{nm}$ ,  $Z = 8$ 。2013年发现于豫西卢氏县官坡镇附近的官坡花岗伟晶岩密集区309花岗伟晶岩脉中(Fan et al., 2017)。氧钠细晶石是铌钽矿化的主要赋存矿物,其中含  $\text{UO}_2$  达 14.6%,也是一种含铀矿物,它的发现对铌钽和铀资源的利用和指示花岗伟晶岩的成因具有重要意义。

(4)栾锂云母(luanshiweite, IMA2011-102)。栾锂云母为云母族新矿物,其化学式为: $\text{KLiAl}_{1.5}\square_{0.5}(\text{Si}_{3.5}\text{Al}_{0.5})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$ ,单斜晶系,空间群  $C2/c$ , 晶胞参数: $a = 0.518\ 61(7)\ \text{nm}$ ,  $b = 0.898\ 57(13)$

$\text{nm}$ ,  $c = 1.9970(3)\ \text{nm}$ ,  $V = 0.9265(2)\ \text{nm}^3$ ,  $\beta = 95.420(3)^\circ$ ; 2 M1 多型。2011年发现于豫西卢氏县官坡镇附近的官坡花岗伟晶岩密集区309花岗伟晶岩脉中。该矿物原型标本来自成都理工大学栾世伟教授,以栾世伟教授的名字命名(范光等,2013)。栾锂云母的发现提供了一种新的锂元素的赋存状态,对花岗伟晶岩的成因研究具有指示意义。

## 3 铀矿勘查技术创新

### 3.1 砂岩型铀矿快速评价技术

近十年来,我国科技工作者通过对传统单项探测技术的改进和新技术的开发,优选出适宜于砂岩铀矿成矿环境和条件的不同探测对象的技术方法,实现了地质、遥感、地球物理和地球化学及信息集成处理等多项技术的有效配置,构建了新的地浸砂岩铀矿快速评价技术方法体系。该技术方法体系由区域成矿环境与远景区筛选评价技术方法子系统、成矿远景区段快速评价技术方法子系统和地浸砂岩铀资源潜力的综合识别评价技术方法子系统构成,各子系统又分别由若干技术方法有效配置而成。通过应用实现了北方重点盆地砂岩铀矿的重大突破(李子颖等,2015)。主要的技术突破和进展如下:

(1)集成了航磁、航放数据处理及弱信息提取技术。该技术可快速确定盆地基底格局、构造分区、区域放射性场(铀、钍、钾、总量)特征,圈定铀的活化区、迁出区和迁入区,区分“矿致异常”和“致矿异常”,从而为区域远景预测提供重要参数。

(2)创建了盆地古构造、古流体系统格局重塑技术,以大陆动力学、盆地动力学、区域新构造运动及叠合盆地研究的最新成果为基础,充分利用盆地构造演化、岩浆活动、同位素测年、地层学等资料,划分出盆地的构造演化阶段。在此基础上采用热年代学方法定量反演不同阶段盆山相对高差、地层剥蚀和盆地沉降幅度及不同盆段构造属性,进而重塑盆地古构造格局。以此为基础,根据古构造面貌及岩相古地理分析当时的古水动力系统格局。采用包裹体地球化学方法,对盆地沉积盖层不同层位、不同盆段(地段)开展较系统的包裹体测试研究,通过类型及期次、温度、压力、盐度、成分等特征参数,研究古流体的性质、来源、活动期次、运移途径,进而分析渗出型流体与渗入型流体的相互作用过程、古流体活动与古构造演化的时空对应性,确定古流体与砂岩铀成矿的关系。

(3)建立了含矿建造砂体识别技术。利用区域

地质、地震、地球物理、测井、岩心、露头和分析测试等资料进行盆地分析、层序地层分析和沉积相分析;通过盆地分析确定盆地类型、演化阶段和沉积充填特征;在构造演化格架内确定盆地不同演化阶段层序地层构成模式,建立盆地层序地层格架;在层序地层格架内确定盆地体系域和岩相分布模式,开展沉积相分析,建立相模式,预测有利沉积砂体的分布范围;根据盆地分析确定的盆地后期构造改造、埋藏史和热史等特征,确定有利沉积砂体发育的层位、规模等。

(4)发展了铀矿化深部探测技术。几乎所有的砂岩铀矿化均是深埋隐伏的铀矿,在地表没有任何矿化信息显示,且深埋地下数百米,如何探测深部成矿信息是减小找矿盲目性提高预测成功率的关键。通过铀分量化探测量、氦及其子体测量和弱信息提取技术的创新和组合应用,获得铀矿化直接和间接信息,为成功预测远景区提供了直接依据,凸显了铀矿化的空间定位。

(5)突破了开放体系 U-Pb 同位素定年方法。砂岩型铀成矿环境为开放体系,而开放体系中铀成矿时限的精确厘定是一大难题,因为非封闭体系中初始铅的扣除难以把握,铀矿物形成后因遭受后期改造而导致元素的不断带入和带出。该评价方法创新性地应用 U-Ra 平衡系数校正、古铀量恢复、微量铀矿物精确定年相结合手段,改进了开放体系 U-Pb 同位素定年方法,使所测结果最大限度地逼近其真实年龄值,为成矿过程和成矿模式研究提供了重要的依据。

(6)构建了基于 GIS 系统平台的砂岩铀矿综合预测评价系统。基于多源信息数据库和综合数字找矿模型,实现半定量和定量铀资源预测评价。

### 3.2 热液型铀矿攻深找盲技术

近十年来我国热液型铀矿攻深找盲技术体系首次得以建立。该体系包括深部盲矿地质评价技术体系、深部探测地球物理技术体系、深穿透地球化学技术体系及遥感影像特征纹理分形分析和亮温识别技术体系,找矿深度由 500 m 推进到 1500 m (李子颖等,2015)。

(1)深部盲矿地质评价技术体系。包括铀成矿构造应力场恢复技术、铀成矿蚀变深部定位技术、地球化学元素组合和示踪技术、矿化体探测识别技术等,实现对岩浆活动中心识别、蚀变带矿化指示识别、成矿流体矿化识别和铀成矿构造应力场恢复等。首次将构造应力场恢复技术应用于攻深找盲铀矿预测,恢复不同时期特别是铀成矿期构造,厘

定导矿构造和储矿构造,有效解决成矿空间定位问题。

(2)深部探测地球物理技术体系。通过电磁测量技术、浅层地震探测技术、高精度磁测技术、微弱信息提取技术、成矿信息地球物理直接探测技术(如氦气测量等)等试验,优化集成、创新建立了“电磁法+高精度磁测+高精度测氦”热液型铀矿地球物理攻深找盲技术方法组合,该方法组合集数据采集、处理、解释为一体,创新性解决了抗高压干扰技术,提出了热液型铀矿高精度磁法的连续测量和梯度测量的新方法,解决了火山岩及花岗岩地区单点磁异常真伪问题,有效探测深度达到 1500 m,实现了对深部隐伏岩体、控矿构造及铀矿化体的有效探测。

(3)深穿透地球化学技术体系。包括放射性同位素和核素示踪、地电化学测量、分量化探等技术。创新构建了3套深穿透地球化学方法:一是首次建立铅同位素打靶法和铅同位素向量特征值法及垂向示踪组合的同位素示踪评价技术;二是以分量化探为主与 $^{210}\text{Po}$ 法、热释光法组合的热液型铀矿地球化学元素示踪技术;三是以地电化学勘查方法为主与土壤电导率、土壤热释汞组合的热液型铀矿物性测量找矿技术。

(4)遥感影像特征纹理分形分析和亮温识别技术体系。这是研究自然界中具有自相似形特征的图形复杂程度的一种数学方法,包括分形维数计算和多重分行谱分析两种方法,用来刻画目视解释无法区分的遥感图像的纹理特征。亮温识别方法技术是将热红外遥感传感器接收到的地表热辐射转变为图像上的亮度,并进一步利用普朗克黑体辐射模型将地物的实际辐射亮度转换为地物的温度技术,为半定量-定量解释提供了依据,首次系统建立了以遥感地质信息为主导的热液铀矿田评价标志。

### 3.3 大数据找矿技术方法

矿产勘查的大数据应用与数据挖掘是目前国际地质科学的重要发展方向,主要包括三个层面的内容:

(1)铀资源数据构建和存储管理。核地质领域开发了数字铀矿勘查系统,实现了钻孔数据采集、测井数据调用、报表输出、地质编录本和综合柱状图计算机绘制等野外地质工作全流程的数字化,确立了铀矿勘查数字化资料检查、数据库建设等标准,建立了数据库。

(2)数据分析和各类信息提取。确立了铀资源大数据的采集、预处理、存储与管理、分析与信息挖

掘以及可视化与应用5个方面流程;建立了分布式计算与大数据一体化等核心技术,提升了对海量的结构化、半结构化和非结构化地学大数据的存储和管理能力,开展了数据分析、信息提取等研究(蔡煜琦等,2019;叶发旺等,2019a)。

(3)机器学习与智能找矿。基本构建了局域网环境下的铀资源勘查大数据应用平台(铀矿地质云),突破了完全适合于大数据环境下的分布式计算、分布式数据挖掘、数据可视化等关键技术,在二连盆地中部基本实现了铀资源勘查大数据应用示范(刘武生等,2019),向多元大数据的三维数字化-集成化-智能化-信息化“四定”(定型、定位、定深、定量)预测找矿迈进。

### 3.4 遥感高光谱技术

通过近十多年的发展,核地质系统已形成颇具特色的国内领先的航空全谱带高光谱测量和应用能力、地面-钻孔岩心成像光谱编录能力,并开发了一系列技术方法,在多个铀多金属成矿带中取得了明显应用效果。

(1)创新性地建立了铀矿勘查航空全谱段高光谱技术体系,突破了CASI/SASI/TASI/MASI多传感器航空高光谱数据获取、CASI/SASI航空高光谱大气校正、MASI/TASI航空中热红外高光谱温度与发射率分离、矿物填图、岩性智能识别、以及航空高光谱识别的高、中、低铝绢云母矿物成因学分析等航空高光谱数据处理与分析共性技术(叶发旺等,2013,2018,2019a),识别出了赤铁矿、褐铁矿、高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母、铁绿泥石、绿泥石、镁绿泥石、绿帘石、蒙脱石、方解石、白云石、叶蜡石、高岭石、迪开石、阳起石、蛇纹石、石膏、石英、碱性长石等20余种矿物,形成了国内领先的铀矿勘查航空高光谱测量技术能力。

(2)从火山岩、花岗岩等热液型铀矿地质特点出发,研发出了基于成矿有利地球化学障的航空高光谱矿物信息组合分析、铀成矿地表热液流体活动规律航空高光谱分析(Qiu et al., 2015;叶发旺等,2019b)、铀成矿环境航空高光谱蚀变矿物-岩性-构造综合分析(刘德长等,2017;叶发旺等,2019c)、以及铀成矿航空高光谱预测等具有铀矿勘查应用特色的航空高光谱信息分析与找矿预测技术,在国内地质矿产勘查领域的航空高光谱应用中具有良好的引领示范作用。

(3)利用研发的铀矿勘查航空高光谱技术在新疆雪米斯坦、甘肃龙首山、准噶尔盆地东部等重要铀成矿区带发现了十余处新的铀矿化异常,优选的

找矿靶区经地面槽探查证,发现了深部控矿要素,为这些地区的铀矿勘查突破提供了重要线索;同时,还发现了十余处金、铜、铁等金属矿化异常,优选的金铜找矿靶区十分类似紫金山金铜矿,极具找矿潜力,大大拓展了航空高光谱技术的应用效果(刘德长等,2017,2018)。

(4)建立了一套集“钻孔岩心成像光谱测量、数据处理、自动裁切、矿物识别、含量反演、三维建模”为一体的深部铀矿钻孔岩心成像光谱快速编录与分析新技术方法(Qiu et al., 2015; Zhang et al., 2019)。利用该技术方法完成我国相山铀矿第一科学深钻2888.8 m的全岩心360°扫描与信息提取分析,完成了我国数万米的热液型和砂岩型铀矿钻孔岩心的快速扫描和矿物信息编录与分析(张川等,2019),为重要铀矿钻孔岩心资料的数字化保存和深部铀矿成矿蚀变信息分带特征与规律分析提供了重要技术支持。该技术已入选自然资源部矿产资源节约和综合利用先进适用技术目录(2019版)。

### 3.5 钻探工艺新技术

近十年来,在铀矿科学深钻钻探装备及施工技术、地浸工艺孔施工技术、铀资源勘查钻探工艺等领域开展了一系列技术研发工作,取得了一系列重要成果。

(1)研制成功高效耐久钻头。在江西相山中国铀矿科学深钻钻探过程中,使用该钻头获得岩矿心采取率达到99%以上,金刚石绳索取心钻头平均小时效率1.37 m/h,平均使用寿命115.3 m/个,最高寿命290.38 m/个。最大提钻更换钻头间隔273.61 m,最长更换钻头时间间隔427 h。创造了国内P( $\phi 122$  mm)口径绳索取心钻进深度纪录,标志着核工业深孔岩心钻探技术的重大突破(刘晓阳等,2013)。

(2)研发的交流变频电动顶驱式XD-35DB型地质岩心钻机,为国内外首台,具有国际领先水平。该设备集电、液、气、信息技术为一体,大大提高了钻探装备的智能化、数字化和自动化水平(朱江龙等,2014)。

(3)成功研制出P、H、N三种口径的复合式液动冲击器。在节流压差式液动冲击器和射吸式液动冲击器研究的基础上(刘国经等,1985;谢文卫等,1998),结合节流压差式液动冲击器和射吸式液动冲击器优点,采用压差原理和射吸原理相复合方式,成功研制出了P、H、N三种口径的复合式液动冲击器。在铀矿科学深钻钻孔施工中,全孔应用该项

目研制的 P 口径金刚石绳索取心液动冲击器及钻进工艺技术进行施工,解决了该地区坚硬岩层钻进效率低、破碎岩层易堵卡、回次进尺长度短、金刚石钻头使用寿命短、钻孔易偏斜等钻探生产难题,使坚硬岩层钻进效率提高 30% 以上,钻头使用寿命提高 20% 以上,破碎岩层进尺长度提高 100% 以上,钻孔轨迹偏差控制在规范要求的范围内(叶晓平等,2018)。

(4) 成功研制出了适用于地浸砂岩铀矿卵砾石层钻进的胎体增强型孕镶金刚石钻头。在铁铜基孕镶金刚石钻头胎体中复合铸造碳化钨、碎粒硬质合金或金刚石聚晶,有效降低了孕镶金刚石取心钻头在卵砾石层钻进时金刚石换层速度,防止胎体崩裂,从而提高钻头使用寿命。胎体增强型孕镶金刚石钻头在内蒙古鄂尔多斯盆地和黑龙江三江盆地铀矿勘查项目 9 个钻孔中进行了钻进试验,累计试验进尺达到 1131.7 m。与普通常规钻头相比,使用寿命提高了 15% 以上,钻进效率提高了 10% 以上(刘晓阳等,2005;刘晓阳,2009)。

### 3.6 分析测试新技术新方法

近十年来,核地质分析测试新方法、新技术不断发展,总的向微区更微、精度更高,由二维向三位方向发展。

(1) 二次离子质谱分析技术。基于法国 CAMECA 公司生产的 CAMECA IMS 1280HR 型大尺寸高分辨二次离子质谱仪,建立了适用于复杂基体的多对象放射性同位素及稳定同位素分析技术。通过该技术,不但可以精细描绘出单颗粒矿物微米尺度三维元素同位素分布图像,还可以准确定量刻画铀矿地质研究中的形成年代、地质过程及物质来源等关键科学问题,填补了铀矿地质研究中原位微区同位素分析的空白,大大拓展了分析测试的广度和深度。该技术具有高分辨率、高效率、高精度及多维度等优势(Wu et al., 2018; He et al., 2020),对于复杂样品可以实现近乎无损的超高分辨率解剖。利用该套技术,成功厘定了相山横涧铀矿床早期铀矿床年龄(He et al., 2020)及锆石氧同位素再造的现象,明确了沙特碱性伟晶岩形成中的壳幔相互作用及岩浆自氧化过程,为铀矿成矿机理研究、地球科学关键过程研究提供了强有力的技术支撑。

(2) 聚焦离子束扫描电子显微镜和飞行时间二次离子质谱联用技术。基于聚焦离子束扫描电子显微镜(Focused Ion Beam, FIB)和飞行时间二次离子质谱(Time of Flight Secondary Mass Spectrometer, TOF-SIMS),建立了 FIB-TOF-SIMS 联用技术(王涛

等,2019)。该技术不但可以进行元素、尤其是超轻元素的面分析,更为重要的是还可以获得铀矿物等固体物质中元素的三维立体分布信息,解决了以往只能获得元素二维平面分布信息的技术瓶颈。该技术具有高空间分辨率(纳米级)、微区原位元素和同位素(尤其是超轻元素)分析、同时具备二维与三维分析等技术优势。利用该套联用技术,首次分析了晶质铀矿铀元素的三维空间分布,更为直观地观察到了晶质铀矿内部铀元素的分布状态,为铀矿成因、成矿机理等研究提供技术支撑。

(3) 基于 X 射线计算机断层扫描(X-CT)的岩心三维扫描及铀矿物识别技术。建立了 X-CT 三维无损成像及分析技术。相对于传统岩石矿物鉴定手段,该技术的显著优势在于可在无损状态下获得岩石样品内部三维纹理结构,结合扫描电镜、激光烧蚀电感耦合等离子体质谱等岩石矿物表征技术,可有效拓展对岩石矿物内部信息的获取。通过对含铀矿物及其他常见矿物的 X-CT 扫描研究,初步获得了含铀矿物对 X 射线的衰减特征,利用该特征可实现对岩心中铀矿物颗粒有效识别,并通过三维重建获取相应矿物颗粒的物理赋存状态,为铀矿成矿理论深化研究提供技术支撑。

(4) 激光烧蚀电感耦合等离子体质谱含铀矿物分析技术。基于多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)和高分辨等离子体质谱仪(XR-ICP-MS)以及准分子激光器,建立的新一代 LA-ICP-MS 含铀矿物分析技术,实现了含铀矿物(锆石、锡石等)、铀矿物(晶质铀矿、沥青铀矿)高空间分辨率(几十微米)微区原位 U-Pb 同位素定年和微量元素分析以及锆石微区原位 Lu-Hf 同位素的高精度测量,所获得的 U-Pb 同位素年龄数据可应用于揭示成岩、成矿时代(刘瑞萍等,2015,2017),微量元素则可为探讨岩石、矿床成因提供最要依据, Lu-Hf 同位素可为阐明岩浆作用过程、物质来源和岩石成因提供重要的理论依据。依托该项技术,研制出了用于锡石 U-Pb 定年的实验室内部标准物质,获得了一项实用新型专利授权。

(5) 基于单晶衍射仪建立了单晶晶体结构解析技术。该技术通过收集 10~150 μm 单晶颗粒衍射数据,精确解析矿物三维结构,分析矿物中原子排列方式、原子之间键长、键角、占位率等一系列结构数据,是矿物学研究中不可缺少的技术手段。基于该技术,实验室建立了铀及含铀矿物晶体结构和晶体化学研究技术体系,为分析铀元素在复杂环境中的物理化学性质、迁移行为、赋存状态提供重要的

基础数据,并发现了一种新的含铀矿物—羟铅烧绿石(Li et al.,2020),并获得了国际矿物学会新矿物命名与分类委员会的批准。

(6)分布式实验室检测技术。通过多年的技术研发与积累,针对铀矿地质分析测试实验室的特点,建立了一套质量管理体系规范要求的分布式实验室检测技术(郭冬发等,2007)。该技术采用先进的计算机网络技术、数据库技术和标准化的管理理念,将样品的采样信息、检验流程、质量管理体系等要素有机的结合起来,构筑了一个全面、规范的信息系统,主要包括野外移动采样信息模块、实验室样品检测信息模块和实验室环境监测模块。通过该技术已将实验室管理水平、自动化水平提升到新的高度。

## 4 重大找矿进展

近十年来,创建和完善北方砂岩叠合成因和构造活动带砂岩铀成矿理论,创新热液铀矿热点铀成矿理论,突破铀矿勘查系列关键技术,基本形成“天-空-地-深”三维数字勘查技术系统和铀资源“定位-定型-定深-定量”预测评价技术体系;理论技术用于实际找矿,大大拓展了找矿空间,实现了国内外铀矿找矿的重大突破。

在北方中生代盆地伊犁、准格尔、塔木素、鄂尔多斯、二连和松辽盆地等实现了“新类型、新层位、新区域、新深度”的突破,新类型如叠合成因类型,新层位为侏罗系、白垩系中的6个层位,新区域指构造活动带、二次或多次再还原带地域等,新深度为找矿深度由500 m左右推进到900 m,推动落实一批大型、特大型和超大型砂岩铀矿,形成了6个万吨级砂岩铀矿基底,使砂岩型铀矿成为我国的第一大类型,为砂岩铀矿基地建设提供了资源保障。

在南方相山、诸广以及苗儿山等热液型铀矿工作区,圈定了新的成矿远景区和找矿靶区,指明了找矿方向,拓展了找矿空间,扩大了已知矿床的资源储量,推动落实了一批中小型、大型和特大型铀矿床,使我国热液铀矿找矿深度由600 m左右推进到1200 m,开辟了我国热液铀矿第二找矿空间。

在相山盆地实施的中国铀矿第一科学深钻(CUSD1)中,首次发现了上铀、中铅锌金、下铜等铀多金属矿化,铀矿化4处,铅锌矿化5段,金矿化1段,铜矿化4段,其中,2817米的铜矿化目前属于国内埋藏最深的铜矿化,其含量超过1%,表明第二、第三成矿空间还具有很大的铀多金属找矿潜力。

海外铀多金属找矿成果显著:在纳米比亚欢乐

谷地区、尼日尔阿泽里克铀矿区等圈定了一批重要的勘查靶区,尤其是在欢乐谷地区预测的勘查靶区经钻探工程评价,落实为大型-特大型铀矿床;在近几年,完成了沙特阿拉伯铀钍资源调查评价国家项目,创下技术交叉多、完成任务快、协同联合强、取得成果多、找矿效率最高等综合成效,落实大型、超大型铀、钍、铀、钍矿床,按国际标准提交成果报告,形成了高效、快速研产结合一体化的找矿突破“沙特模式”。

## 5 展望

铀资源是军民两用的战略性关键矿产,是核工业发展的物质基础。新时代,核工业的新发展对铀资源提出了新需求。“找大矿、找富矿、找经济可采矿”和“新区、新层位、新类型”的铀矿找矿新目标对铀矿地质科技创新和攻关提出了新的更高、更为紧迫的需求,铀矿地质科技工作也必迎来一个新的发展时期。未来铀矿成矿理论的发展将不断创新完善,新一代铀矿勘查技术以大探深、智能化、绿色化、集成化为主要标志,主要重点发展方向为:

(1)大力加强铀资源重大基础前沿创新研究。主要包括砂岩型铀矿超常富集机理与板状铀成矿理论、热液型深部富大铀矿成矿机理与成矿规律、多矿种相互作用与铀成矿系统等,为铀矿勘查突破提供理论指导。

(2)大力发展砂岩型铀矿绿色智能勘查技术。主要包括绿色高效探测技术和装备、智能化勘查技术系统研发。通过高精度-高分辨-高效率砂岩铀资源勘查新技术研发、绿色高效自动化与智能化关键勘查设备研制、三维智能化勘查技术系统开发,实现三维精细化、智能化预测评价,并大幅提高铀矿勘查生产的效率。

(3)大力发展热液型铀矿绿色智能化探测技术。重点开展热液型铀矿先进勘查技术与装备研制、富大热液型铀矿四维预测与资源扩大等研究,实现更大深度富大铀矿的三维精细化、智能化预测评价。

(4)发展放射性共伴生资源高效预测评价技术。开展全国成矿区带铀钍、铀稀土、铀钍、铀钍以及铀磷等成矿环境、勘查技术、预测评价等研究,建立铀及其伴生多金属资源综合评价技术。

(5)持续推进铀矿科学深钻工程。铀矿科学深钻是揭示深部铀成矿地质结构与环境、探索极限成矿深度和找矿深度的“钥匙”。我国铀矿深部科学钻探工程已取得重大进展和突破,今后一段时期

内,铀矿科学深钻将向纵深方向发展,在火山岩型铀矿 3000 米科学深钻的基础上,有望实施花岗岩型铀矿田铀多金属深部探测等科学钻探工程,并形成 4000 m 深度的深部科学钻探技术与能力。

**致谢:**核工业北京地质研究院张杰林、聂江涛、刘祜、葛祥坤、刘武生、李佳丽等提供了相关素材,审稿专家提出了诸多宝贵意见,在此一并致以衷心感谢!

## 参考文献 (References):

- Fan G, Ge X K, Li G W, Yu A P, Shen G F. 2017. Oxynatromicrocline,  $(\text{Na}, \text{Ca}, \text{U})_2\text{Ta}_2\text{O}_6(\text{O}, \text{F})$ , a new member of the pyrochlore supergroup from Guanpo, Henan Province, China. *Mineralogical Magazine*, 81(4): 743-751
- Ge X K, Fan G, Li G W, Shen G F, Chen Z R, Ai Y J. 2017. Mianningite  $(\square, \text{Pb}, \text{Ce}, \text{Na})(\text{U}^{4+}, \text{Mn}, \text{U}^{6+})\text{Fe}_2^{3+}(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_{18}\text{O}_{38}$ , a new member of the crichtonite group from Maoniuping REE deposit, Mianning county, Southwest Sichuan, China. *European Journal of Mineralogy*, 29(2): 331-338
- Guo J, Li Z Y, Nie J T, Huang Z Z, Wang J, Lai C K. 2018. Genesis of Pb-Zn mineralization beneath the Xiangshan uranium orefield, South China: Constraints from H-O-S-Pb isotopes and Rb-Sr dating. *Resource Geology*, 68(3): 275-286
- He S, Li Z Y, Guo D F, Wang Y J, Zhang C, Guo J, Fan Z W. 2020. Early mineralization age of the Hengjian uranium deposit: Constraints from zircon SIMS U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 94(1): 212-213
- Hu R Z, Bi X W, Zhou M F, Peng J T, Su W C, Liu S, Qi H W. 2008. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary. *Economic Geology*, 103(3): 583-598
- Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, Zhou M F, Peng J T, Su W C, Zhao J H. 2009. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: Evidence from He, Ar and C isotopes. *Chemical Geology*, 266(1-2): 86-95
- Li T, Li Z Y, Fan G. 2020. Hydroxylplumbopyrochlore, IMA 2018-145. CNMNC Newsletter. *European Journal of Mineralogy*, 53: 32
- Li Z Y, Chen A P, Fang X H, Ou G X, Xia Y L, Sun Y. 2008. Origin and superposition metallogenetic model of the sandstone-type uranium deposit in the northeastern Ordos Basin, China. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 745-749
- Li Z Y, Fang X H, Xia Y L, Xiao X J, Sun Y, Chen A P, Jiao Y P, Zhang K. 2005. Metallogenetic conditions and exploration Criteria of Dongsheng Sandstone type uranium deposit in Inner Mongolia, China. In: Mao J W, Bierlein F B (eds.). *Mineral Deposit Research*, Berlin: Springer-Verlag, 291-294
- Luo J C, Hu R Z, Fayek M, Li C S, Bi X W, Abdu Y, Chen Y W. 2015. In-situ SIMS uraninite U-Pb dating and genesis of the Xianshi granite-hosted uranium deposit, South China. *Ore Geology Reviews*, 65: 968-978
- Luo J C, Hu R Z, Fayek M, Bi X W, Shi S H, Chen Y W. 2017. Newly discovered uranium mineralization at ~2.0 Ma in the Menggongjie granite-hosted uranium deposit, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 241-249
- Miyawaki R, Hatert F, Pasero M, Mills S J. 2020. IMA Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification (CNMNC) Newsletter 54-. *Mineralogical Magazine*, 84(2): 359-365
- Mogan W J. 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230: 42-43
- Qiu J T, Zhang C, Hu X. 2015. Integration of concentration-area fractal modeling and spectral angle mapper for ferric iron alteration mapping and uranium exploration in the Xiemisitan area, NW China. *Remote Sensing*, 7(10): 13878-13894
- Wilson J T. 1963. A possible origin of the Hawaiian Islands, *Can. J. Phys.*, 41: 863-870
- Wu Y, Qin M K, Guo D F, Fan G, Liu Z Y, Guo G L. 2018. The latest in-situ uraninite U-Pb age of the Guangshigou uranium deposit, northern Qinling orogen, China: Constraint on the metallogenic mechanism. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 2445-2447
- Zhang C, Liu S F, Ye F W, Qiu J T, Zhang Z X, Wang J G. 2019. Three-dimensional modeling of alteration information with hyperspectral core imaging and application to uranium exploration in the Heyuanbei uranium deposit, Xiangshan, Jiangxi, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13: 014524
- 蔡煜琦, 张文明, 赵永安, 田珊. 2012. 全国铀矿资源潜力评价数据管理及应用系统的研制. *铀矿地质*, 28(6): 393-397
- 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 郭庆银, 宋继叶, 范洪海, 刘武生, 漆富成, 张明林. 2015. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要. *地质学报*, 89(6): 1051-1069
- 蔡煜琦, 虞航, 李晓翠, 刘佳林, 章展铭. 2019. 大数据时代铀矿资源预测评价的技术方法探讨. *铀矿地质*, 35(6): 321-329
- 范光, 李国武, 沈致富, 徐金沙, 戴婕. 2013. 栾锂云母: 锂云母系列的新成员. *矿物学报*, 33(4): 713-721
- 范光, 葛祥坤, 李婷, 于阿朋, 王涛. 2020. 我国核地质系统发现的新矿物评述. *世界核地质科学*, 37(1): 1-9
- 郭冬发, 武朝晖, 崔建勇, 欧光习, 范光. 2007. 铀矿地质分析测试技术回顾与新形势下网络实验室构建. *世界核地质科学*, 24(1): 50-62
- 胡瑞忠, 毛景文, 华仁民, 范蔚茗. 2015. 华南陆块陆内成矿作用. 北京: 科学出版社, 1-903
- 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 荣辉, 季东民, 苗爱生, 里宏亮. 2015. 中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积-构造背景综合分析. *地质学前沿*, 22(1): 189-205
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉. 2018. 砂岩型铀矿的双重还原介质模型及其联合控矿机理: 兼论大营和钱家店铀矿床. *地球科学*, 43(2): 459-474
- 李军杰, 刘汉彬, 张佳, 金贵善, 张建锋, 韩娟. 2016. 应用 Argus 多接收稀有气体质谱仪准确测量空气的 Ar 同位素组成. *岩矿测试*, 35(3): 229-235
- 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): 10-17, 34
- 李子颖. 2006. 华南热点铀成矿作用. *铀矿地质*, 22(2): 65-69, 82

- 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 欧光习, 孙晔, 张珂, 夏毓亮, 周文斌, 陈法正, 李满根, 刘忠厚, 焦养泉. 2009. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿叠合成矿模式. 铀矿地质, 25(2): 65-70, 84
- 李子颖, 黄志章, 李秀珍, 何建国. 2010. 南岭贵东岩浆岩与铀成矿作用. 北京: 地质出版社
- 李子颖, 张金带, 秦明宽, 范洪海. 2014a. 中国铀矿成矿模式. 北京: 中国核工业地质局, 核工业北京地质研究院
- 李子颖, 黄志章, 李秀珍, 张金带, 林子瑜, 张玉燕. 2014b. 相山火成岩与铀成矿作用. 北京: 地质出版社
- 李子颖, 秦明宽, 蔡煜琦, 范洪海, 程纪星, 郭冬发, 叶发旺, 陆士立, 梁春利. 2015. 铀矿地质基础研究和勘查技术研发重大进展与创新. 铀矿地质, 31(S1): 141-155
- 李子颖, 方锡珩, 秦明宽. 2019. 鄂尔多斯盆地北部砂岩铀成矿作用. 北京: 地质出版社
- 凌洪飞, 陈培荣, 陈卫锋, 孙涛, 吴俊奇, 吴欢. 2015. 华南中生代花岗岩与铀成矿. 见: 中国地质学会 2015 学术年会论文摘要汇编. 西安: 中国地质学会地质学报编辑部, 322-327
- 刘德长, 赵英俊, 叶发旺, 田丰, 邱骏挺. 2017. 航空高光谱遥感区域成矿背景研究——以甘肃柳园-方山口地区为例. 遥感学报, 21(1): 136-148
- 刘德长, 邱骏挺, 闫柏琨, 田丰. 2018. 高光谱热红外遥感技术在地质找矿中的应用. 地质论评, 64(5): 1190-1200
- 刘国经, 朱乃正, 王有群. 1985-04-01. 射吸式冲击器: 中国, CN85101970A
- 刘瑞萍, 顾雪祥, 章永梅, 王佳琳, 郑砾, 高海军. 2015. 黑龙江东安金矿床赋矿岩浆岩锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学特征. 岩石学报, 31(5): 1391-1408
- 刘瑞萍, 顾雪祥, 章永梅, 谢胜凯, 郑砾, 王佳琳, 郭冬发. 2017. 黑龙江宝山夕卡岩型铜钼钨多金属矿床成岩成矿时代及其地质意义. 矿物学报, 37(3): 276-284
- 刘武生, 朱鹏飞, 孔维豪. 2019. 二连基地砂岩型铀矿地质数字平台和大数据找矿预测 2019 年度报告. 核工业北京地质研究院
- 刘晓阳, 杨爱军, 孙建华. 2005. 混镶式硬质合金钻头在卵砾岩层中的应用. 西部探矿工程, 17(12): 188-189
- 刘晓阳. 2009. 孕镶金刚石-针状合金复合式取心钻头的应用研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 36(增刊): 377-381
- 刘晓阳, 李大昌, 叶雪峰. 2013. 中国铀矿第一科学深钻施工概况. 探矿工程(岩土钻掘工程), 40(增刊): 297-299, 304
- 聂逢君, 李满根, 邓居智, 严兆彬, 张成勇, 姜美珠, 杨建新, 旷文战, 康世虎, 申科峰. 2015. 内蒙古二连裂谷盆地“同盆多类型”铀矿床组合与找矿方向. 矿床地质, 34(4): 711-729
- 聂江涛, 李子颖, 王健, 郭建. 2015. 江西相山矿田多金属成矿流体特征与成矿作用. 地质通报, 34(2-3): 535-547
- 王健, 聂江涛, 郭建, 黄志章, 李秀珍. 2016. 江西相山矿田深部多金属矿化特征. 地质与勘探, 52(1): 47-59
- 王涛, 葛祥坤, 范光, 郭冬发. 2019. FIB-TOF-SIMS 联用技术在矿物学研究中的应用. 铀矿地质, 35(4): 247-252
- 谢文卫, 苏长寿, 宋爱志. 1998. 新型高冲击功液动潜孔锤的研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 25(6): 31-32
- 叶发旺, 王存, 张川, 刘洪成, 武鼎. 2013. 航空高光谱遥感技术在新疆雪米斯坦铀多金属矿产勘查中的应用研究. 地质论评, 59(21): 930-931
- 叶发旺, 孟树, 张川, 徐清俊, 刘洪成, 武鼎. 2018. 航空高光谱识别的高、中、低铝绢云母矿物成因学研究. 地质学报, 92(2): 395-412
- 叶发旺, 王建刚, 邱骏挺, 张川. 2019a. 面向地质应用的航空高光谱 CASI-SASI 数据大气校正方法对比研究. 光谱学与光谱分析, 39(9): 2677-2685
- 叶发旺, 张川, 徐清俊, 孟树, 邱骏挺, 王建刚. 2019b. 热液流体活动规律高光谱遥感分析示范研究——以新疆白杨河铀矿床为例. 矿床地质, 38(6): 1347-1364
- 叶发旺, 孟树, 张川, 邱骏挺, 王建刚, 刘洪成, 武鼎. 2019c. 甘肃龙首山菱岭铀矿床碱交代型铀矿化蚀变航空高光谱识别. 地球信息科学学报, 21(2): 279-292
- 叶晓平, 李博, 刘晓阳, 高辉, 段隆臣. 2018. 差动式双作用液动冲击器冲锤动力学方程的研究和应用. 地质与勘探, 54(4): 801-809
- 张川, 叶发旺, 徐清俊, 邱骏挺. 2019. 相山铀矿田西部深钻岩心成像光谱编录及蚀变分带特征. 国土资源遥感, 31(2): 231-239
- 张成江, 陈友良, 李巨初, 徐争启, 姚健. 2015. 康滇地轴巨粒晶质铀矿的发现及其地质意义. 地质通报, 34(12): 2219-2226
- 张金带, 李子颖, 蔡煜琦, 郭庆银, 李友良, 韩长青. 2012. 全国铀矿资源潜力评价工作进展与主要成果. 铀矿地质, 28(6): 321-326
- 张金带, 李子颖, 徐高中. 2015. 我国铀矿勘查的重大进展和突破. 北京: 地质出版社
- 张金带. 2016. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展. 铀矿地质, 32(6): 321-332
- 张金带, 蔡煜琦, 徐浩, 张明林, 贾立城, 张字龙, 黄净白, 张书成, 李田港, 陈祖伊, 仇宝聚, 虞航, 柯丹. 2018. 中国矿产地质志(铀矿卷). 北京: 地质出版社
- 朱江龙, 张伟, 黄洪波, 胡时友, 刘跃进. 2014. 深孔取心钻进用高速顶驱式钻机. 探矿工程(岩土钻掘工程), 41(9): 114-119

(本文责任编辑:刘莹;英文审校:张兴春)