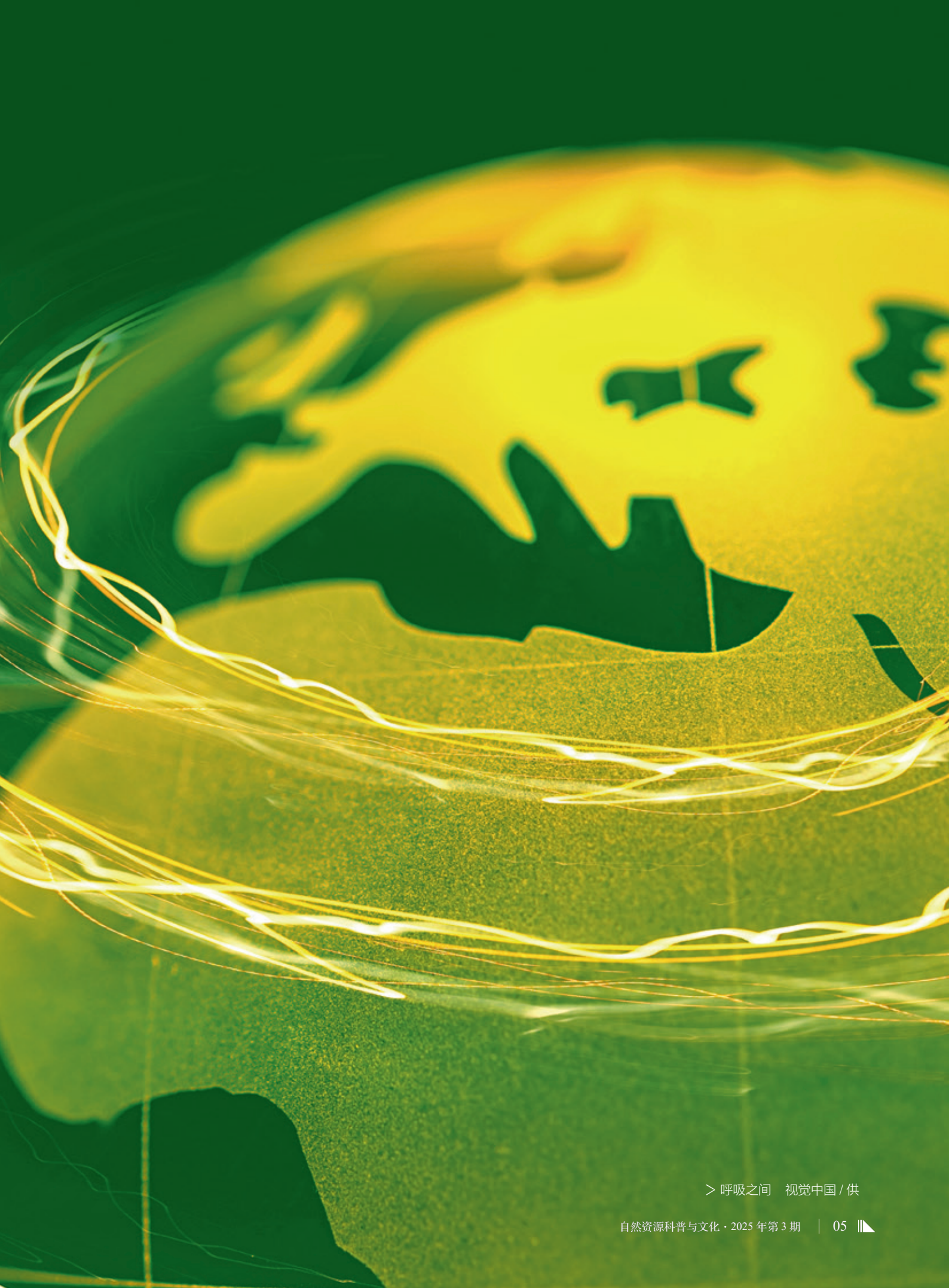


碳捕集、利用与封存

——低碳园区迈向零碳园区的“最后一公里”

□ 文 / 严祯荣 李 硕 李宣洋 金清怡



> 呼吸之间 视觉中国 / 供



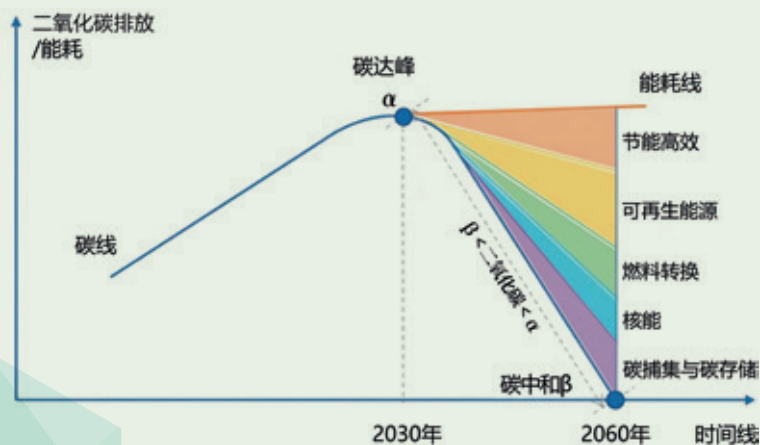
第一作者简介 严桢荣，三级教授，博士研究生导师，上海市优秀技术带头人。现任上海工程技术大学机械与汽车工程学院副院长、上海市绿色低碳服务机构技术负责人、机械工业锅炉低碳化技术重点实验室主任。主要从事能源清洁低碳化技术和设备安全研究，主持或主要参加国家重点研发计划项目、国家质量监督检验检疫总局科研项目等省部级项目 20 多项，获上海市科技进步奖等省部级科学技术奖 6 项。兼任全国能源基础与管理标准化技术委员会委员、中国仪器仪表学会设备结构健康监测与预警分会委员、中国特种设备安全与节能促进会能效提升工作委员会委员、中国特种设备检验协会危化品压力容器检验工作委员会委员。

零碳园区，“零碳与园区，最完美的组合，最创新的理念。”

英国政府《2008 年气候变化法案》指出，零碳是在某个过程或环节中，碳排放量为零，聚焦于碳排放的绝对平衡，通过技术手段和生态补偿使碳排放与碳吸收完全抵消。在城市尺度上，园区上接城市，下连建筑楼宇这个城市最小的组成单元。园区是某几个建筑形成的群体，建筑单体完成从低碳到零碳的目标，便是园区实现从低碳到零碳的目标。碳中和技术的每次创新，都极大地推动人类早日实现碳中和。碳捕集、利用与封存技术 CCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage）是碳中和最为关键的技术，可以实现零碳排放或负碳排放。如今，CCUS 技术便是从低碳到零碳、从低碳园区到零碳园区的“最后一公里”。

从绿色、低碳到零碳

“绿色”，最初是为了解决环境保护和生态平衡问题而提出的一系列环保措施和理念，形容对自然环境具有友好和保护作用的事物或做法；“低碳”“零碳”概念起源于 2003 年联合国环境署报告《减少全球温室气体排放：机会和挑战》。自 2020 年 9 月 22 日第 75 届联合国大会上，中国向世界承诺 2060 年前力争实现“碳中和”目标后，为了稳步快速实现“碳中和”目标而正式提出“低碳”“零



中国碳排放转型时间线：从达峰攻坚到中和决胜

碳”理念。“低碳”是为降低碳排放，应对全球变暖而提出的理念，是实现零碳的阶段性任务；“零碳”是低碳发展的终极目标，以 2060 年作为我国“碳中和”节点，也称为“零碳”点，“零碳”概念包含目前已达“零碳”和未来在 2060 年达到“零碳”。在“碳中和”定义中强调“净零”，通常指“净零碳排放”，主要是指二氧化碳、甲烷等所有温室气体要求在特定时间段内实现排放与清除的总量平衡。

从绿色园区、低碳园区 到零碳园区

绿色园区：国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部、环境保护部等部门 2016 年发布《绿色园区规划建设指南》，以可持续发展为目标，以生态优先、资源节约、环境友好、社会和谐为基本理念，通过综合规划、科学设计、系统管理等手段，促进城市经济、社会和环境协调发展的园区。

低碳园区：国务院 2009 年发布《关于加快发展低碳经济的若干意见》，通过应用先进的节能技术和清洁能源技术，采取低碳、环保、可持续的发展模式，降低园区内企业和机构的碳排放和能源消耗，促进经济、社会 and 环境的协同发展。

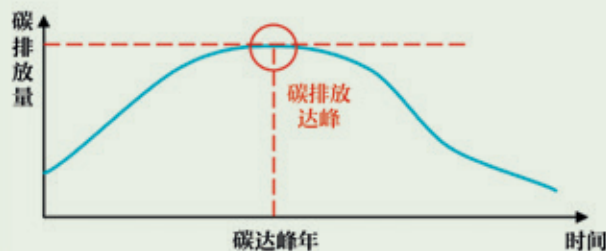
零碳园区：《零碳高效区域能源系统术语》T/ CEEIA 给出了“零碳园区”概念，在一定区域范围内，通过能源、产业、建筑、交通、废弃物处理及生态等多领域技术措施的集

成应用和管理机制的创新实践，实现区域范围全生命周期碳中和的综合型示范工程。

零碳园区的概念来源于国际社会推动低碳经济发展的需求。自我国提出 2060 年实现“碳达峰、碳中和”目标以来，低碳园区、零碳园区逐渐在中国兴起。随着全球气候变化和环境问题的日益严峻，各国开始重视碳减排和可持续发展问题，零碳园区作为低碳经济

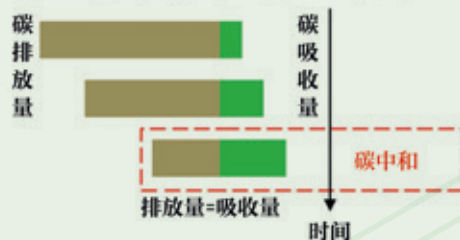
碳排放达峰

碳排放峰值指一个经济体(地区)二氧化碳的最大年排放值，而碳排放达峰就是碳排放量在某个时间点达到峰值，其核心是碳排放增速持续降低直至负增长。



碳中和

碳中和一般指人类活动在一定时间内直接或间接产生的二氧化碳或温室气体排放总量通过植树造林、节能减排等形式，以抵消自身产生的二氧化碳或温室气体排放量，实现二氧化碳温室气体“净零排放”，其核心是温室气体排放量的大幅降低。



> “碳排放达峰”和“碳中和”概念

的一种尝试，在此背景下得以诞生。

“零碳园区”的建设。我国工业园区建设始于1979年，目前已经形成由点到面、由沿海向内地的推进式发展趋势；2013年9月，我国正式组织开展国家低碳工业园区试点工作（工信部联节函〔2013〕408号），通过试点建设，大力使用可再生能源，加快重点用能行业低碳化改造，推广一批适合我国国情的工业园区低碳管理模式；2015年，国家工业和信息化部、发展改革委同意天津经济技术开发区等39家国家低碳工业园区试点实施方案（工信部联节函〔2015〕450号）；2024年12月，中央经济工作会议首次提到“零碳园区”的概念，强调建立一批零碳园区，这标志着我国工业园区实现了从高碳向低碳转型，即将再由低碳向零碳转型升级。

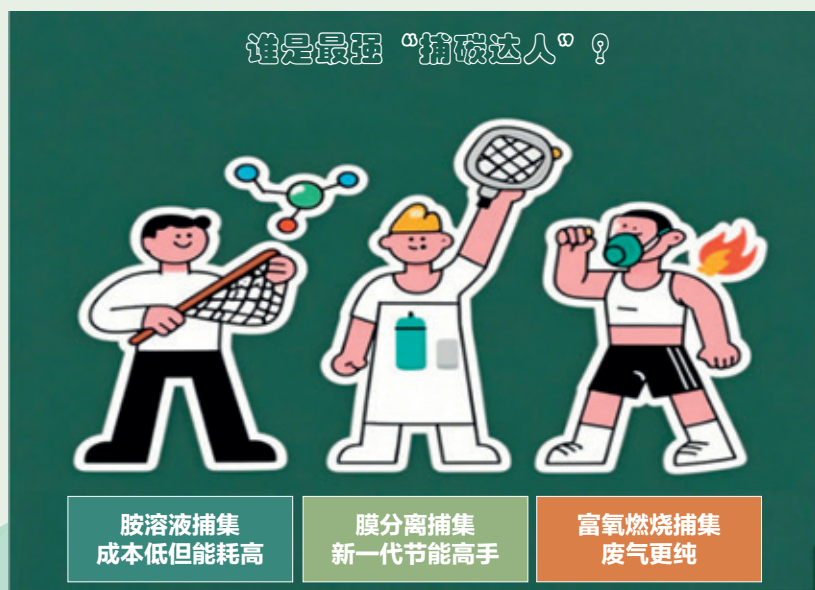
碳中和的关键技术

CCUS技术如同工业系统的“空气净化器+资源回收站”，能将工厂排放的二氧化碳过滤收集，再转化为工业原料或封

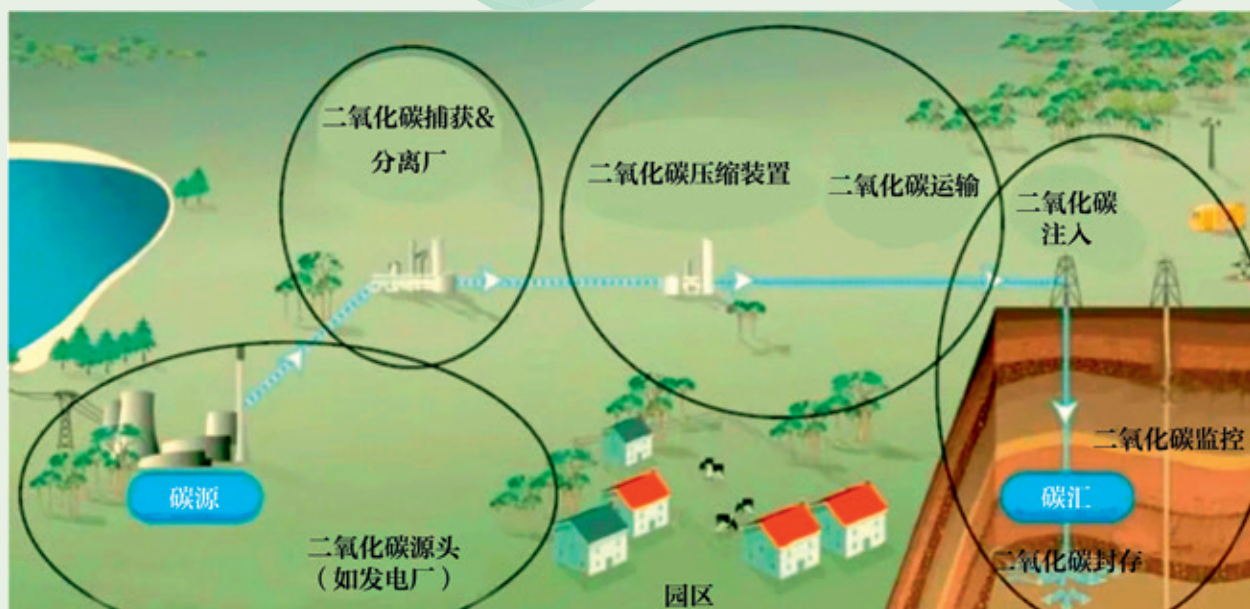
存在地下仓库。

碳捕集：工业排放的精准拦截。碳捕集是CCUS技术的核心环节，通过物理或化学方法从工业尾气或大气中分离出二氧化碳。若把工厂排放的二氧化碳比作散落的沙子，吸附剂或胺溶液就像一张特制的网，专门将沙子“捕捉”住，防止它们随风飘散。碳捕集环节包括化学吸收捕集、吸附捕集、膜分离捕集、直接空气捕集等技术。

碳运输：二氧化碳的“物流专线”。碳运输是连接捕集、利用与封存的关键纽带，需兼顾安全性与经济性。目前，管道运输是固定物流专线（类似输油管道）最成熟的方式，将高压液态二氧化碳（压力8~15兆帕，温度约-20℃）通过专用管道输送至使用、封存地，运输成本与距离相关，短途（<100千米）成本约1.5~3美元/吨，长途（>500千米）可达8美元/吨；管道运输的挑战包括腐蚀风险与公众接受度，需严格监测是否泄漏。船舶运输采用跨海集装箱货轮（需特殊冷冻货柜），适用于跨区域或跨境封存，将液态二氧化碳（温度-50℃）通过专用船舶运输，成本约5~15美元/吨；船舶运输需要依赖港口基础设施与液化终端，其技术难点在于低温储存与



＞ 碳捕集技术“三剑客”



> CCUS 流程示意图

装卸过程的安全性，需配备专业制冷设备。罐车运输相当于快递小火车，适用于小规模项目或短途运输，成本较高（约 10~20 美元/吨）；罐车灵活性强，但运输受限于道路条件，且运输途中存在泄漏风险。

碳利用：工业原料的“魔法转化”。捕集的二氧化碳运输到指定地方可以作为工业原料，通过直接或间接利用发挥作用。碳利用是指通过工程技术手段将捕集的二氧化碳实现资源化利用的过程，利用方式包括矿物碳化、物理利用、化学利用和生物利用，等等。

碳封存：给二氧化碳找个安全的“家”。碳封存是 CCUS 的最终环节，按照封存地或封存形态差异，主要包括地质封存、海洋封存、矿化封存三大类。地质封存是将二氧化碳注入地下盐层、枯竭油气田或煤层，盐层封存容量最大，枯竭油气田封存可利用现有基础设施，但需评估地

层的密封性；海洋封存将是二氧化碳注入深海（>3 000 米）或海底沉积物中，利用高压环境稳定储存，从理论上讲，海洋可封存全球千年的碳排放量，但存在生态风险；矿化封存是通过二氧化碳与碱性岩石（如橄榄石、玄武岩）反应生成碳酸盐矿物，实现永久固碳，无需长期监测，但反应速率较慢（需数百年）。

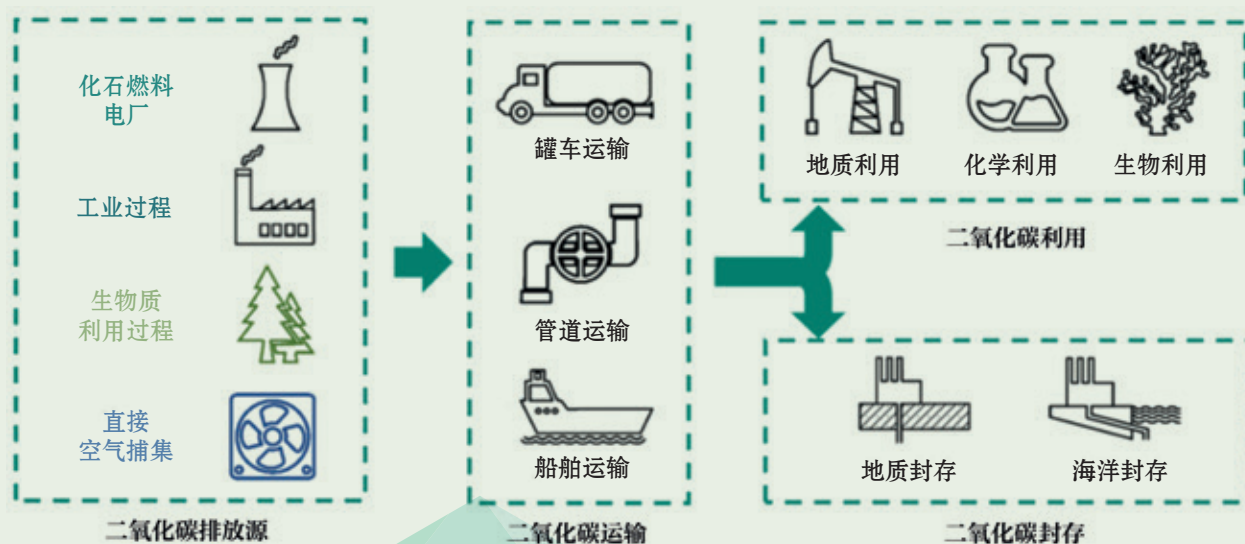
BECCS 系统：进阶技术延伸。在基础 CCUS 技术之外，科学家还开发出与生物质能联动的增强版本——生物质能碳捕集与封存 BECCS（Bio-Energy with Carbon Capture and Storage）。就像给普通净化器装了植物过滤网，BECCS 更显特殊功效，相当于用植物作为吸碳海绵：植物生长时吸收二氧化碳（如同海绵吸水），燃烧发电时用 CCUS 技术捕捉排放的二氧化碳（挤出的水分被回收），最终实现“吸碳>排碳”的负排放效果。

利用植物的光合作用，将大气中的二氧化碳转化为有机物，并以生物质的形式积累储存下来，这部分生物质可以直接用于燃烧产生热量，或者通过化学反应合成其他高价值的清洁能源。生物质燃烧和化学合成过程中产生的二氧化碳，被认为是植物生长过程中所储存的二氧化碳释放出来，这一过程属于“净零排放”；然后利用 CCUS 技术捕获释放出来的二氧化碳，将其进一步压缩和冷却处理后，用船舶或管道输送，最后注入合适的地质构造中永久储存，这一过程属于“负排放”。因此，BECCS 技术是一种负排放技术，利用 BECCS 进行二氧化碳负排放的潜力更大。如果生物质废弃物没有得到有效利用，在自然分解的情况下，将释放出甲烷等温室效应更强的气体，因此，在发展 BECCS 技术的同时还可以解决我国城乡各类有机废弃物无害化、减量化处理问题。

在全面推进乡村振兴战略的大背景下，未来生物质能发展将要走一条“农业—环境—能源—农业”绿色低碳闭环循环发展之路，在发电利用和非电利用上，BECCS 都扮演着重要角色，促进乡镇能源结构整体提升。

CCUS 技术应用实践

挪威 Sleipner 油田是全球较早的 CCUS 项目之一，自 1996 年运行至今，每年将 100 万吨油田中的二氧化碳分离（相当于 25 万辆汽车的年排放量），通过特制管道注入海底 1 000 米深的咸水层，至今已安全封存超 2 000 万吨二氧化碳，这相当于抵消了上海城区 3 年的交通碳排放量，证明了 CCUS 在长期减排中的可靠性。美国的 Petra Nova 燃煤电厂被称为“会呼吸的火电厂”，它是全球最大燃煤电厂的 CCUS 项目，运行于 2017—



> CCUS 和 BECCS 技术全流程体系图：从碳源到封闭的闭环管理

2020 年，它使用胺溶液捕集技术每年捕获 140 万吨二氧化碳，并将其输送 30 千米用于油田增产，既实现减排又创造了经济价值，然而，由于油价波动和维护成本高昂，该项目于 2020 年暂停，这提醒我们在推广 CCUS 时需平衡技术与经济。中国齐鲁石化—胜利油田 CCUS 工程于 2022 年投运，是国家级示范项目，它将炼化尾气中的二氧化碳提纯至 99% 以上，建成国内首条 109 千米超临界二氧化碳输送管道，每年将 100 万吨二氧化碳注入地下 2 800 米深的咸水层，相当于上海 5 平方千米森林一年的固碳量，这标志着中国在 CCUS 技术上的重大突破，为零碳园区提供了本土化范例；2023 年，中国新疆维吾尔自治区发展改革委核准批复了克拉玛依中国石油新疆油田分公司 2×66 万千瓦煤电+可再生能源+百万吨级 CCUS 一体化示范项目。该项目通过配套的百万吨级二氧化碳捕集系统，回收燃煤机组烟气中的二氧化碳，并用于二氧化碳驱油，提高原油采收率，这也是目前全国规模最大的从煤电烟气碳捕集到油田利用与封存全产业链示范项目，有助于构建石油增产和碳减排的“双赢”格局。

CCUS 技术面临的挑战

如果把 CCUS 技术比作给地球安装“空气净化器”，那么现在这台净化器还需要突破“贵、难、疑”等重关卡。

想象一下，用吸管喝珍珠奶茶，但将珍珠换成二氧化碳，吸管还是漏的，这就是当前碳捕集的困境。在山东某电厂，工人们给烟囱装上“分子吸管”（胺溶液）来捕捉二氧化碳，而仅是给这些“吸管”加热再生，就要消耗整个电厂 15% 的电力。更头疼的是，这些“吸管”用半年就会“老化”（溶剂降解），每年更换材料就要花费上千万元。幸运的是，科学家正在研发测试一种新型纳米膜“超级吸管”，它的表面布满比头发丝还细千倍的通道，



失衡的环保天平：CCUS 成本与碳交易收入之悬殊

碳捕集、利用与封存 (CCUS)

(CCUS对实现脱碳和碳中和至关重要)



工业二氧化碳点源

来自工业生产 (水泥、钢铁)、化石燃料制氢或发电的二氧化碳在到达大气之前被捕集，然后被压缩并注入多孔岩层

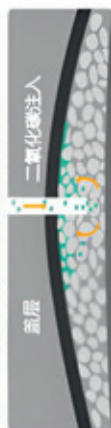
生物质能碳捕集与封存技术 (BECCS)

直接空气碳捕集与封存技术 (DACCS)

负排放技术 (NETs) 是实现净排放和负排放的关键。在BECCS中，二氧化碳由燃烧从大气中直接提取出来，然后在生物质燃烧时从燃烧产物中回收。在DACCS中，二氧化碳直接从空气中捕集。

含水层中二氧化碳的封存

含水层是在超过1千米深度的多孔岩石中含有盐水的地质构造。二氧化碳可以被泵入岩石中进行封存。



强化采油技术 (EOR)

EOR是一系列封存二氧化碳的同时提高原油采收率的技术。根据条件的选择，二氧化碳的封存量可能会超过所生产的碳氢化合物中二氧化碳的含量。



碳利用解决方案

建筑材料 骨料、混凝土 化学品 甲醇、乙醇 塑料 聚合物 矿化 碳酸盐
碳利用可以释放工业、钢铁、水泥和化工领域CCUS项目的经济性。捕集的二氧化碳可作为原料生产一系列产品，如混凝土、甲醇、乙醇、碳酸盐、塑料等。

意识
认识到CCUS是一个可行的气候减缓方案，并在制定国家计划时考虑此点。
认可
制定并整合允许CCUS技术完全商业化的政策。
经济
建立CCUS后融资机制，直接投资能源基础设施现代化。

能像用安检仪识别危险品那样精准筛出二氧化碳。更奇妙的是，这种膜在阳光照射下能自动升温，省去了传统加热所需的能耗。

目前给二氧化碳“买票坐车”的成本（CCUS 成本），比它本身“票价”（碳交易价格）贵 3 倍。以甘肃某 CCUS 项目为例，捕获 1 吨二氧化碳要花 500 元，但在碳市场只能卖出 70 元，相当于花 100 元买 1 瓶矿泉水。这迫使企业想出各种“副业”：在陕西，工厂把捕集的二氧化碳用于制作灭火器；在广东，二氧化碳被注入混凝土，盖成的楼房每平方米能“锁”住 30 千克的碳。随着 CCUS 技术的进步，捕获二氧化碳的成本逐年降低。据国际能源署（IEA）2024 报告，2024 年之后，齐鲁石化项目等部分 CCUS 项目，碳捕集价格已降至 300 元 / 吨。

低碳园区迈向零碳园区的“最后一公里”

CCUS 是最终消纳二氧化碳的神奇技术。国际能源署发布《2020 年能源技术展望：碳捕集、利用与封存特别报告》指出，到 2070 年全球要实现碳净零排放，除能源结构调整之外，工业和运输行业仍有 29 亿吨二氧化碳无法去除，需要利用 CCUS 进行储存和消纳。CCUS 在通往碳净零排放道路上的发展潜力巨大，2050—2070 年全球要实现碳净零排放目标，CCUS 的部署规模需要扩大近 50%。

CCUS 是唯一能够直接减少二氧化碳排放量的技术。CCUS 能减缓现有能源基础设施的碳排放，比如，CCUS 可以对现有的发电厂和工厂进行改造升级，否则这些发电厂和工厂在未来 50 年将排放 6 000 亿吨二氧化碳；CCUS 可为面临较大碳减排压力的行业提供解决方案，比如，CCUS 是水泥生

产过程中碳减排的唯一技术方案，也是降低钢铁和化学品制造过程中碳排放的最具成本效益的技术方法；CCUS 是低碳制氢的有效途径，可以支持低碳制氢生产规模的快速扩大，以满足交通、工业、建筑当前和未来的能源需求；CCUS 可以通过去除大气中的碳，抵消无法直接避免或减少的碳排放，助力构建碳净零排放能源系统。

CCUS 助力能源行业低碳发展，“减排不是减生产力”。传统的火力发电作为发电的主要方式，无法避免产生二氧化碳等温室气体。因此，在力求实现“碳达峰、碳中和”目标，即降低碳排放的背景下，CCUS 是“兜底”封存二氧化碳的有效措施。

尽管面临技术、经济、社会的多维挑战，CCUS 作为碳中和“技术拼图”中不可替代的板块，正经历着从示范工程（2011—2022 年）到商业应用（2021—2030 年），再到基础设施（2031—2040 年）的跃迁。正如电动汽车突破电池成本阈值后迎来爆发式增长，CCUS 技术一旦跨越 60 美元 / 吨的成本拐点，将激活万亿级碳管理市场。在低碳园区向零碳园区的冲刺中，CCUS 既是突破碳排放“硬骨头”的破壁机，更是构建循环经济的新引擎——这“最后一公里”的跨越，终将重塑人类与碳元素的相处之道。❏

本文由上海市松江区科委科普项目（编号：2024SJKPZ014）资助。

第一作者单位 / 上海工程技术大学

机械与汽车工程学院

（本文编辑：何陈临秋）