

**开栏的话** 二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS)是指将二氧化碳从工业过程、能源利用或大气中分离出来,直接加以利用或注入地层,以实现二氧化碳永久减排的过程。加快推进CCUS技术研究和产业化应用,是我国实现“双碳”目标的现实需要,也是构建生态文明的重要途径。今起,本报推出“碳捕手成长记”专栏,聚焦我国CCUS示范项目与技术突破,讲述我国如何通过CCUS实现可持续发展,并为全球气候治理作出贡献。

# 将二氧化碳“扣”在海底“巨碗”下

## 碳捕手成长记

◎本报记者 何亮

深圳西南约200公里,南海东部海域,碧海蓝天之间,一抹明艳的黄色分外显眼。从空中俯瞰,矗立于此的恩平15-1平台像一个“巨无霸”,与海浪涛涛进行着“搏击”。

这是亚洲最大的海上原油生产平台,拥有我国首个海上二氧化碳封存示范工程项目。

近日,随着高碳原油生产井、生产处理系统、二氧化碳压缩机及分子筛脱水橇等设备依次启动,油田开发伴生的二氧化碳被捕集、分离、加压至气液混合的超临界状态,并通过一口回注井被注入海底地层深处,实现稳定封存。

这标志着我国首个海上二氧化碳封存示范工程投用,也意味着我国已拥有海上二氧化碳捕集、处理、注入、封存和监测的全套技术和装备体系。我国海上二氧化碳封存技术的空白由此得到填补。

### 给二氧化碳找个“新家”

“恩平15-1油田是我国南海首个高含二氧化碳油田,其二氧化碳含量高达95%,预计累产气约8.3亿方。”作为恩平油田的主要勘探者,中国海洋石油集团有限公司副总地质师兼研究总院董事长、总经理米立军告诉科技日报记者,2016年油田被成功发现时,二氧化碳含量的浓度震惊了所有人。

在海洋油气钻探开发过程中,通常会有一些伴生气,二氧化碳便是伴生气的重要组成部分。常规海洋油气资源开发时,伴生气中二氧化碳的含量在20%—30%。恩平15-1油田尤为特别,因为特殊的地壳条件,油藏上部有一个气顶,且二氧化碳含量极高,在原油开采过程中,如果不加干预,这些二氧化碳就会“逃”出地层。

米立军告诉科技日报记者,据测算,恩平15-1油田一共会产生约150万吨二氧化碳。若按照传统方式进行开发,二氧化碳将随原油一起被采出地面,不仅对海上平台设施和海底管线等造成腐蚀,还将增加我国二氧化碳排放量。

在“双碳”背景下,技术团队希望将这些“逃”出来的二氧化碳捕集起来,并通过一系列技术手段,重新回注到海底地层深处,实现永久封存。

要实现这一目标,首先要做的是给二氧化碳找一个合适的“家”。米立军表示,在距离恩平15-1平台约3公里外、海底800米之下的岩层中,技术人员找到一个“穹顶”式地质构造。该种地质构造仿佛一个倒扣在地底下的“巨碗”,不仅存容量大,而且自然封闭性强,能够长期稳定地罩住二氧化碳。

找到合适的二氧化碳“安家”之地,还需要建设一条通往海底“巨碗”的路——回注井,以此连通地上与地下。而且,“逃”出来的二氧化碳并不会从伴生气中自动分离,需要人为进行捕集、分离、脱水、加压等一系列工序处理。

“当二氧化碳被加压到11兆帕时——相当于指甲盖上压了一个110公斤的重物,二氧化碳恰好处于超临界状态。”米立军告诉科技日报记者,此时的二氧化碳是气液混合态。将超临界状态下的二氧化碳注入海底,整个过程只



中国海油恩平15-1原油集采平台。新华社记者 毛思霞摄

需要20分钟左右。

### 贯通二氧化碳的“回家”通道

在恩平15-1平台的尾部甲板,我国首个海上二氧化碳封存示范工程的封存模块静置于此。这是一个重约750吨的大装置,分子筛、冷却器、压缩机,以及层层叠叠的各路管道,在有限的空间里有序排布。

“技术团队研制了首套复合材料二氧化碳分子筛脱水橇、适用于海洋高湿高盐环境的首套超临界大分子压缩机、用于防止二氧化碳腐蚀的低密度固井水泥浆……”谈起海上二氧化碳封存项目的工程技术创新,米立军如数家珍。他告诉记者,为了将二氧化碳安全长效地回注、封存,科研团队攻克了诸多难题。

首先是超远距离回注井的“贯通”。二氧化碳的目的地——海底“巨碗”在海床下800米,但距离平台却有3公里远,水垂比大。这意味着,每向下增加1米的深度,水平方向就要前进3米以上。与此同时,途经区域地层又很“软”,“娇气”得像豆腐块一样,容易破裂,无法为钻具提供有效支撑。钻具在地层中掘进,完全“水土不服”。

为此,项目工程从常规钻井的三分段优化为四分段,采用4种不同尺寸的钻头,缩短每段管柱前进的距离。同时,也创新采用低流速变性能稳定钻液,有效支撑井壁、润滑井眼,让钻进之路畅通无阻。

除此之外,抵抗二氧化碳的“腐蚀”是回注井必须攻克的难题。当二氧化碳遇水,会产生碳酸,对回注“通道”的钢材和水泥产生严重腐蚀。“通道”一旦受到破坏,就有泄漏二氧化碳的风险。

“技术团队在室内开展实验研究,发现在管材中加入微量元素铬(Cr),管材的防腐能力可得到很大提升,而且防腐固井水泥浆的成功研制,能很好防止二氧化碳的腐蚀。”米立军告诉记者,这些技术成果确保回注井在长达几十年的注入期内拥有“金刚不坏之身”。

### 为千万吨级海上碳封存“探路”

恩平15-1平台海上二氧化碳封存项目,在高峰期时,一年可封存二氧化碳30万吨。米立军表示,平台全开采周期所产生的150万吨二氧化碳,绝大部分将注入海底“巨碗”,深“埋”其中,其减碳规模相当于植树近1400万棵,或停驶近100万辆轿车。但是,这样的减碳规模在全国的二氧化碳捕集、利用与封存领域并不突出,为何要布局建造?米立军一语以蔽之,“这一项目的主要作用是应用示范。”

他表示,恩平15-1平台的二氧化碳封存项目就像一块试验田,它的成功投用,不仅实现了我国海上二氧化碳封存领域从无到有的重要突破,也为后续工作提供了思路,奠定了未来“岸碳入海”的技术支撑和现实条件。

在我国,与恩平15-1油田相似的海域沉积盆地分布广、地层厚度大、圈闭多,具备二氧化碳封存的良好地质条件。今年1月份,自然资源部首次发布海上二氧化碳地质封存潜力评价结果,预测封存量达2.58万亿吨,约是2022年我国二氧化碳排放总量的200倍以上。

而且,中国海洋石油集团有限公司已经在广东惠州启动我国首个千万吨级碳捕集、利用与封存集群项目,未来将捕集大亚湾地区排放的二氧化碳,通过管道、船舶等方式输送到海上进行封存。米立军告诉科技日报记者,与陆地相比,海域封存的安全与经济优势非常明显。万一海上封存突发泄漏,凭借海水阻隔,二氧化碳首先会被大量海水稀释、溶解,即便有少量进入大气,也会在海风作用下快速消散,不会危及人类安全。

更为关键的是,我国东部沿海地区是二氧化碳排放大户。海洋封存成为解决东部沿海地区经济发展与实现碳减排目标矛盾的必然选择。

“恩平15-1平台封存1吨二氧化碳的成本大约600元,与国际700元的碳价相比仍具有价格优势。”米立军直言,当前我国还没有相关碳税政策和清晰的商业模式,如果国家相关政策可以加速跟上,在技术进步和降本增效的加持下,海上二氧化碳封存的前景将十分可观。

# 用科技守护海洋“发际线”

◎本报记者 王延斌

近日,中国水产科学研究院黄海水产研究所高亚平博士又一次来到位于山东半岛最东端的荣成市东楮岛上,她此行的目的是察看人工培育海草的生长情况,并将其种在海底。在海底种草这项工作,她和同事们已经坚持了15年。

### 对海草床的保护展开深入研究

在山东省海草床修复工程技术协同创新中心,科技日报记者看到了要种在海底的这种草——鳗草。

作为黄渤海浅海地带最常见的海草,鳗草外表形似韭菜,看上去不起眼;在水下,它随波飘摇,却组成了与珊瑚礁、红树林齐名的第三大海洋生态系统——海草床。

荣成东楮岛海洋科技有限公司监事张义涛告诉记者,海草床是近海的典型生态系统,被称为“生态工程师”,能为贝类、虾蟹类、棘皮动物和鱼类等海洋动物提供重要的产卵场、育幼场、索饵场和栖息场,其固碳量是森林的2倍以上,是全球重要的“碳库”。

海草床是近海的典型生态系统,被称为“生态工程师”,能为贝类、虾蟹类、棘皮动物和鱼类等海洋动物提供重要的产卵场、育幼场、索饵场和栖息场,其固碳量是森林的2倍以上,是全球重要的“碳库”。

作为土生土长的荣成人,让张义涛遗憾的是,从20世纪80年代起,这里的海草床面积迅速萎缩,从曾经的带状分布萎缩为块状分布,与之伴随的是在海草床栖息的海洋生物大幅减少。

为了留住海草床,科研人员出手了。从2005年起,中国水产科学研究院黄海水产研究所根据东楮岛沿海的海草资源和环境资源情况,对海草床的保护、海草繁殖生物学、海草系统碳储量、海草的移植修复方法、海草幼苗的培养技术等展开深入研究。他们在岸上模拟海水环境,建立“自然

采收+温室环境”的育苗基地:先采集海草种子,在陆地上进行人工培育,生长达到一定的规格后,再将其人工移植到海底。这样不仅解决了移植所需的海草来源不足问题,也可避免原生海草床环境的损失,并提高了海草成活率。

高亚平们并不孤单。旨在构建鼓励社会公益资金参与滨海湿地保护修复的“蔚海行动”于去年启动。

科技日报记者采访时,正值阿里巴巴公益平台、淘宝天猫家装家居行业公益宝贝爱心商家参与“蔚海行动—绿色家居支持计划”进行时。截至6月18日,该计划筹集了45万棵海草标的金额。

### 先“种出头发”再做“植发手术”

“可以把海草床修复比作给海底‘植发’,我们的操作相当于先给大海‘种出头发’,再做‘植发手术’。”高亚平告诉科技日报记者,“我们的操作方式比国外一些地方采取的直接移植海草床、直接播撒种子更加复杂,工作难度也更大。但这种方式对海洋环境更友好。”

在陆地,为了让种子萌芽,科研人员需要给它们营造一个类似海洋的并且可以人

为控制的培育系统。2020年11月,科研人员在培育温室的循环水系统中播种了1.8万粒鳗草种子,5个月后,鳗草总计成苗2466株,高亚平说:“种子成长至幼苗的建成率为13.7%,这个数字看似不高,但对于海草床修复这一世界难题来说,已是空前的成功。”

在海底种草,“种出头发”只是第一步。下一步是“植发手术”,这也是颇具技术含量的一个环节。

换上短裤和沙滩鞋,科技日报记者体验了一把“种海草”的过程。在一处水深半米左右的海域,记者弓下腰,先用铲子挖一个小坑,将海草苗塞入其中,待涨潮后让其慢慢生长。这并不是一个容易的动作。

“栽海草是个技术活,栽深了海草会被压坏,栽浅了容易被浪冲走,这个过程还要保持身体平衡,不能把水弄浑了。”63岁的潜水员潘海军是种海草的“老手”,他带着装有海草幼苗的托盘,潜入水下,将幼苗一棵一棵种到海底。

潘海军告诉记者,要保证海草成活率,必须“慢工出细活”。

现在,无论是高亚平、张义涛,还是潘海军,他们共同的心愿是让更多的人参与到海洋生态保护中。

## 环保时空

### 新研究将帕米尔山地居民“生态日历”理论化

科技日报讯(记者赵汉斌)记者6月30日从中国科学院昆明植物研究所获悉,该所民族植物学与多重组学攻关团队,首次将东部帕米尔山地居民“以草定牧”的生态日历系统化、理论化,量化评估了生态指标对季节性放牧活动的指示作用,并预测未来气候情景下,季节性放牧行为的潜在策略调整。环境科学与生态学领域国际期刊《清洁生产杂志》在线发表了相关研究成果。

帕米尔高原地处中亚腹地,是古代中国与地中海各国文化交流的通道,其特殊的气候和地形形成了独一无二的高山区域。

昆明植物研究所博士后杨慧利等人研究发现,作为一种识别时间和空间的传统知识体系,生态日历在山地居民的生计活动中起着至关重要的作用。当地人根据生态日历及其对应的生态指标,确定开展放牧的时间,并随海拔梯度进行季节性迁移。

各海拔梯度牧草的物候特征是最关键的生态指标。现代植物物候解析结果表明,不同海拔梯度下不同植被类型牧草物候的时空变化特征,与基于生态日历的季节性放牧活动高度吻合,这证实了当地季节性放牧传统做法的合理性,并揭示了与此相应的适应机制。

“但是受气候变化影响,山地居民的生计活动与原有的资源管理策略面临巨大的适应性威胁。”论文通讯作者之一、中国科学院昆明植物研究所研究员王雨华介绍,提高山地居民在气候变化背景下的适应能力并确保山地资源的可持续利用已刻不容缓。

“在未来气候情境下,夏季牧场仍将继续成为牧草资源的重要来源,牧民们可能需要在更高海拔地区停留更长时间,从而确保牧草资源的充足供应。”论文通讯作者之一、昆明植物研究所研究员许建初介绍,此项研究将生态日历作为科学知识和传统资源管理行动间的重要桥梁,为帕米尔山地牧草资源的可持续利用和山地居民气候适应能力的提升提供了扎实的理论基础。

### 科尔沁国家级自然保护区迎来候鸟繁殖高峰

新华社讯(记者安路蒙 王靖)天蓝水清,芦苇荡,百鸟鸣。随着自然生态的持续改善,内蒙古自治区兴安盟科尔沁国家级自然保护区近期迎来候鸟繁殖高峰,候鸟的数量和种类也在增多,这里正在从候鸟迁徙的中转站,变为候鸟繁育后代的栖息地。

“当前正是候鸟繁殖的高峰期,今年共有50多种候鸟在科尔沁国家级自然保护区内繁殖。”科尔沁国家级自然保护区管理局工作人员杨福生介绍,预计这些候鸟将在保护区停留三四个星期,等到幼雏长大后南迁。

科尔沁国家级自然保护区位于内蒙古兴安盟科尔沁右翼中旗境内,面积约为12万公顷,主要保护对象为湿地珍稀及典型的科尔沁草原自然景观。

记者看到,湖面上、丛林间、芦苇荡中,有很多只候鸟在筑巢、产卵、孵化。一只只幼雏破壳出生,在这里快乐过夏,科尔沁国家级自然保护区正成为“候鸟天堂”。

杨福生形象地说:“保护区原来只是候鸟南迁北徙路上的‘中转站’,如今却已成为候鸟繁育后代的‘家园’,候鸟从最初的‘匆匆过客’变成了现在的‘常客’。”

这种变化离不开当地开展的一系列生态保护工作。近年来,科尔沁国家级自然保护区认真贯彻“绿水青山就是金山银山”发展理念,编制《科尔沁保护区湿地修复规划》,采取多种措施修复湿地,目前湿地面积达到18000公顷,水域面积4000公顷,为候鸟栖息和繁衍提供了丰富的条件。

为给候鸟提供适宜的繁殖环境,科尔沁国家级自然保护区依据东方白鹤的生活习性特点,搭建了13处人工招引巢;去年成功引来一对东方白鹤筑巢繁殖两只幼鸟,今年又有三对东方白鹤在这里筑巢繁殖10只幼鸟。

杨福生表示,随着候鸟繁殖高峰的到来,保护区管理局正加大宣传和管护力度,通过视频监控、人工巡逻多种方式,对野生动物进行管理,并在重点区域、重点鸟类繁殖地段派专人进行看护。

## 绿色视界

### 荷叶临风翠作裳



入夏以后,各地荷花次第开放,如霞似锦,荷叶层层叠叠、翠绿欲滴,暗香浮动的荷塘充满诗情画意。

图为游客在贵州省黔东南苗族侗族自治州岑巩县客楼镇下寨村荷塘拍照。

新华社发(胡攀学摄)