

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 134 次

学部工作局科学普及与学术处 编报
《中国科学》杂志社

2023 年 4 月 7 日

“碳达峰与碳中和”论坛综述

一、国内外发展现状

碳达峰与碳中和是党中央经过统筹研判作出的重大战略决策，是实现中华民族永续发展的必然选择，是构建人类命运共同体的庄严承诺。党的二十大报告提出，积极稳妥推进碳达峰碳中和，深入推进能源革命，加快规划建设新型能源体系，推动能源清洁低碳高效利用，确保能源安全，提升生态系统碳汇能力，加快发展方式绿色转型。

中国科学院积极响应国家号召，面向国家重大需求，顶层推动发布科技支撑“双碳”战略行动计划及实施方案，并部署开展了中国科学院碳中和战略研究重大咨询项目。中国科学院学部召开的“碳达峰与碳中和”科学与技术前沿论坛，围绕碳中和愿景下发电端、消费端和固碳端的重大科技问题进行多学科交叉深入探讨，力求为我国的“双碳”目标提供科技决策支撑。

随着国际社会对全球气候变暖的重视，碳中和已经成为世界潮流。截至 2022 年底，全球已有 139 个国家和地区提出碳中和目标。中国站在对人类文明负责的高度，积极参与全球环境治理，向世界承诺力争

于 2030 年前实现碳达峰、努力争取 2060 年前实现碳中和。“双碳”目标提出后，国家各部委、各省市自治区和各行各业高度重视，积极参与部署前瞻性的规划和行动。

科技部策划并启动了系列重点专项，如“双碳”重点专项、氢能技术重点专项、可再生能源专项、智能电网专项和煤炭科技专项等，并在脆弱生态修复示范和碳捕集利用与封存（CCUS）人工固碳新方法探索等方面开展了系列工作。中国科学院先后启动了“变革性洁净能源关键技术与示范”和“煤炭清洁燃烧与低碳利用”战略性先导科技专项，并积极筹划启动可再生能源与储能、工业流程革新和生态保碳增汇与二氧化碳利用等先导专项。

我国能源行业积极推动可再生能源实现新突破，迈上新台阶，进入新阶段。2022 年，我国可再生能源新增装机 1.52 亿千瓦，累计装机达到 12.13 亿千瓦，占全国发电总装机的 47.3%。同时，可再生能源发电量达到 2.7 万亿千瓦时，占全社会用电量的 31.6%。我国利用可再生能源技术为最落后也最困难的边远农牧区居民解决了生活用电问题，在发展中国家创造了奇迹，率先消灭了无电户。可再生能源在我国绿色发展和能源保障供应方面发挥了越来越重要的作用。

我国的可再生能源产业，特别是在光伏和风电领域，产业规模 and 市场份额多年领先世界。我国光伏和风电全面实现了低价/平价上网。以可再生能源为主的低碳/零碳多能融合综合系统技术取得了快速发展。煤炭在我国的能源安全和保供方面持续起到压舱石的保障作用。同时，煤电通过灵活性改造等技术有力支撑了我国可再生能源在电力系统中份额持续增加。核电作为低碳能源关系国家安全，我国核电技术的研发及利用也在有序进行。

在消费端，特别在钢铁、有色、化工、建材等高载能行业，利用绿电/氢进行低碳/零碳工艺技术改造的研究已经初步开展并示范，以推动消费端的绿色转型。煤化工和石油化工领域取得了一批重大成果，

为化石能源的综合高效利用提供了技术支撑。

在固碳端，我国目前陆地生态系统的固碳速率为 10~15 亿吨/年，其固碳增汇技术的进步有望进一步提高生态固碳能力。在碳捕集利用封存（CCUS）方面，我国也布局了多个示范项目，目前 CCUS 人工固碳能力约 300 万吨/年。我国利用 CCUS 技术进行人为固碳的潜力巨大。

我国目前面临低碳转型和经济发展双重压力，且时间窗口较窄，实现碳中和面临重大挑战。由于技术的发展存在不确定性，在国家层面难以明确实现碳中和的现实路径和发展路线图，需要进行持续研究。在我国新型能源系统构建、工业过程绿色转型和固碳技术发展路径等方面，缺乏统一、科学、系统的规划。同时国家可持续发展的创新体系、运行机制和研究平台尚待完善，需从顶层设计全面部署。

在发电端，我国正全面部署建设以新能源为主体的新型电力系统。化石能源将由主导变为辅助和调节保障，可再生能源逐步由辅助成为主导。在过渡期可再生能源与化石能源的耦合运行和未来以可再生能源为主体的低碳/零碳能源系统建设过程，面临技术和机制的双重挑战。

在消费端，我国工业过程面临向绿色低碳转型的挑战。工业系统工艺须由热碳驱动向绿电/氢驱动转变，面临单一过程向耦合再造、半经验调控向智能优化转变等挑战。

在固碳端，我国固碳增汇技术面临关键技术储备不足和成本过高的挑战。面向国家固碳增汇重大需求，亟待总体优化基于全域碳管理宏观布局的总体思路，加强突破一批关键技术，完成规模化示范和推广。

二、论坛概况

2023 年 2 月 25~26 日，中国科学院学部“碳达峰与碳中和”科学与技术前沿论坛在北京国二招宾馆召开。本次论坛由中国科学院学部主办，中国科学院地学部、中国科学院化学部、中国科学院技术科

学部、中国科学院学部学术与出版工作委员会承办，中国科学院电工研究所、中国科学院青年创新促进会、《中国科学》杂志社协办。

论坛由中国科学院院士丁仲礼、张涛、王秋良担任执行主席，包括 24 位院士在内的，来自中国科学院、中国电力科学研究院、北京大学、华北电力大学、清华大学、天津大学、中国可再生能源学会、河钢集团有限公司、中国建筑材料科学研究总院、中国机械工业联合会等高校、科研院所、企业的 130 余位专家共同参与研讨。

本期论坛是一期典型的跨学科交叉论坛，旨在通过研讨和交流，凝聚共识，群策群力，进一步明晰我国能源转型和构建新型能源体系的科技路径，为我国碳达峰与碳中和战略目标部署和实现提供科技决策支撑。

三、论坛的目的、重要性和必要性

碳达峰与碳中和战略目标的部署，是实现中华民族永续发展的必然选择，也是构建人类命运共同体的庄严承诺。碳中和愿景下势必引发一场能源革命。如何在较窄的时间窗口内既能实现能源低碳转型，又能保障能源安全，还要不影响我国的经济发展？如何科学、系统规划我国能源科技转型发展路径，在保证碳达峰碳中和目标前提下，最低成本地实现能源转型？深入探讨这些问题对我国构建新型能源体系、最低成本实现碳达峰与碳中和战略目标具有极其重要的意义。

中国科学院积极面向国家重大需求，中国科学院学部组织召开的“碳达峰与碳中和”科学与技术前沿论坛，围绕碳中和愿景下发电端、消费端和固碳端的重大科技问题进行多学科交叉深入探讨，促进科学界凝聚共识，进一步明晰我国碳中和愿景下能源系统转型优选路径，力图为党中央“双碳”目标的部署和实现提供科技决策支撑。

四、报告内容

本次论坛围绕“碳达峰与碳中和”这一主题，组织了大会主旨报

告和“发电端”、“消费端”、“固碳端”三个交叉学科领域的专题评述报告，并进行充分研讨。希望通过“碳达峰与碳中和”论坛这一平台，集思广益，进一步明晰我国碳中和愿景下能源系统转型优选路径和研究方向，科技助力我国碳达峰与碳中和战略目标的实现。

（一）主旨报告

中国科学院院士周孝信作了题为“双碳目标下我国能源电力系统发展前景分析”的报告。他指出，大幅度提升非化石能源在一次能源消费中比重，坚持节能优先、提高能源利用效率，在电力系统中大力发展可再生能源，显著提高电能在终端能源消费中比重，是实现“双碳”目标的主要途径。随着可再生能源的大规模发展，类似“一次电力”的概念，非电利用的绿色氢能也将摆脱二次能源的属性，成为一次能源的组成部分之一，即“一次氢能”，相应专用于制氢的光伏发电，则具有原料属性。当非化石能源电力占比较高时，采用发电煤耗法进行电力计量将会带来虚构的一次能源总量高消费，建议适时改用电热当量法计量统计。能源系统和电力系统碳排放都可在2030年前达峰，2050~2060年仍保留少量煤电气电主要是为提供灵活性资源，助力极端条件下的电力安全保供，并期待通过零负碳技术实现彼时的零碳电力。燃煤发电既是我国电源结构的劣势，也是优势，充分挖掘存量煤电剩余资产，合理推进传统煤电升级改造及有序退役，对我国能源电力转型意义重大。期望综合能源生产单元（IEPU）能作为煤电机组低碳/无碳转型路径方案的一种选择，既可生产电和各种近绿色燃料，又能以其高灵活调节能力支撑高比例可再生能源电力系统稳定运行，在试点示范的基础上实现产业化。规模化生产便于运输储存的甲烷、甲醇、氨等近绿色/绿色燃料，可成为新型电力系统应对中长周期能源电力供需不平衡的储能介质，有助于实现“西能东输”远景目标。可再生能源制氢和各类IEPU的经济性是制约其发展的关键因素，此外IEPU设想的实现将会促进能源领域不同行业之间的融合，对此需要体

制机制的突破和创新。

中国科学院院士张锁江作了题为“绿色低碳工业变革性技术及策略”的报告。他指出，工业是我国碳排放的主要来源，工业过程碳减排是实现碳中和的重中之重。化石能源驱动的传统工业体系通过工艺变革、系统变革和数字变革，由热碳驱动向绿电/氢驱动、单一过程向跨行业耦合再造、半经验调控向智能调控转型，是未来低碳工业变革的驱动力。针对钢铁、有色、化工、建材等碳排放量大的行业，提出了相应减排策略、亟需发展的变革性减排技术及减排途径，如电氢驱动钢铁低碳冶炼、有色低温电解铝新技术、原油直接催化裂解、低碳水泥技术等，预测了工业过程未来发展的碳减排趋势。未来需要进一步加强顶层设计，支持工业过程低碳变革性技术的研发，促进产业结构调整、流程再造和跨行业融合，推动碳中和绿色技术产业/区域示范建设，打造 Re-CCUS 碳捕集利用及增汇技术体系，为我国工业过程实现“双碳”目标提供重要科技支撑。

浙江大学常锦峰研究员代表方精云院士作了题为“面向碳中和的中国陆地生态系统碳汇研究”的报告。他指出，陆地生态系统固碳（碳汇）是抵消化石燃料排放二氧化碳最经济可行和环境友好的途径。2001~2010 年间，中国陆地年均碳汇 7.4 亿吨 CO₂，与以往评估碳汇数值相当，但因同期排放量相比 1980 年代和 1990 年代有所升高，抵消化石燃料碳排放的比例有所减小（14.1%）。森林生态系统是碳汇主体，贡献了约 80% 的碳汇。2010 年代，我国陆地生态系统年碳汇为 12.2 亿吨 CO₂。基于实测数据与经验模型外推、生态系统过程模型模拟并结合情景分析预测，2060 年我国陆地碳汇约为每年 11.0-18.4 亿吨 CO₂，相当于目前我国化石燃料总排放的 11%~18%。我国陆地生态系统未来仍具有巨大的碳汇潜力，但具有很大的不确定性。

（二）发电端主题报告

华北电力大学校长杨勇平教授作了题为“燃煤发电：我国能源转

型的重要支撑”的报告。他指出，燃煤发电是新型电力系统安全稳定的压舱石，由“电量型”向“电量型+功率型”转变。可再生能源的波动性、间歇性，对燃煤发电灵活性提出了更高要求。燃煤电站是一个宽温域热力系统，同时存在多种能源形式，为储能创造了广阔的空间。燃煤电站可以与蓄热、热泵、制氢等过程集成，提高燃煤电站的灵活性，提高可再生能源的消纳能力。热电联产是高效清洁的规模化供热方式，已占全国燃煤发电装机的40%以上，通过中低品位能量串联梯级利用，热电联产机组一次能源利用率可达88%。燃煤电站可与太阳能、生物质能等新能源深度融合，增强燃煤电站的灵活调峰能力，同时提高能量的综合利用效率。研发安全、清洁、高效、灵活、低碳“五位一体”燃煤发电新模式、新技术，对支撑我国能源绿色低碳转型、保障电力安全稳定供应具有重要意义。

中国工程院院士汤广福作了题为“构建新型能源体系，支撑清洁低碳转型”的报告。他指出，从碳达峰到碳中和，全球平均用时53年，我国仅有30年时间，与欧美发达国家相比，我国能源转型的时间短、任务重，技术挑战更大。我国能源转型的总体思路是能源生产加速向清洁低碳转型，能源消费方式更加灵活多样，能源传输系统根本性变革重塑。具体包括：快速开发提升风光资源占比，积极稳妥发展核电，煤制油气是保障国家安全的战略性技术，煤制油气产品的经济化、规模化、多元化是重要发展方向，提高大规模远距离输电和电网柔性互济能力，构建以电为中心的终端能源消费格局，加强多种能源互联互通。主要挑战包括：如何发挥煤炭的“兜底保障”作用，开发油气这一战略接替资源，降低二氧化碳捕集与封存成本，提升风光发电效率和降低发电成本等。主要技术方向包括：突破第三代核电及下一代先进核能技术、构建新型电网形态和开发先进输电技术、发掘多元灵活调节电源、打造氢能技术体系、发挥需求侧管理价值、开发变革性光伏发电、深远海大容量风力发电机组、先进核能技术、清洁能

源广域时空互补、油气氢电多能流转换和柔性传输、多元用户大规模供需互动、多能源协同高效利用、能源系统数字化赋能、工业流程再造节能减排等关键技术。

中国科学院研究员吕清刚作了题为“煤炭清洁燃烧与发电”的报告。他指出，煤炭作为“兜底保障”能源，其新定位是通过调峰支撑电网对风光等可再生能源的大比例接纳，采用燃煤机组灵活调峰也是电网大规模调峰最为经济可行的办法。目前，煤电机组已经承担了大量调峰任务。但在未来，可再生能源持续、更大比例的接入电网，将对燃煤发电的调峰能力提出更加严苛的要求。在此背景下，煤电机组深度灵活调峰面临一系列的问题和挑战：超低负荷稳燃困难、低负荷锅炉效率较设计工况大幅度降低、变负荷运行灵活性差、污染物控制困难等。以上迫切的技术需求，必须从提高煤电机组调峰能力的底层逻辑——灵活燃烧的角度加以解决，而固体燃烧特性是制约煤灵活燃烧的根本。燃料热改性，通过“热物理”方式将煤粉中的大分子“剪裁”为小分子热燃料，直接进入炉膛燃烧，可实现煤粉的类气体化、改性活化和原位脱氮，彻底解决了稳定燃烧问题，从而实现动态的灵活、高效、低氮燃烧，满足严苛调峰需求下煤电机组面临的需求。在“动态燃烧”指导下，将开发出可在全负荷范围内，实现清洁高效运行的煤粉调峰锅炉机组，满足更大规模可再生能源接入电网的需求。

中国可再生能源学会秦海岩作了题为“风电行业技术现状及发展趋势”的报告。他指出，机组大型化与规模增长仍是风电降本的主要途径，具体的技术方向包括：叶片局部精细化设计，叶片涂层新材料的进步，大轴承与传动链研制优化，整机设计理论改进等。漂浮式基础将成为全球海上风电技术发展趋势，更远的集中式电力输送系统让海上风电进一步降本，区域联合体集约化发展可有效降低成本。他建议，我国风电装备技术已经与国际同步，部分技术处于领先。继续进步需要更多的基础研究和探索类行为，这部分投入应当获得支持。

中国科学院研究员许洪华作了题为“我国低成本零碳能源系统建设路径及光伏技术发展”的报告。他指出，零碳能源转型任重道远，经济性是硬约束，构建以可再生能源为主体的能源系统对我国有利。2060 碳中和能源架构有不同技术选择，技术上都可行，经济性差异巨大，路线错误将造成极大的浪费，并可能丧失历史发展机遇。他提出充分利用现有的煤电及能源系统的沉没成本实现我国低碳低成本能源转型的现实路径。尽可能不再新建煤电，保留现有的 11 亿千瓦的煤电装机基本保证我国能源转型期间的能源安全。对现有的煤电机组进行常规灵活性改造，可实现煤电机组输出功率 30%~100% 灵活调节，可以支撑我国 2035 年风光累计装机 12 亿千瓦以上；煤电机组在高温蒸汽环节加储热可实现输出功率 0~100% 灵活调节，并可实现减碳 80% 以上；随着卡诺电池系统技术的成熟，原有的煤电机组可改造为吸收“弃风弃光”及电网“多余”电能并能利用生物质、太阳热等可再生能源的储热发电系统，可完全不用煤炭，实现零碳发电系统，输出功率 -100%~+100% 灵活调节。我国现有煤电系统的灵活性改造及开发抽水蓄能技术可支撑我国风、光装机 80 亿千瓦以上，完全可以助力我国建立碳中和的能源架构。“弃风、弃光”的便宜电提供有经济性的绿氢、绿电、绿热，助力化石能源的非能源利用及对现有的高载能产业进行低/零碳工艺过程改造，支撑高载能行业尽快实现“双碳”目标。光伏是最便宜的洁净能源，在未来能源架构中份额最大。我国光伏全产业链在世界占主导地位，但原创技术缺乏，产业技术同质化，需全产业链解决卡脖子技术。他建议，持续进行我国能源系统转型路径和发展路线图研究，支持促进行业持续发展的创新能力建设。他呼吁，取消多地风光电站强制配电化学储能的规定，不改变将导致几万亿的低效无效投资！

中国工程院院士李建刚作了题为“裂变与聚变在双碳战略中的作用”的报告。他指出，坚持核能发展是保障我国能源和国家安全的战

略选择，核能是我国大型电网清洁低碳、安全高效基荷能源的重要选项，应大力推进新一代核能技术研发，实现核能技术升级换代。人类终极能源=80%聚变+20%可再生，应尽快实施聚变能工程化、商业应用战略行动计划，我国聚变发展应该尽快实施工业化转变，建成世界上首个聚变能发电装置，加快推进实验堆-示范堆-商用堆进程，让聚变成为我国作为世界科技强国的一个标志性成果。

中国科学院院士詹文龙作了题为“物理支撑碳中和目标的绿色低碳能源”的报告。他指出，清洁低碳一次物理能源发电可基本实现80%非化石能源消耗，光伏发电与白天用电基本同步，消峰填谷储能有限，加强电网对多能互补发电的调控能力，优化更多水能作为调控电源实现供需相适，加快加速器驱动先进核裂能系统研发将有效解决核电的固有安全、乏燃料核处置、核燃料资源、场地等问题，为实现“积极安全有序发展核电”提供升级换代技术，给碳中和提供更多的基荷电能，DT聚变物理研究实现聚变输出能量大于加热能量，实现聚变能源供给需加快燃料持续供给及抗14 MeV中子辐照材料研发。

中国工程院院士岳光溪作了题为“温室效应的大气物理学背景及中国能源生产的变革之路”的报告。他指出，加大大气物理科学研究的投入，在国际上形成中国人的科学认识声音，承认中国是个处于初级工业化完成期，以煤炭为基础能源的发展中国家。实现双碳是极大的挑战，保卫中国人的生存发展权才是最大的政治-技术问题。摆在第一位的是能源安全供应和经济发展，第二位的是能源转型降碳，第三位的是零碳的探讨与突破。中短期（“十四五”、“十五五”）的任务是：碳达峰，降低峰值，给碳中和减少压力，加大清洁煤技术的高效清洁利用，节能提效减碳；煤电向（基本负荷和调峰）双功能的转换，给可再生能源腾出空间；开发各种大规模储能、智能电网以实现提高可再生能源比例，减少燃煤量；增加核电容量，加大零碳能源比例。

中国科学院研究员陈海生作了题为“先进压缩空气储能技术”的报告。他指出，压缩空气储能具有规模大、寿命长、建设和运行成本低、储能周期不受限制等优点，是最具发展潜力的大规模储能技术之一。通过系统过程耦合匹配、空气高压或者液态存储、压缩热的回收利用，解决传统压缩空气储能存在的三个技术瓶颈（依赖储气洞穴、依赖化石燃料、效率相对较低）。

中国科学院研究员李先锋作了题为“大规模液流电池储能技术”的报告。他指出，大规模储能技术是构建以新能源为主体的新型电力系统，实现双碳目标的支撑技术。在众多的电化学储能技术中，液流电池具有安全高、寿命长、效率高等特点，在大规模储能领域具有良好的应用前景。目前以全钒液流电池为代表的液流电池技术已经处于商业化示范阶段。然而，液流电池的能量密度相对较低，成本相对较高，在一定程度上限制了其大规模应用。全钒液流电池需进一步提高功率密度，降低成本，优化运营模式。锌基液流电池在分布式储能领域有很好的应用前景，处于中试放大阶段，需进一步提高可靠性。探索液流电池新体系，提高有机液流电池稳定性、可靠性、能量密度，以及开发多电子转移水系电池对于液流电池可持续发展具有重要意义。

（三）消费端主题报告

中国工程院院士刘中民作了题为“双碳目标下化石能源低碳转化方向探讨”的报告。当前，能源革命、工业革命呼唤科技革命，人工智能相互叠加，一场前所未有的大变革正在启动。他在报告中指出，要发挥多种能源互补融合优势，构建清洁低碳、安全高效的能源新体系，同时进行工业流程革新。化工行业碳减排任重道远，不仅涉及CO₂排放问题，也与能源安全（石油进口）及产业链、供应链稳定密切相关。需要以“双碳”新理念重新审视传统过程，积极应对挑战，把握战略机遇，重构能源与工业体系，推动绿色化工低碳发展。其中氢将

是难脱碳行业深度减排的关键。中国科学院顶层推动双碳行动计划，进行了相关布局，取得了一系列突破进展。分子反应动力学、光催化、界面催化剂、锂/钠离子电池等领域基础研究取得重大突破。单原子催化从原创概念走向工业应用。合成气制低碳烯烃三年实现从“Science”走进工厂。煤制油实现百万吨级工业化应用，煤制烯烃战略新兴产业快速发展，煤制乙醇技术开启大规模工业化生产时代。

河钢集团有限公司首席技术官王新东作了题为“钢铁行业低碳绿色发展技术与路径分析”的报告。他在报告中指出，对于未来钢铁行业低碳绿色发展方向，建议在钢铁减量基础上实施低碳路径创新，首先应进行流程变革，以实现结构性减碳，如长流程能效提升与减排技术、流程变革与全废钢冶炼、氢基竖炉还原短流程；其次是能源技术创新，构建多元能源结构体系大幅降低碳排放；再次是材料技术创新，生产低碳产品。对于行业成熟的绿色制造技术进行推广，建议加快非常规污染物减污降碳技术研发与示范，加快钢铁副产物协同处理和资源化利用。

中国建筑材料科学研究总院原院长姚燕作了题为“水泥工业碳达峰碳中和的技术途径”的报告。她在报告中指出，水泥是国民经济建设不可或缺的基础原材料，用于水利、铁道、交通、建筑等国家重大工程和城市基础建设。几十年来，我国水泥产量占世界水泥产量的50%以上，2021年我国水泥产量近24亿吨，水泥生产的CO₂排放量居我国工业部门第二位。2060年我国水泥工业要实现碳中和，任重道远，必须依靠科技创新，探索前沿颠覆性技术、攻克关键技术、推广应用技术，支撑水泥行业实现碳中和。报告从石灰石原材料减碳、替代原料燃料减碳、废渣高效利用减碳、低碳水泥高效利用减碳、CCUS以及在建材行业的应用、碳交易相关技术研究、已有低碳技术的工程化实施等方面为水泥行业实现双碳提出了技术途径。

中国机械工业联合会侯睿作了题为“机械工业应对‘双碳’的机

遇与挑战”的报告。他在报告中指出，机械工业碳达峰、碳中和的总体思路是：坚持“制造端”与“使用端”并重，立足自身行业能耗及碳排放实际，建立绿色制造体系，降低装备制造过程能源及资源消耗，使机械工业经济增长速度和综合能耗降低速度保持合理区间，减少温室气体排放；以用户行业节能降碳需求为导向，提高节能装备产品供给效率，发展新型节能低碳技术装备，协同推进碳达峰、碳中和目标的实现。他指出，机械工业应对碳达峰、碳中和的措施有：加快形成绿色、低碳、循环的产业体系；优化机械工业产业链，深度调整产业结构；持续开发推广高效节能设备（产品）；积极建设机械工业节能技术装备低碳服务平台，建立碳足迹核算基础数据库、绿色低碳改进数据库，开展节能技术装备能效标准提升行动；完善节能低碳领域人才培养机制，重视“工匠精神”和“工匠队伍”培育，强化新能源、储能、氢能等技术装备领域人才队伍建设；加强低碳技术与标准的国际交流与合作。

（四）固碳端主题报告

中国科学院院士于贵瑞作了题为“全域国土空间碳源汇管理的宏观布局—双碳行动的五维统筹及其提升生态碳汇科技问题”的报告。他在报告中指出，中国“碳达峰-碳中和”战略行动是中国参与全球环境治理的政治承诺，是我国履行《巴黎协定》的自主行动，更是一场经济社会系统的变革、一场新的科学技术革命。中国“双碳”战略应以建设富饶、美丽和健康的现代化强国为目标，从自然-社会-经济协调发展的视角，选择最优路径，渐进技术迭代、稳健推进行动、实现总体目标。通过全行业科技进步、颠覆性技术变革，发展“降碳-减污-扩绿-增长”综合技术体系；通过全域时空宏观布局，国土空间功能优化，形成近自然系统碳中和解决方案，有序实施减碳增汇重大工程体系；通过全体国民自愿参与，形成自上而下与自下而上相融合的组织实施方式以及自组织社会实践模式。全域国土空间温室气体管理宏

观布局是破解国家发展的资源需求与生态环境变化及碳中和目标之间矛盾的纲要及抓手，其出路是基于气候变化科学和生态经济学理论框架，以“筑牢国家生态基础设施、统筹生态系统五库功能（种库、碳库、水库、粮库、钱库）、培育新型生态经济、近自然经管生态资产”为核心任务，坚持“社会发展、经济转型与新生态经济培育，转型脱碳、减排降碳和环境治理与区域环境质量管理，生态保碳、扩绿增容、提质增汇与美丽中国建设，陆地-江湖-海洋生态系统的多生态增汇途径，有机碳汇-无机碳库-非 CO₂ 的多温室气体管理”的五维协调统筹原则，明确推进全域生态碳汇管理中若干重大科技任务的落地生根，全面落实碳中和的减碳增汇、生态环境建设、社会经济高质量发展战略行动。

中国科学院研究员刘毅作了题为“碳源汇监测评估的进展和挑战”的报告。他在报告中指出，面向全球-国别-区域-城市和点源尺度碳盘点的需求，建立观测和验证支持（MVS）系统，发展适用全球、国家和省市的基于大气温室气体观测核算人为排放和碳汇量的方法体系。突破卫星和地面探测的关键技术，充分利用国际和国内温室气体卫星遥感和地面监测网络数据，在区域和城市尺度上开展初步的应用示范和验证工作。深入研究大气温室气体（CO₂ 和 CH₄）含量变化与生态圈、海洋圈、人类圈、岩石圈等圈层碳循环过程的关系，以及多圈层碳库变化和相互作用，重点研究大气与生态系统、人为排放碳循环之间的关系，兼顾其他圈层，建立多圈层耦合模型，解决碳库优化中多圈层相互作用的模拟问题。发展多尺度源汇同化反演技术，基于大数据、机器学习等方法发展多源观测资料的融合技术，解决利用多源、多要素观测数据的同化方法问题。利用协同观测，解决区分不同圈层的碳源汇问题。在大幅提升科学认知基础上，构建我国的全球和区域碳源汇监测和核算系统，服务于双碳评估、气候变化和碳源汇科学研究；为独立评估各国《巴黎协定》履约情况、双碳进程阶段性成

效提供关键科学数据支撑，为在气候环境外交中维护我国未来战略发展空间的核心利益提供重要科技支撑。

中国科学院研究员**谭支良**作了题为“双碳目标驱动的农业低碳技术”的报告。他在报告中指出，农业碳减排与固持在我国“双碳”目标实现中占据重要地位。我国农业年碳排放约 8.3 亿吨（占全国 8%），且农田土壤具有巨大固碳潜力。由于日益增长的粮食安全保障与膳食结构调整压力，农业碳中和目标实现困难。以往我国在农业固碳减排方面开展了大量研究，但总体上技术的可操作性、与农业生产需求的协调还有待验证，且少见规模应用的技术体系、标准和规程。面向国家“双碳”目标，亟需以山水林田湖草统筹的农业绿色低碳发展为核心，强化系统性农业系统固碳减排技术模式研究。建议研究重点包括：1) 农业系统全周期碳足迹核算方法，构建农业系统碳足迹模拟模型，精准估算农业系统碳排放；2) 养殖系统碳氮源头减投增效与畜禽粪污处理碳减排技术系统；3) 山水林田湖草统筹、种养耦合的绿色农业系统构建技术，实现生物质资源高效循环利用与碳减排；4) 农田土壤持续固碳关键技术，实现土壤肥力提升与稳定固碳双赢；5) 提出区域农业碳中和路径，集成农业系统碳减排技术，在我国典型农区开展绿色低碳农业科技示范。

中国科学院研究员**魏伟**作了题为“碳中和愿景下碳捕集利用封存（CCUS）技术进展”的报告。他在报告中指出，碳捕集利用封存（CCUS）是指将 CO₂ 从能源、工业、生物质等碳利用过程与大气中分离出来，直接加以利用或注入地层以实现 CO₂ 减排的工业过程，是钢铁、有色、化工、水泥等难减排行业的必要方案，与新能源等耦合的负排放技术是实现碳中和目标的托底保障。据测算，到 2050 年 CCUS 减排贡献将达到 10 亿吨/年的量级，减排贡献 10%~15%。他在报告中详细介绍了二氧化碳捕集、利用和封存各环节国内外主要技术进展，其中我国二氧化碳捕集利用（CCU）技术处于国际先进或部分领先水

平，并已有一批技术实现了产业化应用，但我国封存技术与国外存在较大的差距。他建议尽快形成我国百万吨级的大规模技术集成示范，掌握规模化集成技术，形成碳减排能力；同时，加大 CCUS 基础研究，促进颠覆性技术的创新，尽快建成国家级的 CCUS 技术创新中心，形成统一的技术评价和标准体系。他认为短期内（2030 年）我国能够实现一代、二代 CCUS 技术的规模化应用和集成示范，解决一批核心关键技术，支撑现有技术“走得快”；并验证三代 CCUS 技术的可行性，形成系列颠覆性技术，确保“靠得前”。中长期（2060 年）需要突破一批前沿颠覆性 CCUS 技术瓶颈，加快系列技术的示范和应用，推动新兴技术和集成解决方案“跟得上”，最终在产业层面形成若干大规模 CCUS 核心技术，支撑 CCUS 在我国形成显著的减排效益，助力碳中和目标“到得稳”。

中国科学院研究员李小春作了题为“我国二氧化碳地质利用与封存：潜力、科技与商业挑战”的报告。他在报告中指出，CO₂地质利用与封存（CGUS）是二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）的末端环节，是指将 CO₂注入条件适宜的地层，强化资源开采的同时使之与大气长期隔离以减少排放的工业过程。根据所生产的资源或能源品种的不同，主要包括强化采油、强化开采甲烷（CH₄）、浸采采矿与原位矿化、采热以及强化咸水开采与封存技术五大类。我国 CGUS 理论封存总量约 2.5 万亿吨，其中强化咸水开采与封存占比约 96%。根据中国科学院和科技部长期跟踪和评估的结果，预计到 2050 年，我国 CGUS 的二氧化碳减排潜力可达到 19.37~31.94 亿吨/年，相应的全生命周期平准化成本低于 325 元/吨 CO₂。为了实现上述减排潜力，我国 CGUS 发展还需要解决一些关键的科技问题，包括地质封存的效率与安全性、CCUS 集成与集群技术等。他建议，依托示范项目推进商业化体系和监管体系的建设。

天津大学教授张中祥作了题为“双碳目标下中国碳市场建设与国

际合作”的报告。他在报告中指出，我国试水碳排放权交易，2013年在七个省市启动了碳排放交易试点，2014年6月交易试点全部上线交易。碳排放交易试点的设计、运行和履约为完善碳排放交易试点的运行和试点向全国碳排放交易体系推进提供了有价值的参考。2021年全国碳市场的建设和发展进入新阶段，全国 ETS 将在全社会范围内形成碳价信号。截至2021年12月31日，全国碳市场累计运行114个交易日，按企业数量计的履约完成率为94.4%，比国家公布的按履约量计的履约完成率低5.1%，全国碳市场存在明显履约驱动。中国全国碳排放交易体系覆盖的碳排放量达45亿吨二氧化碳，2021年全国碳市场和碳交易试点合计交易额12.9亿欧元，但离世界最大的碳市场还很远。碳市场的发展需要进一步进行电价机制改革配合，并进一步完善有利于发挥碳排放交易作为市场手段实现“双碳”目标的规则。在未来全国碳市场建设的重点方面，他建议全国性的碳排放权交易立法；进一步完善有利于将碳排放交易作为市场工具使用的规则，需要建立科学的配额分配长效机制，不断提高碳配额有偿分配比例，通过拍卖有偿分配碳配额所得可设立转型基金，用于支持经济欠发达或经济发展慢的地区，受减排约束影响更大的地区、行业和群体，减少区域间的差异，助力共同富裕；扩大全国碳交易市场覆盖范围，钢铁、水泥、电解铝行业应优先纳入第二批全国碳市场；促进市场主体多元化，增加交易品种。同时，中国应与国际社会一道就CBAM的碳核算体系、与WTO规则的兼容性、适用的范围和时机等议题加强对话与协调，制定出能被广泛接受的应对竞争力和碳泄漏顾虑的政策或指南，避免单方面采取碳边境调节措施可能带来的冲突。

五、论坛达成的共识及发展建议

本次论坛报告精彩、讨论热烈。论坛研讨中达成共识，明确我国能源发展应立足我国能源资源禀赋，以满足经济发展和安全保障为前提。碳中和进程须与我国自身发展需要和转型发展需求紧密结合。在

保证碳达峰碳中和目标前提下，最低成本地实现能源转型是首要考量因素。建立低碳/零碳能源体系是实现碳中和的根本保障。未来碳中和能源系统中，可再生能源成为主导能源，应重点关注可再生能源与煤电、工业过程等融合发展。煤炭等化石能源在我国能源转型过程中起到重要的安全保障作用。工业过程的绿色低碳发展对实现碳中和有重要作用。钢铁、水泥、化工及有色等高能耗行业应加大投入推进绿色低碳转型。绿电、绿氢将是难脱碳行业实现低碳与零碳发展的重要媒介。固碳增汇技术在实现我国碳中和的过程中发挥压舱石的重要作用。需加大投入对国家碳汇体系、物理科学基础理论、生态固碳及 CCUS 等技术进行研究。同时，需重视碳中和领域的可持续发展创新能力建设；完善及建立国家级公共研究平台，建立与国际接轨的碳中和技术领域标准规范体系。

建议持续研究并定期发布我国能源转型路径及发展路线图。基于我国极其丰富的风光等可再生能源资源和富煤缺油少气的资源禀赋，应充分考虑国内外技术发展趋势以及我国以煤为主的现有能源体系，研究国内外不同能源及综合系统技术发展现状及趋势，研究能源系统模型及规划设计和能源转型优化路径及发展路线图。

建议加强低碳/零碳多能融合能源系统技术的研究与示范。大力开展低成本的低碳/零碳能源系统技术的研究与示范。加强煤电灵活调峰技术研究与示范。研究低成本的可再生能源综合系统多能互补技术，并与高能耗工业工艺过程的用能特性有机融合，打造区域低碳低成本的源网荷一体化供用能体系。研究结合数字赋能和人工智能技术的海量分布式能源系统技术。加快推进边远农牧区可再生能源完全供能解决方案的研究与示范。加强可再生能源多能互补大能源基地技术研究。

建议重点部署不同能源种类高效低成本关键技术研究。加强光伏领域新型、高效电池组件、新型拓扑结构及光伏与多场景耦合应用技术研究。部署太阳热高效、低成本技术及卡诺热电池关键技术与

示范。加强风电领域机组大型化、空气动力理论及海上风电机组技术研究。加强清洁煤电、生物质发电技术和核电技术研究。加强绿色氢能制、储、运、加、用全产业链技术及关键设备的研究与开发，部署变速恒频抽水蓄能技术与示范，加强高安全、长寿命、低成本锂离子电池、压缩空气储能、液流电池等新型储能技术的研究。

建议加强工业过程的绿色低碳技术及装备的研究与示范。加强化石能源的资源化利用研究。开展钢铁、水泥、化工及有色等行业减排降碳关键技术研究，开展煤炭清洁高效利用关键技术研究，加强工业领域跨行业、多过程融合发展技术及装备的研究与示范。结合绿电绿氢技术，开展强电磁冶炼、氢冶金、原油制化学品及合成氨一体化技术、煤化工与绿氢耦合等流程再造技术与示范。加快推进绿色工业流程再造技术与示范。

建议加强固碳基础理论、增汇固碳技术及碳交易机制的研究。加强大气物理科学基础理论研究，加强碳汇的监测、核算、评估等方法学，构建空-天-地一体化的融合技术和数据同化体系，形成国家碳源汇动态监测及综合评估和定量认证能力。基于自然规律、自然条件和自然过程，开展林、草、喀斯特等重点生态固碳区域的增汇途径研发，突破一批硬核技术，在巩固提升固碳能力的同时，构建生态经济，促进美丽中国和乡村振兴建设。针对 CCUS 人工碳汇技术的快速发展，聚焦二氧化碳化学固碳、生物固碳、地质固碳三大方向，结合我国能源和工业过程的实际应用场景，加快新材料、新技术、新过程研究，形成经济可行、有利于大规模推广的固碳方案，支撑保障国家能源安全和产业链供应链安全。完善与加快推进全国碳市场建设，加快并有序扩大碳市场行业覆盖，建立科学的配额分配长效机制，加强碳汇数据质量、监督和管理。

六、与国外同领域研究的比较

与国外相比，从碳达峰到碳中和，全球平均用时 53 年，我国仅有

30 年时间，与欧美发达国家相比，我国能源转型的时间短、任务重，技术挑战更大。我国的优势在于全社会对双碳目标认识高度统一，碳达峰、碳中和领域的技术从上到下全面部署。同时，我国的可再生能源产业发展全球领先。另外，我国拥有 11 亿千瓦煤电装机，煤电灵活性改造可有力支撑我国能源转型过程中的国家能源安全。

同时我们也应看到，我国碳中和领域基础研究方面布局不足，可持续发展的能力有待加强，对综合能源系统模型、规划工具和设计软件缺乏持续研究。

七、论坛特色

本次论坛有几个突出特色：一是典型的多领域、多视角、多学科交叉论坛，从宏观到技术产业、到可持续发展机制全方位研讨交流；二是本次论坛格局高、科学性、前沿性极为突出；三是论坛聚焦发电端、消费端、固碳端三个方向，三端发力共同研讨碳中和愿景下的重大科技问题；四是本次论坛形成的共识和建议对进一步明晰我国碳中和愿景下能源系统转型优选路径以及党中央“双碳”目标的部署和实现提供了重要的科技决策支撑。

（作者：许洪华，中国科学院电工研究所研究员）

联系方式：中国科学院学部工作局科学普及与学术处，010-59358366