

中国第四代天然铀勘查采冶技术创新体系构建与发展

喻翔^{1,2}, 苏学斌³, 孙晔³, 闻振乾³, 任宇³, 刘章月⁴, 常喜信⁵

- 清华大学能源动力与工程系, 北京 100084
- 中国核工业地质局, 北京 100013
- 中国铀业股份有限公司, 北京 100013
- 核工业北京地质研究院, 北京 100029
- 中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149

摘要 国家核力量建设和核能健康发展, 亟待天然铀勘查采冶技术升级换代。以当前天然铀勘查采冶技术水平评估结果为依据, 确立赶超技术对标体系, 整合优势资源, 构建中国第四代天然铀勘查采冶技术创新体系。技术创新体系以科技创新“三步走”的战略思路为引领, 着力突破关键核心技术短板弱项, 绘制第四代技术体系型谱图, 出台搭建协同创新平台, 培育高层次、多梯次科技人才队伍, 营造良好创新生态环境等系列措施。通过贯彻实施取得显著成效, 多项关键核心技术实现国际首创, 全面提升自主创新能力, 成果产出数量逐年攀升, 显著增强了中国天然铀产业的核心竞争力。

关键词 天然铀; 科技创新体系; 第四代勘查技术; 第四代采冶技术

创新是引领发展的第一动力, 是建设现代化经济体系的战略支撑^[1-3]。当前国际形势错综复杂, 全球产业链、供应链面临重塑, 不稳定性、不确定性明显增加^[4]。科技创新成为国际战略博弈的主要战场, 围绕科技制高点的竞争空前激烈^[5]。核工业作为高科技战略产业, 是国家安全的重要基石^[6-8]。天然铀勘查采冶技术体系作为核科技体系的前端,

承担着重要的历史使命, 亟待加快构建先进的第四代天然铀勘查采冶技术创新体系, 为我国从核大国到核强国的转变提供支撑^[9-10]。从当今中国天然铀产业及勘查采冶技术发展背景出发, 提出构建第四代天然铀勘查采冶技术创新体系的具体措施, 并简述取得的阶段性成果。

收稿日期: 2023-05-20; 修回日期: 2023-08-07

基金项目: 中国核工业集团有限公司软课题(ZHKY-YK-SJ-Y-2022-001); 中国铀业有限责任公司软课题(ZY2022-113); 中国核工业地质局科研项目(201928-3)

作者简介: 喻翔, 博士研究生, 研究方向为铀矿地质与采冶技术的研究和管理, 电子信箱: yuxiang219@126.com

引用格式: 喻翔, 苏学斌, 孙晔, 等. 中国第四代天然铀勘查采冶技术创新体系构建与发展[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 76-83; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.19.008

1 中国第四代天然铀勘查采冶技术体系构建的背景

1.1 夯实“强核基石、核电粮仓”的必然选择

核力量是建立全球战略平衡的重要保障,天然铀是国家战略核力量建设最重要的物质资源^[10-11]。后疫情时代全球产业和经贸格局加速重构,战略性矿产资源国际争夺更趋激烈。2020年4月,美国能源部发布的《重塑美国核能竞争优势:确保美国国家安全战略》,将采取加大科技投入、建立铀储备、恢复铀矿开采等积极措施来振兴和壮大铀矿开采业,确保在市场遭到破坏的情况下保障天然铀的供应。因此,立足国内建立新时代天然铀勘查采冶技术体系,确保中国天然铀供应绝对安全,是新形势下保障国家战略核力量建设的重要任务^[12]。

核能产业的快速发展对天然铀保障能力也提出了长远需求。到2035年国内核电装机容量将达到1.5亿kW,当年天然铀需求量将达到 3.4×10^4 t。随着核电“走出去”日益成为“一带一路”的亮点,配套的天然铀需求还将不断攀升,国内天然铀勘探与开发在满足核军工需求的同时,也必须为核能产业的发展提供必要保障^[9]。

1.2 支撑天然铀产业高质量发展的必然要求

21世纪以来,中国天然铀勘查采冶不断开辟新的基础研究和工程技术方向,第三代天然铀探采技术已日益完善,但与哈萨克斯坦国家原子能工业、澳大利亚必和必拓、加拿大卡梅科、法国欧安诺等国际矿业公司还存在较明显的差距。例如基础研究成果碎片化,创新研究手段和方式亟待改进,与科学实验、仿真验证等先进手段结合不够,与数学、物理、化学、材料、信息等多学科交叉融合不足,找矿速度和效率需要提升,难选冶铀资源经济开发还存在技术瓶颈,亟待提升面向工程应用的基础创新能力。

1.3 铀矿勘查开发技术升级换代的必然趋势

中国铀成矿环境和开发条件尤为复杂,今后铀矿找矿多为沙漠戈壁、高原等工作环境更加恶劣的地区,矿体埋藏更深,矿床更隐蔽,地质条件更复杂^[13-14]。目前探明的铀资源禀赋总体较差,铀矿开发成本高。第三代天然铀勘查采冶技术实现了复

杂砂岩型铀资源的工业化开发^[15-17],但当前资源突破还主要依靠钻探工作量,直接测铀、无岩心勘查、绿色智能勘查等高效勘查新技术和“卡脖子”问题研究滞后,铀资源预测研究成果的作用发挥不够,摸清铀资源家底的速度滞后;许多已探明的复杂铀资源、共伴生资源还缺乏经济有效的开发方法,复杂铀矿高效开发、生物浸出、智能矿山、产品深加工等难题需要突破,海外超大铀矿开发技术储备不足;铀矿勘查、采冶一体化技术融合不够,降本增效还存在较大空间。同时,“美丽中国”建设对生态环境保护提出了更高的标准和要求。因此,必须创新科研管理思路,以产业发展为导向,紧密结合天然铀科技发展重点方向,开展科研技术攻关,构建第四代天然铀勘查采冶技术创新体系,为中国铀资源高效、科学和可持续开发利用提供保障支撑。

2 中国第四代天然铀勘查采冶技术体系构建的依据

2.1 中国天然铀勘查采冶技术水平

铀资源技术体系可分为铀资源勘查和铀矿采冶2大类。铀资源勘查包括基础地质与成矿理论、勘查方法、预测评价等;铀矿采冶包括铀矿开采、铀水冶、铀纯化转化、安全环保等,同时2方面都包括材料和设备、信息技术、分析测试、技术标准等。通过当前技术体系中各专项技术的现状分析,并与国内和国际相关技术的先进性对比,梳理和统计了铀资源技术领域的主要技术。评估了勘查和采冶技术的7个分类和27个技术领域/方向,其中有4项领跑,5项并跑,18项跟跑(表1)。

2.2 发展思路与目标

围绕天然铀产业高质量发展目标,通过系统梳理天然铀产业发展现状,确定整体技术研发目标和路径,确立赶超对标体系,整合优势资源,形成创新团队,开展产学研联合攻关,重点突破铀矿勘查采冶关键技术和装备,兼顾重大基础理论研究,快速提升找矿效率,快速提升天然铀产能和难采冶资源利用水平,快速提升探采一体化工作效率和效益。通过深化科技创新体制机制改革,强化科技创新人才队伍建设,激发科技人才的积极性和创造力。运

表1 铀资源技术领域水平评估

序号	第一分类	第二分类	技术领域	技术水平评估				
				领跑	并跑	跟跑		
1	铀资源勘查技术	基础地质与成矿理论	铀成矿基础地质		√			
2			铀成矿理论	√				
3			非常规铀资源富集理论				√	
4		勘查技术		遥感地质勘查技术		√		
5				航空物探技术				√
6				地面及井中物探技术				√
7				地球化学勘查技术				√
8				水文地质勘查技术				√
9				钻探工艺技术				√
10		预测评价技术		分析测试技术	√			
11				铀成矿预测技术				√
12				资源潜力评价技术			√	
13	铀矿采冶技术			铀矿开采	采矿技术			√
14					原地浸出	√		
15		矿山地质(含水文地质)					√	
16		钻成井技术					√	
17		数字化矿山				√		
18		选矿技术				√		
19		铀水冶		浸出技术(含堆浸、常规、原地爆破等)	√			
20				铀提取分离		√		
21	铀精制技术				√			
22	铀矿冶分析测试						√	
23	铀纯化转化		高效分离材料			√		
24			铀纯化				√	
25			铀转化				√	
26	安全环保		辐射防护与环境保护			√		
27			铀矿山退役				√	

用系统思维方法,通过搭建多个战略合作平台,实现内外联动,多措并举,快速形成技术引领优势,为构建第四代天然铀勘查采冶技术体系打下坚实的基础,全面提升中国天然铀科技核心竞争力。

3 第四代天然铀勘查采冶技术创新体系构建

3.1 以天然铀高质量发展为引领,确立创新体系顶层架构

提出科技创新“三步走”战略,形成了引领中国未来15年天然铀高质量发展的技术路线,明确了创新体系总体目标、发展方向和重点任务。明确在

2021—2035年期间分3个“五年计划”推进实施天然铀保障科技工程,在国内外天然铀勘查开发和海水提铀颠覆性领域取得重大突破,建立绿色、智能、高效的第四代天然铀勘查采冶技术体系,确保核心装备完全自主可控,勘查效率、矿山劳动生产率大幅提升,支撑中国天然铀产业资源、产能和效益快速提升。

3.2 面向国际前沿,开创性建立第四代技术体系型谱图

通过积极调研、动态跟踪国际一流矿业公司技术发展现状,从铀矿地质、地浸采铀、常规采冶等领域开展技术对标,确定技术对标体系,如表2所示。

表2 第四代天然铀勘查采冶技术指标对标目标

序号	领域	指标名称	单位	国外指标
1	铀矿地质	遥感技术	%	智能化程度75%,数据处理及软件自主化率100%
2		航空物探	—	GeoTech航空瞬变软硬件全球商业化使用
3		地面及井中物探	m	识别精度10 m薄层砂体和5 m小断层,中子测井铀含量测量范围0.05%~1%
4		地球化学探测	m	活动态离子法(MMI)探测超700 m
5		钻探工艺	—	具备实施水平井和超深井能力,自动化程度高
6	地浸采铀	经济可采平均品位	%	0.04~0.18
7		经济可采渗透系数	m/d	0.6~5
8		资源回收率	%	50~90
9		井场、水冶厂无人值守比率	%	90~100
10		能耗	GJ/tU	120~150
11	常规采冶	开采深度	m	600~1500
12		采矿效率	t/工班	地下开采10~20 t/工班;露天开采500~600 t/工班

为精准定位突破第四代天然铀勘查采冶技术的重点攻关对象,强化天然铀产业科技创新发展战略纲要的可执行、可操作性,通过对比国内外相同或相近行业的先进勘查开发模式,从提高勘查开发效率、降低生产成本、践行安全环保绿色发展和探

索颠覆性领域等角度系统梳理了制约天然铀产业高质量发展的关键科技问题,绘制了一套赶超国际先进水平的天然铀勘查采冶技术发展型谱图(图1)。明确在铀资源探采重大基础前沿、砂岩铀矿绿色智能探采、硬岩铀矿安全高效探测、放射性共伴

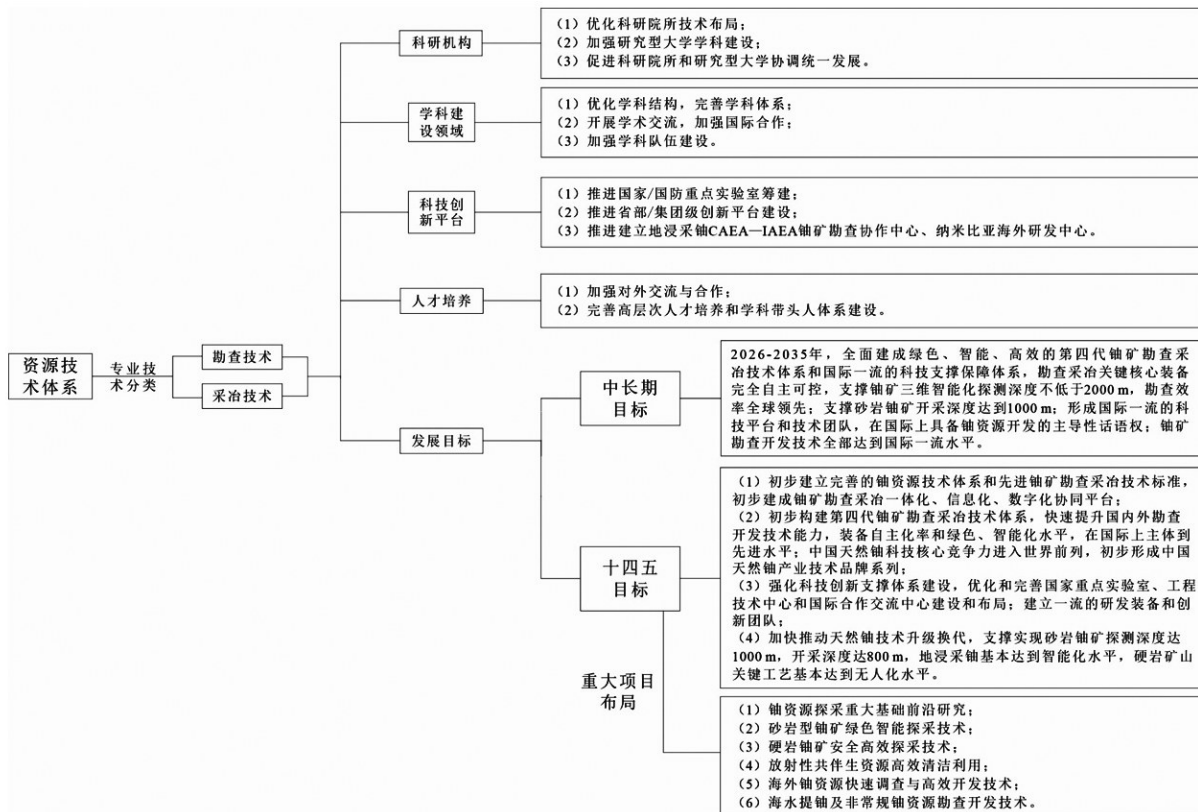


图1 中国第四代天然铀勘查采冶技术体系型谱图

生资源高效清洁利用、海外铀资源快速调查与高效开发、海水提铀及非常规铀资源勘查开发6个领域开展重点科技攻关,细化了具体的研究目标、重点内容和一系列先进的技术经济指标,并按关键时间节点分步推进实施。绘制过程中,始终坚持产学研用一体化的思路,在充分发挥首席专家、科技委和下属科研院所科技引领作用的同时,密切与矿山开发单位和钻探生产队伍对接,反复论证,确保了清晰的发展路径和正确的研发方向。

3.3 强化系统思维理念,着力突破关键核心技术短板弱项

围绕关键核心技术发展主线,开展技术研究统筹策划。针对同一个核心技术面临多渠道分散支持的“撒胡椒面”现象,集成不同渠道的研究成果,形成显示度高、实用性强的技术成果。通过发布技术立项指南、编制统筹项目建议书等方式,在专业发展内部形成合力,通过强化内部技术成果集成,避免了研究成果“小、散、浅”现象。

运用系统思维理念,通过关键核心技术为主线的持续优化布局,实现了技术研究的结构性调整,构建探采一体化协同机制。即在勘查阶段铀矿冶研究生产单位介入,对相应区段资源可开采利用情况进行技术研发,跟踪铀矿勘查全过程,将铀资源的可开发利用情况反馈至地勘单位,及时实施方向指导或调整;而在转入开发技术攻关阶段后,地勘单位也全程介入,指导钻孔施工、水文试验,实现优势互补,为铀资源快速突破奠定基础。

3.4 激发联合创新强动能,多维度构建协同创新大平台

为落实新时代国家创新驱动发展战略,进一步发挥市场在资源配置中的决定性作用,在天然铀、综合矿业、地矿延伸3大产业领域,扩大开放协作,联合开展基础理论和关键核心技术攻关,补足能力短板,提升天然铀产业科研发展潜力,助力产业转型。

1) 组建海水提铀创新联盟,打造多元开放融合创新平台。

立足颠覆性、先导性技术研究需要,按照国内单位大联合、优势力量大协作的攻关思路,集中联合中国科学院高能物理研究所、清华大学、北京大

学等23家高校、50多个高水平科研团队,组建以中国核工业集团有限公司为发起单位、中国铀业有限责任公司(简称中国铀业)为组织实施单位、中核矿业科技集团有限公司为秘书单位的中国首个海水提铀创新联盟,最大限度吸引、容纳和聚集优势创新资源,为加快推动海水提铀技术向商业化迈进,国家核能事业可持续发展提供长期稳定的铀资源保障支撑平台。目前联盟完善了组织构架,制定了章程、学术委员会管理办法等,发布了海水提铀中长期规划和联盟基金项目指南,初步构建了海水提铀材料性能测试标准和评价体系,海水提铀材料吸附容量将达到3.7 mg/g;筹划了海水提铀试验基地建设方案,为中国在前瞻性、颠覆性技术领域抢占科技战略制高点。

2) 构建中国铀业联合创新基金,开拓与高校技术合作新模式。

2016—2020年,基于中国铀业与多所地质院校签署产学研合作框架协议,多方联合出资设立联合创新基金,旨在借助国家级重点实验室的科技创新平台,吸引和汇聚全国相关研究领域优秀人才。通过组织联合科技攻关,解决天然铀产业生产科研中遇到的关键技术难题,大幅提升自主创新能力和企业核心竞争力,有效支撑天然铀高质量发展。目前联合创新基金已向科研生产急需、项目建设、安全环保等关键技术难题聚焦,形成了涵盖11个研究方向的立项指南,面向全社会公开发布,从122项立项实施方案中优选出18项予以支持。以“揭榜挂帅”方式发挥优质科研力量,高质量开展科研攻关,实现合作共赢。

3) 积极参与北斗产业链发展,融入创新发展新格局。

在核工业北斗分理服务平台的基础上,实施铀资源勘查、核生产巡检、核设施形变监测等北斗应用示范系统及相应北斗终端研制,打造多个北斗应用场景首批示范工程,实现北斗高精度技术向铀资源勘查采冶服务产品的转化,加速推进天然铀产业向网络化、智能化转型发展。针对核地矿信息化建设急需,组织开展天然铀领域“北斗+”应用研究,在内蒙古通辽、湖南衡阳、河北涿源、新疆准噶尔建

设北斗应用场景首批示范工程,打造集地质勘查、填图、钻井、取样、生产巡检、核设施建筑物、边坡监测等为一体的综合保障体系^[18],实现从终端到产品、从基础服务到解决方案的动态数据链覆盖,构建服务技术军民共用、北斗产业融合发展的新格局。

3.5 厚植创新文化沃土,营造良好创新生态环境

加强以市场为导向、需求牵引的项目申报机制,精简项目申报流程、简化过程管理、在项目实施期间实施“里程碑”式管理,同时针对科研仪器设备耗材等采取更灵活便利的采购方式,给予科研设计单位更大的自主权,突出创新、成果、实绩导向,建立项目研发过程中的容错机制。在研究机构倡导勇于挑战学术权威,打破常规的氛围与文化,建立允许试错、鼓励“冒险”的创新文化环境,充分向科研一线人员减负,建议树立“唯品德、唯能力、唯成果、唯转化”新四唯,弘扬新时代科学家精神和“两弹一星”精神,激发创新积极性和主动性,为天然铀科技创新事业强劲、可持续发展提供不竭的智力源泉。

4 取得成效

4.1 有力支撑关键核心技术突破,保障国家核力量建设和核能健康发展

中国第四代天然铀勘查采冶技术创新体系的实施和推进,及时积累了技术研发和装备研制过程中的创新成果。以北方沉积盆地为研究对象,创建了砂岩型铀矿渗入渗出模式、双阶段双模式等成矿理论体系,突破了传统认识,拓展了找矿空间,实现了更大深度和多项预测技术的跨越,突破了砂岩型铀矿勘查新区、新层位、新类型,使中国探明砂岩型铀矿资源量跃居世界前列^[19-21];国际首创了多层矿“同时同采”、疏干矿采矿环境再造、复杂铀矿高效浸出、分布式集约化水冶技术,破解了难浸、难采、难冶铀资源难以高效开发的世界级难题,构建了自主可控的复杂砂岩铀矿采冶技术体系^[22],支撑建成了中国北方千吨级铀矿大基地,核心技术指标国际领先,技术已全面推广应用,盘活了数十万吨“呆矿”资源,使地浸产能占中国总产能90%以上,全面推动了天然铀产业转型升级,为国防建设和核能发展提供了坚实保障。

4.2 全面提升自主创新能力,引领天然铀产业加速发展

自全面推进实施创新体系工程以来,天然铀产业科技创新能力显著增强,首次构建了覆盖基础理论、科研设计、工程验证、生产和综合保障的创新能力体系,开创了我国天然铀勘查采冶技术体系发展的新局面。各类型成果产出数量逐年攀升、硕果累累,2016—2020年,专利数量和授权数量平均年增长率达10%,累计授权国家发明专利316件、出版专著12部、发表论文千余篇、形成标准规范100余项、荣获省部级奖25项,其中“千吨级大型铀矿基地绿色高效原地浸出技术及工程应用”“中国砂岩型铀矿理论技术体系创新与找矿重大突破”等3个技术成果获得国防科技进步特等奖1项、一等奖2项。

4.3 持续提升品牌效应与国际影响力,经济效益显著增长

依托创新体系成果,成功向沙特阿拉伯提供铀资源勘查中国方案,践行了国家“一带一路”倡议,树立了天然铀产业“全产业链”走出去战略的成功典范;国家百项重点工程——中国北山地下实验室开工建设,标志着中国高放废物处置研究正式步入地下实验室科研阶段;独居石精矿综合回收铀、稀土和钍工艺的打通,支撑建成了年处理 1.5×10^4 t精矿和年处理 5.0×10^3 t优溶渣的生产线;创新提出了原矿氧压浸出技术,使铀的浸出率由30%提高到75%以上,盘活了 3.0×10^6 t铀钼资源,延长矿山寿命40年,使企业“涅槃重生”。

5 结论

科技创新是推动中国天然铀产业高质量发展的重要因素。天然铀勘查采冶技术历经60多年的发展,形成第四代天然铀勘查采冶技术创新体系。目前在新的形势下,单一的技术创新或者技术引入已不足以提升天然铀产业的整体水平,只有构建完备的天然铀勘查采冶技术体系,才能全面形成科技创新的强大动力,实现天然铀产业水平的整体跃升。在天然铀产业进入高质量发展时代,加快构建第四代天然铀勘查采冶技术创新体系不仅有利于天然铀产业的基础技术、共性技术、关键技术的研

发,而且能够推动技术资源的优化整合,体系化运行,从而促进天然铀产业技术创新,为产业发展提供内生动力,增强国际竞争力。

参考文献(References)

- [1] 国家创新驱动发展战略纲要[M]. 北京: 人民出版社, 2016.
- [2] 潘教峰, 万劲波. 新时代科技强国战略[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(5): 569-577.
- [3] 孙锐. 构建支撑创新驱动的国家人才优先发展战略体系——探寻习近平总书记人才战略思想[J]. 中国人才, 2018(6): 18-21.
- [4] 张晓, 蔡煜琦, 林双幸. 后疫情时代世界天然铀供需结构与我国天然铀供需趋势分析[J]. 地质论评, 2022, 68(4): 1511-1522.
- [5] 潘教峰, 王光辉. 创新驱动发展战略的实施及成效[J]. 科技导报, 2022, 40(20): 20-26.
- [6] 韩扬眉. 我国核工业水平从“跟跑”追至“并跑”[N]. 中国科学报, 2022-04-06(003).
- [7] 苏罡. 中国核能科技“三步走”发展战略的思考[J]. 科技导报, 2016, 34(15): 33-41.
- [8] 叶奇蓁, 苏罡, 黄文, 等. 中国核能现代化发展战略[J]. 科技导报, 2022, 40(24): 20-30.
- [9] 王成. 关于高质量开展“摸清家底”实施好铀矿勘查规划的思考[J]. 铀矿地质, 2022, 38(4): 571-581.
- [10] 张金带, 李子颖, 苏学斌, 等. 核能矿产资源发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 113-118.
- [11] 王成, 宋继叶, 张晓, 等. “两碳目标”下铀资源的保障能力及应对策略[J]. 铀矿地质, 2021, 37(5): 765-779.
- [12] 朱鹏飞, 蔡煜琦, 郭庆银, 等. 中国铀矿资源成矿地质特征与资源潜力分析[J]. 地学前缘, 2018, 25(3): 148-158.
- [13] 李子颖, 秦明宽, 范洪海, 等. 我国铀矿地质科技近十年的主要进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(4): 845-857.
- [14] 蔡煜琦, 李子颖, 刘武生, 等. 铀矿大基地资源扩大与评价技术研究[J]. 世界核地质科学, 2022, 39(2): 173-185.
- [15] 苏学斌, 李喜龙, 刘乃忠, 等. 环境友好型地浸采铀工艺技术与应用[J]. 中国矿业, 2016, 25(9): 97-100.
- [16] 苏学斌. 高效绿色发展, 推进铀矿大基地建设[J]. 中国核工业, 2016(11): 16-19.
- [17] 苏学斌, 胥建军. 中国铀矿山绿色安全的现状与发展思路[J]. 铀矿冶, 2017, 36(2): 119-125.
- [18] 张明林, 刘洋, 吴建勇, 等. 中国铀矿地质勘查信息化建设现状及“十四五”发展思路[J]. 世界核地质科学, 2021, 38(3): 227-294.
- [19] 秦明宽, 李子颖, 蔡煜琦, 等. 对加强我国铀资源勘查“三新”突破的战略性思考[J]. 世界核地质科学, 2022, 39(3): 383-398.
- [20] 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 等. 砂岩型铀矿的“双阶段双模式”成矿作用[J]. 地球学报, 2021, 42(6): 823-848.
- [21] 李子颖, 刘武生, 李伟涛, 等. 内蒙古二连盆地哈达图砂岩铀矿渗出铀成矿作用[J]. 中国地质, 2022, 49(4): 1009-1047.
- [22] 孙占学, Asghar F, 赵凯, 等. 中国铀矿采冶回顾与展望[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(8): 1-8.

Establishing and advancing China's innovation system for fourth-generation natural uranium exploration, mining and metallurgical technologies

YU Xiang^{1,2}, SU Xuebin³, SUN Ye³, WEN Zhenqian³, REN Yu³, LIU Zhangyue⁴, CHANG Xixin⁵

1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. China Nuclear Geology, Beijing 100013, China

3. China National Uranium Co., Ltd., Beijing 100013, China

4. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

5. China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China

Abstract Building China's nuclear force and healthy development of nuclear energy require an urgent upgrade of natural uranium exploration, mining, and smelting technologies. Based on the current evaluation results of the current technical level of such technologies, a catch-up technology benchmarking system is established, advantageous resources are integrated, and a China's fourth-generation natural uranium exploration, mining, and smelting technology innovation system is constructed. The technology innovation system is guided by the "three-step" strategic thinking of scientific and technological innovation, striving to break through the weaknesses of key core technologies, drawing a blueprint of the fourth-generation technology system, introducing a series of measures such as building collaborative innovation platforms, fostering high-level and multi-tiered scientific and technological talent teams, and cultivating a favorable environment for innovation. Through the implementation of these measures, significant achievements have been obtained and several key core technologies have been internationally pioneered. This will comprehensively enhance China's independent innovation capabilities, with the output of achievements increasing year by year, significantly boosting the core competitiveness of China's natural uranium industry.

Keywords natural uranium; technological innovation system; fourth generation exploration technology; fourth generation mining and smelting technology ●



(责任编辑 傅雪)