

【简讯与热点】

法国地质调查总局在地质碳封存方面的 主要工作与启示

王欢¹, 郑宇舟², 王为³

(1. 中国地质调查局地质文献中心, 北京 100083; 2. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 3. 东方地球物理公司, 涿州河北 072751)

The major work and implication of the French Geological Survey on geological carbon sequestration

WANG Huan¹, ZHENG Yuzhou², WANG Wei³

(1. *Geoscience Documentation Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China*; 2. *China Natural Resources Airborne Geophysical and Remote Sensing Center, China Geological Survey, Beijing 100083 China*; 3. *Oriental Geophysics Company, Zhuozhou 072751, Hebei, China*)

法国地质调查总局(BRGM)成立于1959年,是专门从事地球科学研究和开发的公共机构。主要任务是:为国家对自然资源、环境和土地利用进行可持续管理地球科学研究、开发和咨询,为国家制定和执行公共政策服务,为促进地球科学的发展和工业界的技术开发进行研究和项目开发。

法国地质调查总局在法国本土和法国海外地区的27个地区分支机构总计雇用1000多名员工,其中包括700多名工程师和研究人员。其团队在大约30个国家开展业务。BRGM的科学战略基于六大科学和社会挑战:地下地质和知识、地下水管理、风险和空间规划、矿产资源和循环经济、能源转型和地下空间、数据、数字服务和基础设施。

进入21世纪,全球气候变暖成为各国政府、社会公众与科学界高度关注的问题,碳减排、碳中和成为重要话题,碳捕获、利用与封存技术(CCUS)已成为解决全球气温升高的关键技术和手段。法国地质调查总局利用自身对地下深部地层、构造、岩石有深入了解的优势,主导开展了法国及其他国家的地质碳封存工作,开展的主要工作如下:

法国地质调查总局的专长在于评估将碳捕获、利用与封存(CCUS)技术整合到循环经济中的潜力,为用户提供适合其所在社区特点的解决方案。他们认为,控制温室气体(GHG)排放是应对全球变暖的主要挑战。为了2050年实现碳中和,大气中CO₂浓度的降低自然需要温室气体排放量的急剧减少,但这必然会对某些不可避免的最终用途产生影响。这就是为什么工业设施CO₂减排及其在地下深处永久封存是减少最终排放和实现碳中和的相关互补解决方案之一的原因。

法国地质调查总局认为,地质建造的全球CO₂地质封存能力至少为20,000亿t,可以在数百万年内圈闭大量CO₂。可以设想不同的地质封存技术,包括使用咸水层、以前的废弃油气井、深层煤层或基性和超基性岩石。为了评估这些系统的集成潜力并确保其性能,需要进行上游研究,以评估可能封存CO₂的地质构造,并确定最适合该地区的技术和经济解决方案。从选择排放捕获方法、通过其封存模式到经济开发,CCUS技术可以根据情况覆盖多种情景。

那么,法国地质调查总局在这方面能够做什么呢?法国地质调查总局一直是CO₂地质封存研究和创新的关键参与者,也是许多科学技术网络的专业机构(是法国CO₂俱乐部和CO₂GeoNet协会主席单位)。法国地质调查总局的碳团队开发量身定制的方法,以评估一个区域的潜力以及在项目的不同阶段整合CCUS解决方案的可行性。法国地质调查总局具体工作包括四个方面:

(1)在上游阶段:绘制该地区CO₂排放源和产业集群地质图;使当地利益相关者参与CCUS方案制定;验证这些情景是否满足该地区的特定需求。

(2)关于从工业源或大气源中捕获CO₂:通过将CO₂溶解在水中来捕获CO₂(这是法国地质调查总局的专长之一);层状双氢氧化物(LDH)的电化学还原捕获;使用潟湖(石灰乳)和煅烧进行大气CO₂捕获/封存回路。

(3)在CO₂的地质封存方面:评估地质封存潜力和相关储集层的表征;估算三维动态特征和分析CO₂地质封存容量(体积法);CO₂注入策略和技术的确定和优化;模拟油井或封存系统规模的水-流体-岩石相互作用;通过适当的监测

跟踪现场情况。

(4)关于CO₂的使用和开发:通过地理信息系统(GIS)确定CO₂利用的潜力并规划一个CO₂网络;通过CO₂钝化碱性废物的矿物碳化作用过程,进行碳矿化;通过使用绿色氢气就地转化为甲烷或与地热能协同使用能源;CCUS链的环境分析,碳的生命周期评估。

法国地质调查总局在这方面拥有的技术和数字设施包括:岩石材料的物理化学分析和矿物表征实验室;BioRep平台:深部地质环境研究(高压和极端条件);地球化学数值模拟的GÉNIE平台;地面地球物理的Ter'GEOPHY平台。

法国地质调查总局在这方面拥有的专利权包括:(1)通过无定形混合氧化物方式捕获、分离和净化气体的工艺(专利号:FR 09 02940);(2)大气CO₂吸收工艺——碳酸盐行业(专利号:FR 12 61556);(3)大气CO₂吸收工艺——盐部门(专利号:FR 12 61557);(4)通过处理磷矿吸收大气CO₂的工艺(专利号:FR 20 03466)。

法国地质调查总局所开展工作的一些案例包括:(1)为在南欧和东欧部署CCUS技术制定CCUS部门发展战略计划(战略CCUS项目);(2)地质封存场地的地球物理表征、注入建模/模拟、监测计划的制定和井的设计(PilotSTRATEGY项目);(3)开发捕获示范(CHEERS和3D项目);(4)欧洲陆上CO₂封存(ENOS项目);(5)通过地热双重层在咸水层中的CO₂注入先导系统(CO₂溶解项目);(6)利用与封存生物质转化产生的CO₂用于温室栽培(CO₂SERRE项目)。

在潜在CO₂封存场地的表征方面,法国地质调查总局也开展了大量工作,帮助客户评估其设施下的碳排放的地质封存潜力。法国地质调查总局认为,对CO₂在地下行为的了解表明,在超过800 m深度的储层岩石孔隙中,碳以致密形式(超临界状态)被有效捕获。对于一个工业公司来说,要抓住这个机会,必须研究其排放CO₂最多的设施周围的所有地下参数,以准确评估地质封存CO₂的能力。

法国地质调查总局在CO₂地质封存研究和创新方面是一个被广泛认可的参与者,并与许多科学和技术网络分享其在这一问题上的专业知识(法国地质调查总局是ANCRE联盟的成员,法国CO₂俱乐部和欧洲CO₂ GeoNet的主席;也是欧洲CO₂研究基础设施(ECCSEL)的法国代表)。

作为一个在地下潜力的知识、管理和开发方面得到认可的公共机构,法国地质调查总局能够开展一系列的研究,以确定和评估地下CO₂封存能力:(1)审查现有数据(文献和盆地综合),以研究场地的地质情况;(2)旧数据的再处理和解释:利用地质勘探数据库(石油和地热),地下数据库(BSS),获取钻井数据(地球物理和岩心样品);(3)可能获取的额外数据:地球物理图像,新的钻孔或深层岩心采样;(4)注入CO₂(超临

界、气态、溶解)后储层和盖层反应性的实验表征;(5)封存系统(储层和覆盖层)的三维地质建模:模拟注水和水-CO₂-岩石相互作用,预测CO₂在储层中的运移及其矿物命运(长碳循环);(6)通过预测数值模拟估计长期封存容量;(7)研究封存对地下环境的风险和影响(泄漏、超压等);(8)开发传感器和协议,用于监测注入期间和之后的未来封存场地。

在这方面,法国地质调查总局的分析工具和平台包括:(1)岩石与流体分析和表征实验室;(2)处理和定量解释地震数据,以确定含水层几何形状和储层参数(孔隙度);(3)Bio-REP实验平台:用于地球化学和微构造评估的地下环境和工业操作条件再现;(4)储集层地质建模:PETREL、GEOMOD-ELLER 3D;(5)多组分和多相流模拟:TOUGH, ECLIPSE/INTERSECT, COMPASS;(6)流体力学模型:TOUGH, MAR-THE;(7)地球化学建模:PHREEQC;(8)耦合反应运输模型:TOUGHREACT。

法国地质调查总局在这方面工作的一些案例包括:(1)完整封存场地表征:地球物理、地质、地球化学和水文地质、注入建模/模拟、监测计划的制定和井的设计(PilotSTRATEGY项目,2021~2026);(2)巴黎盆地CO₂地质封存容量评估:Dogger和巴黎盆地三叠系、洛林下三叠系(ADEME法国Nord项目);(3)研究CO₂地质封存过程中的长期过程,以提高其效率和安全性(ULTimateCO₂项目);(4)在法国东南部确定潜在的CO₂封存场地和初步容量估算(VASCO项目,2012年)。

法国地质调查总局近期探索工业CO₂排放的封存与热生产联动的项目,开发了一项创新技术,可以在产生热量的同时,将CO₂排放捕获和存储在地热场地的地下。法国地质调查总局认为,CO₂地质封存的经典方法是在浓密的气态(超临界)条件下,适应工厂大量排放,允许每年封存数百万吨CO₂,但这是一个复杂的过程,技术和经济可行性(选择储集层、密封性、安全性、耐久性的封存,将CO₂输送到注入点等)复杂,并不一定适用于排放量很小的设施。

因此,法国地质调查总局开发了一项名为碳溶解(CO₂-DISSOLVED)的创新技术,该技术集成了CO₂捕获和地热能生产,在区域范围内尤为重要。在法国,使用这种替代封存技术可以避免12%的工业排放。超过400个工业站点可以兼容地质碳封存和热生产。据2017年法国地质调查总局评价的数据,法国可能与CO₂溶解技术兼容的场地总共有437个(每个场地的排放量均小于15万t/a)。

近30年来,法国地质调查总局一直在研究CO₂的地质封存,特别是封存在深层咸水层中。自2012年以来,法国地质调查总局在研究与地热能回收(CO₂溶解过程)相关的CCS解决方案的技术经济可行性方面取得了可靠的经

验,其中:(1)将该系统集成到现有的工业场地中,具有双重的环境效益,这得益于与工业活动相关的CO₂排放的减少,以及大量脱碳的可再生能源的生产;(2)通过将产生的热量直接集成到生产链或供应区域热网,满足工业排放生产者或其邻近地区的局部热需求;(3)满足小型工业CO₂排放者的需求(少于15万t/a),这些小型工业排放源分散在全国各地,“经典的”CCS不适用。

这项工作特别基于:(1)识别和表征一个连续的和合适的含水层:可达性(1000~2000 m深度),渗透率,水流速率,温度(50至80℃),岩石的性质;(2)根据计划安装的运行参数,对注入和封存情景进行数值模拟,评估溶解CO₂对地热储层和环境的影响;(3)整合创新的含水CO₂捕获解决方案的可能性,以最大限度地提高烟气中所含CO₂的回收效率,并将其重新注入地热双重体(doublet);(4)建立CO₂注入作业的风险评估和监测方法。

法国地质调查总局碳溶解方法(集成地质碳封存和地热生产)的技术和数字设施包括:COFRAC实验室,用于水、岩石和矿物的表征和分析;GENIE数字化地球化学平台;TER'GEOPHY地球物理平台;用于模拟水-岩相互作用和储层中溶解CO₂迁移的软件。

法国地质调查总局在碳溶解方面开展的一些案例工作包括:(1)连续研究项目(2013—2020年),包括两个Géodénergies科学兴趣组的项目;(2)对各个工业部门(家庭垃圾焚烧、糖厂、水泥厂、玻璃生产、火电厂)进行潜在或预可行性的初步研究;(3)对中卢瓦尔河谷地区开展的机会研究;(4)在法兰西岛地热双重体中准备的第一次溶解CO₂注入测试。

其中,将中卢瓦尔河谷地区的CO₂封存与地热加热结合起来的碳溶解项目取得重大进展。该项目利用法国地质调查总局目前正在开发的CO₂溶解技术,评估了在卢瓦尔中部地区将CO₂捕获与封存与地热加热结合起来的潜力。氧化碳溶解技术的目标是在生产可再生、低碳能源的同时减少CO₂排放。其原理如下:地热水从深层含水层抽上来作为可再生能源,工厂排放的CO₂被捕获,然后溶解在地热水中——在它的能量被使用之后——用来为工厂建筑供暖;然后这些水被送回地面,以封存CO₂并减少温室气体的排放(图1)。

这项技术目前正由法国地质调查总局及其合作伙伴开发,特别适用于CO₂排放量低的行业。作为碳溶解(GEO CO₂)项目的一部分,法国地质调查总局将每年排放超过10000t CO₂的工业站点的数据与该地区地热潜力的地下数据进行整合交叉比对。由此,封存工业排放的CO₂,同时生产地热能供当地使用。

与使用超临界CO₂相地质碳封存(传统的CCS方法)相比,碳溶解方法在封存安全方面具有显著优势,因为卤水顶

替量更低,无压力积聚风险,CO₂逸出风险更低,且具有更快速矿化的潜力。由于这是一个本地的解决方案,如果当地的地下地质条件有利,那么与CO₂运输相关的成本将大大降低。最后,该项目通过地热回收增加了能源和/或收入的潜力。这是一种稳定注入作业的有趣方法,表明CO₂封存和地热活动之间可能存在实际的协同作用。

法国地质调查总局这种创新的方法具有以下特点:(1)是一种更安全的CO₂地质封存方法,原因是以溶解形式注入CO₂,就在排放源的附近;(2)是一种创新的CO₂捕获技术;(3)由于CO₂在当地被捕获并封存,因此避免了与CO₂运输相关的成本;(4)从当地提取的地热中获得经济和环境效益;(5)工业排放源目标:中小型工业排放源(<15万吨/年);(6)仅适用于具有地热潜力的地区。

CO₂溶解技术解决了CO₂捕获和地质封存(CCS)部署的两个主要问题,即:通过地热回收,为CCS作业提供直接的经济效益;提出了一种“低成本”的捕获技术,其依赖于一种廉价、丰富、环保的溶剂即水。

CO₂溶解开创了一种新的CCS市场:为低排放行业提供了减少CO₂排放的解决方案,否则无法实现脱碳;是“标准/经典”CCS方法的有机补充,即,这是一种创新的、不同的、与“经典”CCS方法互补的方法。

这种方法的主要缺点在于可注入CO₂的数量,而CO₂在盐水中的溶解度在物理上是有限的。然而,每年注入10万t CO₂的速度是一个单一的双重设施的现实目标。因此,CO₂溶解项目将研究在低至中等工业排放源(每年1~15万t CO₂)附近使用该技术的技术和经济可行性,这些排放源从未考虑过超临界注入方法。

这种方法的适用性还是比较大的。法国地质调查总局绘制了地图,将低排放工业设施的位置与深层沉积盆地地下含水层的地热资源相匹配,结果发现,法国(2011年数据)有653个小型排放源,每年排放2500万t CO₂,相当于法国工业排放量的17%,在巴黎盆地和阿基坦盆地确定了350多个兼容的排放源;在德国,有242个小型排放源,每年排放1000万t CO₂,主要位于德国北部盆地。

同时,水-岩相互作用得到了证实和量化。岩石与酸化和/或冷却盐水之间的反应活性已经通过实验室实验、现场测量和数值模拟进行了表征和量化。结果高度一致。关于CO₂在地热水中的封存性能和年限,模拟结果表明,由于注入的溶解CO₂向生产井运移,可封存的CO₂量会随着时间的推移而减少,尽管如此,在所有情况下,一个封存场地的寿命至少等于一个地热双重体的寿命,通常在30年左右。在套管材料方面,环氧树脂(ERG)比钢材更受青睐,可以避免因注入水酸化而加剧的腐蚀问题。

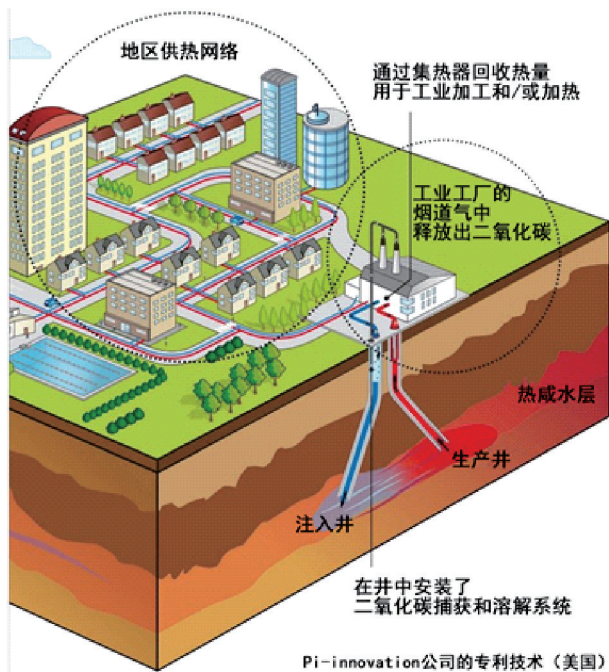


图1 在法国中卢瓦尔河谷地区开展的CO₂封存与地热加热相结合的碳溶解项目示意图

对碳溶解开展了初步经济评估研究。在法国Oléans附近的一家生物乙醇生产厂的试验中,CO₂溶解的概念被证明比标准的CCS方法(超临界CO₂,单注井)在经济上更可行,2/3的CO₂溶解情景模拟具有经济效益,CO₂价格高于20欧元/t。这实现了CCS和地热活动之间真正的协同作用。预期的结果将为我们提供一系列与新的实验和理论工具相关的创新技术。这些将包括:一个捕获和溶解CO₂的设备;监控工具;实验室“微型井”;模拟耦合流动、质量、传热和地球化学的耦合模型;还有一个经济模型。

法国地质调查总局开展CO₂溶解实验始于2013年,迄今已经开展了4个研究项目。一个国际财团目前正在为未来的全面工业试验做准备,以确认这种新的CCS方法的技术经济可行性。

第一个项目是CO₂溶解项目,法国地质调查总局是协调人,负责多项技术任务(反应性输运建模、地球化学与地球物理监测、风险评估等),参加者包括:德国BGR(德国地球科

学和自然资源研究院),其专长在于深入了解德国地热和CCS市场,为德国测试用例建模提供必要的数据;法国CFG服务公司,重点开展CO₂溶解概念的技术经济可行性研究,专长:深入了解法国中低焓地热能源开发的技术和经济;法国GEOGREEN公司,负责项目的最终整合任务,尤其依赖于整个CCS链的生命周期分析;CO₂捕集、卤水溶解、含水层注入、热回收。补充CFG的地热专业知识;法国地质资源公司,负责增强对含水层中持续注入富CO₂卤水的地球化学影响的认识;法国利奥(奥尔良大学)研究所,负责经济评估以确定概念的可行性,围绕CO₂溶解概念设计和新经济学建模;美国合作创新公司,提供其新颖的水基井内技术专利,该系统能够利用井内高压,通过在水中溶解的方式从烟气排放中捕获CO₂。这对该项目有双重好处,因为捕获和溶解CO₂的障碍都有了解决方案。

第二个项目是CO₂溶解试点项目,寻找合适的工业试点地点。目标是确定一个工业地点,并与工业合作伙伴合作,以确定第一个示范试点的规模,该试点旨在捕获、注入与封存从地热二重体中提取的盐水溶解后排放的CO₂。项目参与人除第一个项目的参加单位外,又增加了法国ENERTIME公司,在CO₂溶解概念中集成热泵系统的评估及其经济可行性;法国IRENEE(洛林大学)研究所,评估以溶解形式封存CO₂所需的监管框架;法国阿杜大学,分析全球变化导致的环境治理变革。

第三个项目即前文介绍的地热能和CO₂封存集成项目,评估中卢瓦尔河谷地区的潜力。

第四个项目是CO₂溶解和注入项目,主要目的是在一个老的地热双重体中进行CO₂注入试验。

法国地质调查总局的碳埋藏工作,给我们一个重要的启示是:CCS是一项新能源技术,一项生态技术,一项负排放技术,一项可以延长现有能源资产服务年限的技术,有助于使难以减排的行业实现脱碳和净零排放。世界上许多国家的地质调查战略中都将CCS技术部署列入其中,各国地质调查局成为推广碳捕获与封存技术的主力军,中国地质调查局及各省市区地质调查单位也应在地质封存潜力评估、相关储集层表征、封存场地监测等方面发挥重要作用,这是地质调查工作转型发展的一个新的方向。