

为了解决实现碳中和目标的资金困难问题，提高企业效益，应尽量加强碳捕集后的利用。

CCUS，“会捕”更要“会用”

文 / 张抗

目前，大幅降低二氧化碳排放的思路无非有二：一是对可能产生大量碳排放的设备进行节能改造，二是对已排放的二氧化碳进行捕集和利用。

就第一种思路来看，我国已取得不小的成绩。2020年我国碳排放强度比2005年下降48.4%，超过了此前做出的降低40%~45%的国际承诺；每万元GDP的能源消耗，从20世纪70年代的17吨标准煤已降至目前的1.5吨标准煤。但发达国家的这一指标仅为0.1~0.2吨标准煤，未来，我国尚有很大的节能空间。

而第二种思路又分为两条途径：一是人为措施，即对化石能源应用中产生的大量二氧化碳予以捕集和封存（简称为CCS），或捕集、利用和封

存（以下简称为CCUS）；二是对自然环境中已经存在的碳汇效应实施更加有效的利用和开发。目前，以上两种途径虽都已走出实验室，但离规模化的商业开发还有一段路要走。

那么就现有的资源和技术，CCS和CCUS的路要怎么走，才能在碳减排上做到降本增效？

CCUS中的“利用”更为重要

目前，人们对CCS或CCUS的讨论已相当多，并且在实践中产生了许多行之有效的措施，但还是要指出CCS和CCUS的实施除了技术性困难外，还必须付出高昂的经济代价。据中国国际经济交流中心副理事长魏建国透露，为了实现碳中和，2030年前，中

国每年需在CCS和CCUS领域投入2.2万亿元，2030~2060年前需每年投入3.9万亿元。

我国当前每吨二氧化碳平均捕集成本为300~900元，封存技术的成本差异较大，显然，完成整个CCUS产业链需要相当大的资金投入。

为了解决碳中和目标的资金困难问题，提高企业效益，应尽量加强二氧化碳捕集下的利用，即CCUS。

目前应用最多的是将二氧化碳注入油气（包括页岩气、煤层气）田和地浸式铀矿以提高其采收率。按照中国石油天然气集团公司的评估，其已动用的探明石油储量中适于二氧化碳储存埋藏的储量为83亿吨，按照提高采收率10%预测，可增加可采储量8.3



我国当前每吨二氧化碳平均捕集成本为300~900元，罐车运输成本约为吨千米0.9~1.4元，封存技术的成本差异较大，显然，完成整个CCUS产业链需要相当大的资金投入。

亿吨。这种实例老油气区较多。

我国吉林油田2008年建成了中国第一个二氧化碳提高采收率示范项目，年埋存二氧化碳能力可达30万吨，累计注气212万吨，封存192万吨。长庆油田在超低渗透油层的黄3井区进行了先导性试验，4年来累计封存液态二氧化碳超过12万吨，增油1.3万吨，预计比水驱提高采收率15.1%，使二氧化碳“上天为害，入地为宝”。

7月，中国首个百万吨级CCUS项目在齐鲁石化——胜利油田开工，标

志着我国已经具备了建设大型CCUS工程的能力。齐鲁石化将二氧化碳提纯到99%以上，运用超临界二氧化碳易于原油混相的原理输至胜利油田无人值守站注入油层。预计未来15年可累计注二氧化碳1068万吨、增油296.5万吨。

我国以产学研相结合的方式在延安国家级陆相页岩气示范区进行了超临界二氧化碳强化页岩气开采及地质封存一体化（CO₂-ESGR）研究的试验，取得了增产幅度达50%以上的效果。特别是为超临界二氧化碳的携沙

压裂开辟了道路。该项研究可利用在其他非常规油气乃至地热干热岩开发上。四川盆地东南部已形成了CCUS开发大面积提高页岩气采收率的部署。上述研究甚至可实现区域内页岩气生产过程中的负碳排放。此外，我国高含二氧化碳气田正在利用提纯后的二氧化碳制造干冰和用于食品的保鲜。

近年来，国内外都注意到从基础性和原创性的研究入手，加强对二氧化碳利用的探索，这是化害为利、降低成本的必要措施。

目前，国内外利用催化剂助力二氧化碳加氢制甲醇的研究取得重要进展。如瑞士利用钨锌合金通过醋酸酯桥络合物制甲醇、天津大学通过氧化钨负载银催化使二氧化碳加氢制甲醇，都取得实验成功；青岛生物能源与过程研究所利用海洋中的某种“工业产油微藻”在光能驱动下将二氧化碳和水规模转化成各种链长的脂肪酸以供工业使用；华东理工大学等研究团队的科技成果“实现二氧化碳高温捕集和原位转化”的工业性试生产引起人们关注。它利用高温烟道气合成具有吸附、催化双功能的复合材料，将碳循环和逆水煤气变换反应相结合，进行二氧化碳高温捕集和原位转化。二氧化碳的原位转化率接近90%，捕集和转化在同一塔内完成，大幅度降低了基建和操作的成本。该技术所产生的合成气为后续生产甲醇、乙醇等高附加值产品提供了原料气。

此外，国内外对“等离激元”技

术的应用更引人关注，该技术大大降低了传统催化反应的输入能量要求（可利用太阳能或废热），提高了能量转化效率，实现了二氧化碳转化为汽油、柴油、氢等能源，在一个反应设备中同步完成所有工业步骤，更加节能和降低成本。

等离激元技术实际上复刻了整个光合作用。该技术已走出了实验室，2020年在黑龙江七台河市建成了中试基地，利用当地煤电厂的余热和二氧化碳实现了年产6吨的合成天然气和合成汽油，其离大规模商业生产仅差最后一公里。

自然界中的碳汇效应不容忽视

当人们关注化石能源中的碳被大规模利用产生的负面效应时，往往忽略了地球表层生物圈、水圈中自然存在的碳中和综合效应。

科学研究表明，直到工业革命前，人类面对的都是一个富氧却低含二氧化碳的大气圈。如果说人类对自然环境的破坏降低了自然界中的碳中和作用，助长了温室气体的快速增长，那么也必须承认，人类对自然环境的恢复和改造也可以加强其碳汇作用。

有资料显示，2019年全球二氧化碳的排放量为401亿吨，其中86%源自化石燃料的利用、14%由土地利用变化产生。与此同时，被排放的二氧化碳有31%、26%分别被陆地、海洋碳汇吸收。



除了森林、草原、湿地对二氧化碳有吸收、储存作用外，近年来，越来越多的人开始认识到海洋在碳汇方面所起的巨大作用，其所捕获并储存的二氧化碳被称为蓝碳。海洋通过生物泵、微生物泵、溶解度泵，碳酸盐泵等机制将海洋中的二氧化碳由表层向深层、由溶解态向颗粒态、由活性向惰性转化并长期封存在海洋中。

而上述海洋的自然固碳作用主要发生在占全球海域面积8%的边缘海，其吸收的二氧化碳量占全球海洋的80%，相当于净吸收全球20%的二氧化碳。目前海上人工储碳的主要方式是将其注入深部咸水层和海底浅层砂质储层。此外，近期以二氧化碳注入海上油气田以提高采收率等工作也都发生在边缘海之内。

2009年联合国《蓝碳：健康海洋固碳作用评估报告》指出，如果充分利用海洋的碳汇作用，可望在2030年、2050年分别产生近40亿吨、110亿吨碳汇。为此，我国大力推进所邻的4个边缘海的环境保护工作，强调在滨海地区恢复和新造“绿色海滩”。如海南省在“十三五”期间完成退塘还湿（地）4.4万亩、新造红树林1.2万亩，争取在“十四五”期间再新增红树林2.6万亩，修复退化红树林湿地4.8万亩。

此外，近年来国外比较重视农牧业生产在碳中和中的作用研究，但也有一定的争论：有人强调农牧业也是重要的温室气体排放源，但也有人指出农牧业生产活动中的总效应是碳减排。我国华中农业大学有关团队以稻作系统为对象进行了十余年的研究，

出版了《低碳稻作理论与实践》等论著，总体认为，免耕、秸秆还田、氮肥减施、间歇灌溉及稻田种养等农艺措施可实现碳吸收盈余，合适的耕作模式可提高水稻生产的碳中和水平。

为了确切地评价某一企业、国家是否达到了碳中和、确定应如何交纳碳税和进行碳排放交易，必须有全国、全球承认的标准，用数据来说明在陆地和海上实际达到的碳排放和储存、吸收量，这就需要我们更加重视对自然界碳中和效应的跨国基础性综合研究和应用研究，进而实施有商业推广价值的示范工程。■

（作者系中国能源研究会常务理事，曾任中国石化石油勘探开发研究院总工程师、技术咨询委员会副主任）