

向地球深处进军

——探秘深地工程领域全球最大的地下实验室

深瞳工作室出品

采写：本报记者 张晔
策划：赵英淑 滕继濮

从地表到地下1万米，石油、天然气、煤炭和许多未知的矿产资源分布其中。近年来，随着浅层传统化石能源开采越来越困难，地热、页岩气、页岩油等新兴能源展现出巨大的潜力。

但受技术限制，这些藏在石头里的新兴能源很难被开采利用，开采过程中还会增加地震的风险，已有多个国家和地区关闭矿井。我国是世界上页岩油气储量最为丰富的国家之一，但页岩油气大多位于地下3500米以下的深地层，开采难度极大。

深地有哪些资源可以利用？如何在利用深地资源时避免不可预知的灾害？

在江苏徐州市区卧牛山地下100多米处，有一座深地工程领域全球最大的地下实验室——深地科学与工程云龙湖实验室（以下简称“云龙湖实验室”）。

10月15日，科技日报记者在云龙湖实验室看到，四通八达的主通道两侧，是大小不一的洞室。这些洞室便是一个个科研平台，进进出出的工作人员正努力“唤醒”这片“沉睡”的地下空间。

“我们对脚下的世界，尤其是深地空间知之甚少。”云龙湖实验室主任、中国矿业大学教授李晓昭说，地下物质成分复杂，结构多样，“透视”难度大，人类目前对深地的认知甚至比深空、深海更少。

该实验室成立以来，依托中国矿业大学等单位，围绕地球深处的能源资源开发、智能建造、物质封储、安全防护等国家需求和未来产业方向，科研人员正不断攻关深地科学和工程难题。

你追我赶的深地科学计划

我国是世界人口大国，也是能源、矿产资源消耗大国。一方面，我国可耕地总量严重不足；另一方面，随着我国浅部资源开发殆尽，不得不在严苛条件下开发深地资源，以缓解油、气、铜、铁等战略性矿产资源严重依赖进口的窘境。

为此，向地球深处进军是我们必须解决的战略问题。为向地球深处要资源、要空间、要安全，2021年，徐州市依托中国矿业大学等单位，将卧牛山人防工程改造为云龙湖实验室。

过去，世界各国已建成的地下实验室大多聚焦暗物质搜寻、地球科学及放射性废物封存等。例如，2010年成立的中国锦屏地下实验室主要以开展暗物质基础研究为主。

近年来，世界上很多发达国家启动深地科学计划，成立相关地下实验室，开始把研究重点放在深地新兴能源的高效开发利用、深地空间能源物质储存和深地空间碳废安全封储上。

例如，美国桑福德地下试验重大设施主要研究深地储层人工与天然裂隙流体运移规律和致震机理；瑞士格里姆瑟尔试验场有多达25个国际合作组织参与，是世界主要的研究深地流体物质在天然地质岩体和人工屏障系统运移过程的原位科学试验平台；英国爱丁堡地质电池地下矿井储热

设施聚焦废弃矿井，研究如何储热并直接为周围用户家庭供暖；瑞典吕勒奥地下储氢设施是世界首个地下洞室储氢科学试验设施，探索氢能“制一储一用”产业链高效运行新模式。

客观上说，与世界发达国家相比，我国在深地领域的科学研究和工程实践方面仍存差距。例如，当前勘探开采深度世界先进水平已达2500米至4000米，而我国勘探开采深度大多小于1000米；2022年4月公布的数据显示，我国页岩油的开采成本为每桶50美元至80美元，美国的开采成本为每桶30美元。

这些数据为我国“向地球深处进军”指明了方向。

李晓昭介绍，云龙湖实验室采用“一中心一站N基地”的总体布局。除主基地以外，实验室还建有野外观测站和其他原位试验场等多个分基地。科研人员将在此开展深地基础研究、跨学科交叉融合研究及协同攻关，旨在形成原创性、颠覆性技术，为深地能源开采、深地空间开发利用等带来重大突破。

李晓昭告诉记者，深地科学不是简单的地质学，而是包括若干重要研究方向的前沿交叉科学，如深地空间探测开发、原位保真取芯技术、深地非常规岩石力学行为、深地结构与开采的透明推演理论与技术、深地地震学与地球物理学、深地微生物学、深部资源开发与能源储存、深地地下水赋存、运移及水质变化、地下生态圈等。

作为云龙湖实验室的主要依托单位，近年来，中国矿业大学围绕深部地下空间开发中的重大基础理论与关键技术难题，持续深入开展前沿理论和前瞻技术研究。

通过多年积累，中国矿业大学已形成了涵盖深部岩石力学、超深井建设、深部空间围岩控制和深部动力灾害防控等独具特色的研究体系。云龙湖实验室启动建设之后，中国矿业大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室（以下简称“深地国重”）在基础理论、工程技术、装备研发等方面，为云龙湖实验室提供全方位支撑。

照搬国外技术肯定不行

我国有2/3的页岩可采资源储存在埋深大于3500米的地层中，大部分页岩油气地层的沉积环境都是陆相沉积。而美国的页岩油气主要来自海相沉积，分布面积大、稳定性好、岩相类型比较单一，非常利于开采。地壳被不断挤压抬升，会使地质构造产生大量的断层。如果把页岩油气地层看作是一个盘子，美国的地层是一个完整的盘子，而我国的地层是一个掉在地上摔碎了、又被踩了几脚的盘子。

目前，我国油气资源的开采深度接近万米。直接照搬国外技术肯定不行。这样的深度下，怎样将石油、天然气安全抽取出来，同时又不诱发地质灾害？

“条件不同、情况不同，就得‘对症下药’，我国的页岩油气开发还有很长的路要走。”李晓昭说。

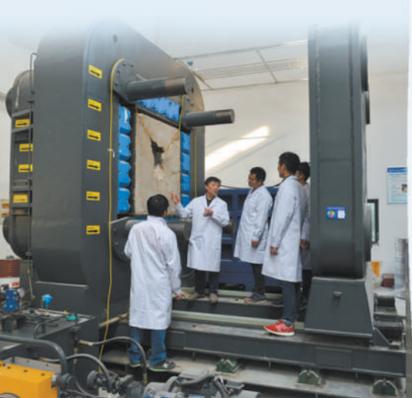
同时，如何科学利用采空的地下矿井成为新的课题。目前，世界各国都在研究将废弃的矿井用来储存石油、天然气、二氧化碳以及核废料等。“例如，在邳州石膏矿采空区，矿井埋深为50至400米，是很好的原位实验场地，许多技术装备可以在这里进行现场开发、验证，比如多功能系列实验舱、地下岩隙检测等技术，一旦成熟就能立刻用于流体能源开发、地下储能、热/碳/废安全封储等领域。”李晓昭说。

目前，将核废料封存在地下深处是主流技术方向。

“存放核废料的深坑经过缜密选址，地下岩石属于低渗结构，要求一万年仅有厘米级渗流。但现实中，谁也无法进行那么长时间的观测实验，因此低渗岩体渗流演化成为一个‘黑箱子’。”深地国重专家、中国矿业大学教授刘江峰说，实验室自主研发的软件和装备，在全球首次实现利用数字技术精确计算水、气在低渗岩体一万年的渗流演化情况，就连美欧发达国家也必须从实验室购买授权。

此外，这套软件和装备还可用于评价我国南海可燃冰流动性等。“可燃冰位于海底3000至4000米，想要顺利开采必须进行流动性评价，但在数千米海底很难进行准确探测。”刘江峰说，利用这套软件和装备，只需采集一些岩芯，就能精确计算出这些深埋地下的能源物质是如何流动的。

在地下能源利用和深地空间开发过程中，



▲中国矿业大学深地工程动力灾害真三轴模拟实验系统。受访者供图

▼云龙湖实验室深地空间环控及生物转化平台。受访者供图



“摸清家底”是首要工作。

过去，传统技术依托钻探和地震波对地下结构进行测绘，但都有不足之处。深地国重专家、中国矿业大学教授王勃带领团队另辟蹊径，通过对深地空间复杂构造构造地球物理探测机理的基础研究，成功研发出“震电磁光智能监测系统”设备及其配套技术。

“当遇到突水、突泥、瓦斯突出、岩爆、冲击地压等灾害时，我们可以通过设备的传感器获取信号，提前了解哪些地方有致灾风险。”王勃介绍说，就像给人做X光一样，通过震电磁光智能监测设备可对地球深处进行探测，再根据探测结果对症下药，以保障深地工程的安全。

此外，云龙湖实验室正在攻克极复杂构造区川藏铁路等重大深地工程致灾构造精细探测技术与装备，并围绕深地空间能源资源封储开展大量工作，在智能导钻和随钻测井方面已取得阶段性突破。

科研平台或是未来地下城市

电影《流浪地球》中的地下城令人印象深刻。未来，我们是否会像电影描绘的那样，长期在地下工作生活？

现实中，随着土地资源日趋紧张，开发利用地下空间，建造地下交通、商业、文娱、仓储、调蓄水等设施，改善地表生态环境，已成为重要发展趋势。

目前，城市地下空间开发深度普遍在50米以内；50米至200米深层地下空间的开发利用，已成为一项重大课题。

云龙湖实验室的一期工程已建成深地装备、数字深地、深地开发和深地环生等4个综合科研平台。它们与深地空间高效利用密切相关，科研人员每天都在这里探索研究基础理论、解决工程难题。

记者乘着摆渡车来到实验室主控中心。这里如同一个高大宽敞的剧场，虽然身处地下，但空气清新、温度适宜。

工作人员介绍说，实验室充分利用了地热能源，通过抽取矿井中的冷热能，对实验室的环境进行调控。

云龙湖实验室主控中心的服务器也与其他算力中心不同。这里充分利用了地下的免费能源结合液冷技术，大幅降低了系统能耗。“我们把地下的冷能收集起来给算力设备降温，服务器散发的热量还可以在矿井中跨季节存储，满足清洁供暖的需求。”李晓昭说，随着AI技术的快速发展，算力中心的耗能越来越大，这些试验为算力中心节能减排提供了全新的思路。

出了主控中心左拐几十米就是深地空间环控及生物转化平台。南京大学的科研团队正在这里模拟地下生态循环系统，比如将厨余垃圾直接转化成畜牧业的饲料和农业的肥料，转化率达95%。未来可以把生活垃圾直接用管道传送到地下处理，不再占用地面空间，也不会带来污染。

对于在地下作业的矿工等群体，如何保障其身

心健康？云龙湖实验室项目管理部副部长凌志云指着环境舱里一具“暖体出汗假人”向记者介绍，假人模拟了人体散热、出汗、呼吸、运动等生理特征，能够测试在高温、高湿的地下环境中，人体各项生理参数的变化。“对于需要长期在地下作业或者生活的人而言，这些数据能够为研发更加舒适安全的智能穿戴装备提供参考。”凌志云说。

在深地空间部署超算中心、工业生产设施，便利使用地下能源，同时高效散热；工业和生活废弃物通过管道直接送入深地空间，高效转化再利用或安全储存……李晓昭告诉记者，随着深地科学与工程不断进步，实验室正在研究的场景都有望在未来成为现实。

未来5年，云龙湖实验室将继续围绕深地空间流体物质运移、深地工程围岩力学响应、深地空间环境演化灾变开展研究，实现深地空间储热与高效利用、深地空间二氧化碳与废物封储、矿山地下空间协同开发与国土空间优化。

延伸阅读

为资源枯竭城市转型铺设未来产业新路

向地球深处进军已成为世界强国之间新一轮科技竞争的热点和难点。目前，世界上尚没有围绕深地资源与空间开发的国家实验室。我国建设深地科学与工程实验室，从而实现引领世界深地领域研究迎来发展机遇。

但基础研究的意义不仅仅在于探索未知世界，更是为加快科技成果向生产力转化、为城市产业转型赋能的科学底座。

徐州是江苏唯一肩负老工业城市振兴和资源型城市转型双重任务的地区。投入重金打造云龙湖实验室这样一个高能级科创平台，并将“深地开发+高端装备”作为5个未来产业之一，其用意不言而喻。

在云龙湖实验室主任、中国矿业大学教授李晓昭看来，徐州作为全国深地领域唯一的国家可持续发展议程创新示范区建设城市，中国矿业大学在深地工程相关领域具有一流科研实力，双方携手，可充分利用废弃矿山开展深地空间开发利用、深地空间安全防护技术与装备等研究，对全国产业转型升级、动能接续转换形成示范效应。

据不完全统计，江苏深地开发与装备年产值达7000亿元。目前，江苏已将“深地深海天空”列入“10+x”未来产业。当下，徐州正依托云龙湖实验室，奋力打造“深地科学—工程技术—高端装备”创新链和“深地探测开发—地下空间利用—智能高端装备—防灾应急救援”产业链，助力加快培育地下空间储油、储能、储废等未来产业，为徐州乃至更大区域的发展提供新动能。

“这对于突破世界深地资源与地下空间开发研究的前沿科技难题、解决国家发展面临的资源空间制约难题、突破深地资源开采极限深度等具有重大战略意义。”李晓昭表示。