苏学斌参与建设的天山千吨级数字化铀矿大基地。 受访者供图

苏学斌：地浸采铀，从“跟跑”到“领跑”的飞跃

总师对话

◎本报记者 孙明源

新疆、内蒙古等地多个大型、超大型复杂低品位砂岩铀矿床曾被认为是无法开采的“呆矿”，如今却成为国内天然铀供应的主力军。这一转变背后，原地浸出采铀（以下简称地浸采铀）技术创新发挥了重大作用。截至目前，地浸采铀产量已占全国天然铀总产量90%以上，创造了显著的经济效益和社会效益。

中国铀业股份有限公司总工程师苏学斌长期致力于地浸采铀技术创新，突破国外技术封锁，探索出一条符合我国国情的复杂低品位砂岩型铀矿地浸采铀技术路线。目前，他正带领团队在鄂尔多斯盆地铀煤叠置区开展技术攻关。

近日，苏学斌接受了科技日报记者的采访，讲述我国采铀技术如何实现从“跟跑”到“领跑”的飞跃。

探索出符合国情的技术路线

记者：我国铀资源的储备情况如何？

苏学斌：根据经济合作与发展组织核能机构和国际原子能机构联合于2023年发布的《2022年铀：资源、生产和需求》，我国已探明铀资源量约占全球总量3.34%。相比哈萨克斯坦、澳大利亚、加拿大等铀资源大国，我国铀资源呈现赋存条件复杂、品位低、较分散的特点。

我国铀资源广泛分布于震旦—寒武纪地层和拥有多个盖层发育的陆相盆地，无论是花岗岩型还是砂岩型铀矿都十分丰富，问题是成矿地质条件复杂、矿体开采难度大。而我国核电和国防事业在快速发展，需要大量的天然铀，供给满足不了需求。供给缺口目前可以靠进口填补，但我们不能忽视国内铀矿的开采，毕竟铀资源供应事关国家安全。

记者：您长期致力于地浸采铀技术研发，请您介绍一下地浸采铀技术的原理和优势。

苏学斌：传统的采铀方法是打巷道布采场直接挖。为了接触到地下矿层，要从地面向下深挖几百米。这种方法对自然环境影响较大。

地浸采铀是从地面向下钻一个几百米深的孔，向其中注入浸出剂去溶解矿石，实现砂岩铀矿原位开采。这一技术可以避免对自然环境“开膛破肚”，无井巷工程、地表堆场，不破坏植被。

记者：地浸采铀技术的难点是什么？

苏学斌：难点在于我们要探索出符合我国国情、地情的技术路线。

地浸采铀分酸法、碱法和中性浸出三种工艺，顾名思义就是在采铀过程中使用酸性、碱性或接近中性的浸出剂。浸出剂是研发的重中之重，不过酸性或碱性浸出剂都具有较强的腐蚀性，溶浸范围控制不好，会扩大采区溶浸影响区域，造成采区外的地下水污染。此外，不同浸出剂的溶解效率也不一样。

为了提高采铀效率、避免污染环境，我们必须找到合适的浸出剂，并且研发出与其适配的全套装备。

记者：其他国家也面临这样的采铀难题吗？

苏学斌：一些铀资源禀赋较好的国家可以采取相对粗放的技术路线。不过，我国的铀矿开采地质条件很复杂，同时我国非常重视环保，因此必须发展高效率、低污染的技术路线。

我们研发出的技术产品，如“二氧化碳+氧气”浸出工艺，除了应用于我国，也可以帮助其他国家开采条件复杂的铀矿。

记者：您可以详细介绍一下“二氧化碳+氧气”浸出工艺吗？

苏学斌：这个工艺的名字——“二氧化碳+氧气”听起来很普通，但它的技术含量很高，相关成果曾获国家科学技术进步奖二等奖。我们把二氧化碳和氧气一起融入水中，将其作为浸出剂注入地下，在封存二氧化碳的同时高效提取了铀。该工艺不仅安全环保，还可以在复杂地质条件下实现开采。

记者：这项工艺的名字和原理听起来似乎不复杂。

苏学斌：是的，听上去简单做起来难。它凝聚了我和团队几十年的心血。

有化学常识的人都知道，二氧化碳和氧气都是不易溶于水的气体，光是让它们溶解就是个不易解决的难题。在实际研发过程中，这样的问题有成百上千个。

除了浸出剂，与该技术配套的试剂、装备等也需要我们逐步研发出来。它们组成一个各部分相关联的庞大系统。我和团队几十年的工作，都是围绕打造这个系统展开的。

辗转南北“钻”透复杂铀矿

记者：让我们从源头讲起，您是怎么进入地浸采铀领域的？

苏学斌：30年前，我国的铀矿勘查重心还在南方。我是云南腾冲381试验队队长，和其他几个年轻人长期驻扎在西南边疆，研究地浸采铀技术。

那时，我们的导师是我国地浸采铀技术创始人王西文。我们用钻井向矿层注入浸出剂，就可以实现在地下的原位开采，最大程度提高采铀效率、减少对环境的破坏。

记者：那时，浸出剂的核心成分还不是“二氧化碳+氧气”吧？

苏学斌：没错。那时，我们用的是酸性溶液，针对试剂性质和当地铀矿特点，我和同事建立了“含铀溶液化学—运移和吸附—沉淀理论”模型。

后来，我国北方发现了砂岩铀矿。这种类型的铀矿比南方的硬岩铀矿更适合应用地浸采铀技术，所以我们转战新疆。

在新疆，我们以库捷尔太铀矿为对象开展试验，不断改进酸法地浸工艺及配套的装备。当时，我们把铀资源采收率提高到80%，达到了国际先进水平。

不过，采用酸法地浸工艺，溶蚀矿物多、试剂消耗大，并不是所有的矿床都能采用这种方法。遇到碳酸盐含量高的矿床，这个方法就行不通了。

记者：面对这么难采的铀矿，您和团队想到了哪些好办法？

苏学斌：我们从云南走到新疆，经历了一个又一个春夏秋冬，不知做了多少次实验，终于有了意外发现。

按照传统理论，要想溶解铀，浸出剂的pH值要么小于2，要么大于9，也就是说非酸即碱。但有一次，我偶然发现一块暴露在空气中的铀矿矿芯，其未加酸或碱，只是和空气接触数月。它在经水浸泡后，铀浸出率竟达到30%。

那时，我隐约意识到，空气中某些物质或许可以帮助溶解铀，但这只是万里长征第一步。要把“二氧化碳+氧气”做成浸出剂，乃至建立可行的地浸系统，需要闯过无数道难关。回过头来看，我整个青年时代都投入在这项事业上了。

记者：您从何时开始应用“二氧化碳+氧气”浸出工艺？

苏学斌：2000年前后，在新疆吐哈盆地，由于当时此地矿床的地下水矿化度高，矿岩中的碳酸盐含量也很高，采用酸法地浸工艺根本行不通，堵得一塌糊涂。根据偶然的室内试验结果，我们初步开展了“二氧化碳+氧气”条件试验，极大地改善了矿层堵塞情况。不过，那时“二氧化碳+氧气”浸出工艺还不成熟，2006年我们又转战内蒙古松辽盆地，对该工艺进行持续改进。

记者：在内蒙古工艺应用情况如何？

苏学斌：位于内蒙古松辽盆地的钱家店铀矿，是一座被外国专家“判了死刑”的铀矿。钱家店铀矿位于中国石油天然气集团有限公司（以下简称中石油）的矿区内。发现铀矿后，中石油请了乌兹别克斯坦的专家来看。外国专家做了3年的调研，最终判定该铀矿地质条件太差，不可能开采。

乌兹别克斯坦是产铀大国，有着丰富的地浸采铀技术理论和实践经验。这位专家的意见，当时应该说是很有权威性的。

记者：既然这个矿已经被“判了死刑”，您和团队为什么还要冒险一试呢？

苏学斌：客观原因是中石油和中国核工业集团有限公司（中国铀业股份有限公司上级单位）签订了合作协议，请我们到钱家店铀矿再去试一试。主观上来说，我们自己也想接受这个挑战，看看“二氧化碳+氧气”浸出工艺能否让这个铀矿“起死回生”。

记者：“起死回生”的过程是怎样的？

苏学斌：从2006年开始，我和团队在钱家店铀矿一共实施了三期项目，其中前两期都是我负责的。我主持开展了“二氧化碳+氧气”地浸采铀条件试验，基于仿真科学装置构建了成矿逆过程浸出环境，提出了几条重要的技术路线，研制出与“二氧化碳+氧气”浸出工艺配套的浸出剂高效配方并摸索出配套的提铀方法。

从2006年到2015年，我们实现了二氧化碳的资源化利用，试剂消耗减少了75%，生产成本降低了约50%，铀矿经济开发的边界品位也由0.03%降至0.01%，盘活了大量的低品位砂岩铀资源。2016年以后，“二氧化碳+氧气”浸出工艺在全国多地实现了工业化应用。

记者：整个过程完全靠我们自己吗？

苏学斌：外界的帮助完全指望不上。一些产铀大国的技术路线不适合我国，个别国家的技术虽然先进，但它们对我们实施技术封锁，因此只能靠自己慢慢摸索。经过几代人的努力，目前我国成为全面掌握酸法和中性地浸采铀技术的少数国家之一。

用先进制度为人才成长铺路

记者：如您所说，地浸采铀系统涉及试剂、装备、操作方法等诸多方面，想必这需要一支庞大的研发团队。您是怎么管理这样一支队伍的？

苏学斌：我们的团队经历了一个成长的过程。一开始，我们的技术还比较稚嫩，团队人数也少，仅十余人。后来，随着技术不断成熟，加入的新成员越来越多，团队规模不断壮大。

在带团队的过程中，我比较注重产学研结合，促进团队成员与科研院所和企业的密切合作，避免科研与生产脱节。另外，我还比较注重技术标准设定，标准设定好后，各个部门、领域的科研工作者对接工作就更加顺畅了。

记者：据我所知，铀矿的工作条件是非常艰苦的，矿区位置偏远、风沙大。您如何帮助大家克服这些困难？

苏学斌：首先，技术进步起到了巨大的推动作用。几十年前，铀矿的工作条件更加艰苦。那时，在南方山区，开采一座铀矿需要成千上万的工作人员，生产效率还很低，大约是“百人一吨”。大家生活水平差，面临的风险也多。

现在有了成熟的地浸采铀技术，以及配套的数字化、自动化技术，铀矿从业者的工作条件得到了较大改善。矿区只需要少量人员值班，大多数工作人员可以在城市里进行远程操作，艰苦程度大大降低。

记者：我们有哪些吸引、扶持人才的制度？

苏学斌：第一，切实提高相关从业人员的待遇。例如，七成科研成果转化净收益可被团队分配，用于激励科研人员。对于优秀的专利发明者，我们会给他们提供额外的奖金。

第二，给青年人才提供机会。例如，所有项目负责人中，青年占比不低于30%。此外，我们还建立了人才推荐机制，给青年科研人才提供更顺畅的上升通道。

同时，我和公司内其他首席技术专家必须在每届任期内培养一批学生。我带过一些很优秀的青年，我国地浸采铀技术发展是后继有人的。未来，我们还要努力解决“铀煤共生”问题和南方硬岩铀矿的地浸法开采问题。有这样一支靠得住的青年团队，我很有信心。

王小力摄

记者手记

苏学斌说，地浸采铀是个有些抽象的名词，不容易让人知道它的分量。其实，这项技术对国家、对生态环境以及对从业者来说，都意义重大。

苏学斌亲身经历过技术落后的年代，他深知传统开采方法给矿工带来了沉重负担。如今，能够实现“千米之上巧取铀矿”的地浸技术切实改变了矿区从业者的工作状况。

在科尔沁草原工作多年，苏学斌对这块土地的感情很深。他说，成熟的地浸采铀技术只需要少量钻孔和软管，就可以从数百米地下提取出铀。能助力保护辽阔的草原和农田，他很欣慰。

三十年如一日，苏学斌始终走在我国地浸采铀技术的最前沿。他所在的地浸采铀创新团队，从基础研究到关键技术攻关再到工程设计与应用，实现了我国地浸采铀技术从“0到1”的突破。这些技术成就饱含科研工作者对我国地情、国情的深刻洞察，以及技术向善的人文关怀。

人物档案

苏学斌，中国铀业股份有限公司总工程师、中核集团铀矿采冶领域首席专家、地浸采铀创新团队主要负责人；在新疆、内蒙古等地开展砂岩铀矿地浸采铀理论研究、关键技术攻关和工程实践30余年，所在团队攻克了低品位、低渗透、高碳酸盐、高矿化度等复杂砂岩铀矿开发难题，为推动铀矿采冶技术进步作出了突出贡献。

奋进者

吴小易：把石斑鱼送上更多百姓的餐桌

◎本报记者 王祝华
实习生 谢卓
通讯员 张刘嘉懿

10月8日，科技日报记者走进海南大学海洋学院101养殖室，只见一尾尾身带斑点花纹的石斑鱼正在养殖缸里来回游。

过去10年，为了实现石斑鱼集约化养殖，海南大学教授吴小易及其科研团队克服了重重困难。

“依靠自己的力量端牢中国饭碗”

海南岛四面环海，海洋生物资源十分丰富。作为优良热带海产品种，石斑鱼味道鲜美、市场需求较大，但其规模化、集约化养殖却面临诸多难题。

“尤其是珍珠龙趸石斑鱼，它是目前海南乃至全国主要养殖的石斑鱼品种。不过，针对珍珠龙趸石斑鱼的营养与饲料，此前国内外学界都未开展过相关研究。”吴小易说。

要实现石斑鱼生态化、集约化养殖，研制出营养均衡的低鱼粉饲料是关键。鱼粉营养价值高，是养殖石斑鱼主要的饲料原料，但是我国鱼粉供应在很大程度上依赖进口。

“我们要依靠自己的力量端牢中国饭碗，让百姓的餐桌更丰富。”吴小易说，要降低进口依赖，尽可能在石斑鱼饲料中降低鱼粉的含量。

为此，吴小易科研团队在石斑鱼营养及功能性饲料开发方面进行了深入而系统的研究，并联合5家单位一起进行技术攻关，将饲料中的鱼粉含量从70%降低到20%。

比例变化的背后，是10年的钻研探索。

“10年间，我们团队不仅构建了石斑鱼基本营养需求参数数据库，创建了基于陆源蛋白源和生物基因工程产品的石斑鱼低鱼粉饲料配比技术体系，降低了饲料中的鱼粉含量。此外，我们还在饲料中加入蒲公英、银杏叶等中草药，以提高石斑鱼的免疫力。”吴小易介绍道。

凭借这一成果，吴小易科研团队获得2021年度海南省科学技术进步奖一等奖。相关研究成果发表在《水产养殖》（Aquacultuure）、《英国营养杂志》（British Journal of Nutrition）等学术期刊上。

“搞科研不能脱离经济社会发展需要”

“搞科研不能自我封闭，更不能脱离经济社会发展需要。”吴小易说，“10年前，虽然科研条件有限，但是在学校的大力支持下，我们抓住校地合作契机，与海南省昌江黎族自治县石斑鱼养殖企业建立了合作关系。”

如今，基于石斑鱼营养学的多项科研成果，吴小易科研团队已经与海南省内外多家企业建立了稳定的合作关系。相关成果转化落地，不仅提高了这些企业的经济效益，还带动了周边农户就业，产生了良好的社会效益。

在吴小易科研团队成员张金枫看来，吴小易是一位和蔼可亲、极具耐心的老师。他向记者回忆道，在新冠疫情肆虐时，因为学校封闭管理，科研团队成员不能离开宿舍区，但研究项目不能随意中断，实验室里的鱼苗需要有人去喂养。吴小易便一个人早、中、晚3次到实验室，完成从喂鱼养虾、饲料配制到养殖系统清洗这一整套的工作。

“吴老师对水产研究的痴迷和执着让团队上下都十分敬佩。”张金枫说，团队能取得今天的成绩，靠的就是这股钻研精神。

成绩属于过去，展望未来，吴小易有更高的目标。

“我们科研团队最终希望通过科技创新，降低石斑鱼的养殖成本，让老百姓得到实惠。”他对记者说，“未来，我们将继续深耕‘蓝色粮仓’，和产业界同行一起打造高质量、高效益、品牌化的石斑鱼养殖产业，把石斑鱼送上更多百姓的餐桌。”

吴小易在实验室观察鱼苗生长情况。 受访者供图