

全球能源转型趋势探析与碳中和路径探索

■ 凌文



专家名片

凌文：中国工程院院士、山东省科协主席，曾任中国神华能源股份有限公司总裁、董事长，神华集团总经理，国家能源集团总经理，山东省副省长。

全球可持续发展进程遇阻 中国力行应对气候变化

2015年，联合国全体会员国一致通过了以2030年为期限的可持续发展目标(SDGs)，旨在引导全球共同行动，消除贫困，保护地球并改善人类生活与未来。如今，自启动已过去十年，距离最终期限仅剩约三分之一时间，其整体完成情况却不容乐观。

据联合国环境规划署去年发布的评估预测，到2030年，预计仅有16%的具体目标有望按计划完成，高达84%的目标可能无法实现，甚至出现倒退。其中，应对气候变化的形势尤为严峻。数据显示，2022年全球温升已达1.2摄氏度，2023年升至1.4摄氏度，而去年更是首次突破《巴黎协定》设定的“将全球变暖控制在1.5摄氏度以内”的长期警戒线，达到约1.55摄氏度。与此同时，全球温室气体年排放量仍高达574亿吨，控温减排任务异常艰巨。

在全球气候治理进程中，中国面临着特殊的挑战与重大责任。中国是世界上人口最多的发展中国家，历史累积碳排放总量及人均碳排放量达到较高水平。过去在应对气候变化国际谈判中，中国曾基于人均排放权与发展权等原则进行主张。然而，随着排放数据的演变和国际形势的发展，相关讨论已进入新阶段。

当前，全球已有151个国家提出碳中和目标或愿景，其中120国已通过立法形式予以明确，绝大多数国家将碳中和目标年份设定在2050年或更早，而中国承诺的碳中和年份为2060年。这意味着中国实现从碳排放峰值到碳中和的时间跨度仅为30年，相比欧美等发达国家，转型时间更为紧迫，压力巨大。

面对挑战，中国展现了坚定决心与积极行动。自2020年9月中国国家主席习近平在第七十五届联合国大会上郑重宣布“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的目标以来，“双碳”工作已成为国家战略重点。在2024年9月举行的联合国气候变化峰会上，中国进一步提出了新一轮国家自主贡献目标，被概括为“1+3+3”行动框架。

“1”指全经济范围温室气体净排放量在2035年比峰值（初步预计为2030年左右）下降7%~10%，并争取更好结果。这里的“全经济范围”涵盖直接排放（范围1）、基于电力热力消耗的间接排放（范围2）以及其他所有间接排放（范围3）。

“3”项硬指标包括：到2035年，非化石能源消费占比提升至30%以上（2023年底为19.4%）；风电总装机容量达到36亿千瓦以上（截至2024年9月底约17.1亿千瓦）；全国森林蓄积量增至240亿立方米（2023年底为209.8亿立方米）。

另外“3”项软指标涉及：使新能源汽车成为新销售车辆的主流；将全国碳排放权交易市场覆盖至主要高排放行业；建设气候适应型社会。

尽管联合国可持续发展目标年度评估报告显示中国的得分近年有所波动，并有观点认为其部分评价维度（如平等、国际合作等）未能完全反映中国实际情况，但全球目标的整体看

后已是不争事实。中国作为能源消费和生产大国，其能源电力结构转型对全球至关重要。

当前中国能源电力体系的特点表现为煤电占比仍较高、碳排放强度大、整体效能有待提升以及新型电力系统支撑技术尚存短板。针对这些问题，专家指出中国能源转型的战略方向可归纳为“三化”：推动化石能源（特别是煤炭）的清洁高效利用（清洁化）、加速可再生能源与先进核能的发展（规模化）、促进多能互补与综合能源系统建设（综合化）。相应的技术攻关将聚焦于煤炭清洁高效发电技术、可再生能源与先进核电技术、储能与氢能等综合能源技术，最终导向“清洁、低碳、安全、高效”的现代能源体系。

在这一全球性挑战与转型进程中，山西作为传统能源大省的区域，其角色也正从保障能源供应的“功臣”向绿色低碳转型的“先锋”演变，其丰富的能源基础与转型实践，将成为中国乃至全球探索可持续发展路径的重要一环。

全球能源加速 安全格局深刻重塑

近日，国际能源署（IEA）发布了具有里程碑意义的《2025年世界能源展望》报告。该报告于第30届联合国气候变化大会（COP30）期间在巴西公布，恰逢IEA首版《世界能源展望》发布二十周年。报告开篇指出，在全球地缘政治高度紧张与气候风险加剧交织的背景下，能源议题已超越传统经济范畴，跃升为国家安全与外交的核心议题。IEA署长法提赫·比罗尔强调，能源安全的内涵正从传统的油气时代，向涵盖“关键矿物”的新时代扩展。为此，IEA首次同步发布了关于关键矿物数据与分析能力的专项报告，标志着能源安全关注点的历史性拓宽。

报告描绘了一幅机遇与挑战并存的复杂全球图景。一方面，清洁能源革命呈现不可阻挡之势；另一方面，全球减排行动仍远未达到《巴黎协定》设定的温控目标。当前，能源需求的增长几乎全部由电力与清洁能源领域吸收，终端消费结构正经历从煤炭、石油向电力与低碳燃料的深刻转型。同时，全球能源需求重心持续向以中国、印度和东南亚为代表的亚洲发展中国家转移，这些地区成为未来能源增量的主战场。尽管清洁能源快速发展，化石能源——特别是石油、天然气和煤炭的需求，预计将在本世纪中期达到峰值，随后进入一个漫长的平台期，而非立即快速下降。报告特别指出，自2019年以来，受特定市场需求推动，全球煤炭消费增速比天然气快50%，这成为全球能源相关碳排放持续上升的重要原因之一。

电力被报告明确定义为未来几十年终端能源消费的“主导载体”，堪称“新时代的石油”，其需求增长主要受到新兴经济体工业化、城市化进程，以及人工智能、数据中心等数字技术爆发式增长的双重驱动。初步预测显示，至2035年，全球用电量可能达到当前水平的数倍。然而，与转型加速相伴的是严峻的气候现实。报告警告，当前各国的政策承诺与实际



行动之间存在“明显不符”。即使在较为乐观的既定政策情景下，全球能源相关二氧化碳排放路径仍很可能将世界平均温升区间锁定在远高于《巴黎协定》目标的水平。2024年已成为有记录以来最热的1年，并首次在单年内突破1.5摄氏度的升温阈值，敲响了紧迫的警钟。

能源安全的内涵随之发生深刻演变，从确保油气供应稳定，扩展到保障电力系统可靠性与关键矿物供应链安全。报告指出，在20种至关重要的能源相关矿物中，某个主要国家在19种矿物的精炼环节占据了主导地位，平均市场份额极高，且集中度近年来仍在提升。这使得关键矿物成为未来地缘政治与经济竞争的新焦点。IEA同时在报告中进行了坦诚反思，承认其过去历次预测均“低估了可再生能源、储能和电动汽车的扩张速度”，这三个领域的技术进步与市场渗透力构成了当前能源转型最强劲的超预期动力。

该报告对全球最大的能源消费与清洁能源投资国——中国提出了多维度启示。中国扮演着双重角色：既是全球最大的煤炭消费国，也是最大的可再生能源装机国。这种双重身份带来了巨大的减排压力，同时也使其成为全球规模最大、场景最复杂的电力系统灵活性提升与储能技术创新的“试验场”。在供应链方面，中国在光伏、电池以及关键矿物精炼等清洁能源核心环节占据显著优势。这不仅是强大的产业基础，也构成了长期能源与产业安全战略的核心资产，但高度集中也意味着需要持续关注供应链的韧性与可持续性。这种领先地位为中国在全球能源治理、气候谈判及产业规则制定中赢得了更大的战略操作空间。报告也暗示，其经济增长带来的能源需求增量依然可观，因此，在内部持续深化节能降耗、加快发展清洁能源的同时，其成熟的设备、技术与解决方案也具备对外输出的巨大潜力。此外，能源安全面临多维度挑战，传统的油气进口通道安全、新型电力系统的稳定运行以及关键矿物供应安全，共同构成了需统筹应对的复杂课题。

综上所述，IEA《2025年世界能源展望》清晰表明，全球能源体系正不可逆转地朝向更清洁、更电气化、更高效的方向转型，电力与关键矿物已成为新时代能源安全的基石。然而，目前的转型速度与深度尚不足以有效应对气候危机。

化石能源的长期存在与清洁能源的爆发式增长将在一段时期内并存。对于中国而言，报告既肯定了其在引领全球清洁能源革命和塑造关键供应链中的中枢作用，也明确了其作为主要排放体所面临的艰巨转型任务。未来，如何平衡发展与减排、如何将产业优势转化为可持续的全球领导力、如何构建能够抵御多重风险的现代能源安全体系，将是决定其能否顺利实现“双碳”目标并影响全球转型轨迹的关键。中国的能源结构变革，不仅关乎自身的高质量发展，也必将对全球气候治理与能源未来产生深远影响。

深度调峰与CCUS技术 成新型电力系统关键支撑

关于构建新型电力系统与火电转型路径的讨论引发行业高度关注。构建以新能源为主体的新型电力系统，已被确立为能源领域实现碳中和目标的关键举措。中央财经委员会第九次会议明确提出这一方向，后续中共中央政治局的集体学习也对此进行了专题研讨，凸显了

国家层面对电力系统深刻变革的重视。

新型电力系统的内涵被概括为：以安全高效为基本前提，以清洁低碳为核心目标，以柔性和灵活性为重要支撑，以智慧融合为基础保障。根据国家能源局发布的《新型电力系统蓝皮书》，其发展将划分为三个阶段：至2030年的加速转型期、至2045年的总体形成期，以及至2060年的巩固完善期。各阶段将从电源、电网、用户、储能等多侧协同推进。

然而，新型电力系统的建设面临现实挑战。部分地区电力供应紧张局面凸显，如四川省首次在汛期出现电量短缺，暴露电力保供压力。更为关键的是，系统灵活调节能力不足已成为制约高比例新能源消纳的主要瓶颈。新能源发电的随机性与波动性，对现有电力系统的安全、高效与优化运行提出了前所未有的考验。

为应对挑战，提升火电的灵活高效发电能力成为迫切任务。过去，大型火电机组深度调峰能力有限，例如，百万千瓦级机组负荷率降至60%以下已属困难。如今，通过技术创新，火电正从传统的基荷电源向灵活调节电源转型。行业在此领域进行了多方位探索，包括高效灵活热力系统重构、煤电快速深度调峰、老旧机组延寿升级、智慧电厂无人值守以及火电与储能联合调峰调频等，并已涌现出一批标杆示范项目。

例如，湖南岳阳电厂的高效灵活“双机回热”示范工程，实现了100%工况下供电煤耗的行业领先水平，其深度调峰能力可低至15%额定负荷。江苏谏壁电厂同样实现了15%的深度调峰，并在不配置额外储热设备的情况下，实现了快速的负荷响应。天津盘山电厂通过对老旧机组的等容量升级改造，不仅将机组寿命延长30年，供热能力提升五倍以上，供电煤耗更是显著降低。河北定州电厂通过自主研发的智能控制系统，大幅减少人工操作，成为国内首台实现少人值守乃至全程自主运行的燃煤机组。

在火储联合方面，山东蓬莱电厂采用大容量飞轮储能技术参与调频，其关键参数达到国际领先水平。河北龙山电厂和安徽宿州电厂则探索了“抽汽+熔盐”或“煤电+熔盐”储热的灵活性调峰技术，显著拓宽了机组调峰范围，有效促进了新能源电量的消纳。

除了灵活性改造，碳捕集、利用与封存技术是火电实现深度脱碳的另一关键方向。全球CCUS项目正加速向规模化、产业化迈进。我国已布局超过120个示范项目，覆盖多种技术路径与应用场景。早期如神华集团开展的10万吨级咸水层封存项目，已连续安全运行15年，为地质封存提供了宝贵实践依据。当前，更大规模的示范项目正在推进，如中石化将工业二氧化碳捕集后用于驱油，既提高了石油采收率又将碳封存于地下；国家能源集团在多个电厂部署了从万吨级到规划中百万吨级的不同捕集与利用示范，涵盖驱油、矿化养护建材、烟气注入采空区等多种利用方式。

此外，交直流耦合供电技术作为提升终端能效的潜在方向，也受到关注。该技术旨在减少光伏发电直连与终端直流用电设备之间多次交直流变换带来的能量损失，通过在建筑、园区层面构建直流与交流混合供电网络，实现更高效的能源利用。目前，在整县光伏推进、建筑集群供暖等领域已有示范项目开展探索。

总结来说，火电的未来并非简单的退出，而是肩负着保障电力安全与支撑新能源消纳的双重重任，通过灵活性改造与CCUS技术攻坚，走向清洁、高效、灵活的新型发展道路。同

时，电力系统的变革需要电源、电网、负荷、储能各环节的协同创新，最终构建起支撑“双碳”目标实现的新型能源体系。

破局氢能经济性 开拓低碳应用新场景

在构建清洁低碳、安全高效能源体系的进程中，“绿色甲醇”作为氢基能源的重要载体，正受到越来越多的关注。尽管氢能被普遍视为未来能源的关键方向，并持续列入国家发展规划，但其商业化应用仍面临储运成本高、安全隐患突出及经济性不足等现实挑战。在此背景下，具备初步商业逻辑和减碳效益的绿色甲醇，为能源终端消费的低碳化提供了一条现实可行的探索路径。

近期在山东出现的案例显示，特定政策支持（如高速公路通行费减免）与较低的氢气加注价格相结合，使得氢燃料电池重卡在部分运营线上首次显现出盈利可能。然而，这仍属个例，难以普遍推广。氢能的大规模应用，亟需在储运环节实现成本突破。当前主流的气态高压储运方式效率偏低，一辆49吨的长管拖车实际运输的氢气净重有限，导致终端成本居高不下。液态、固态等储氢技术虽在研发中，其产业化经济性仍有待验证。此外，氢气特有的物理化学性质对安全储运与应用提出了极高的要求。

相比之下，甲醇作为一种液态燃料，在能量密度、储运便利性及安全性方面展现出显著优势。以贵州省贵阳市为例，当地推广甲醇汽车已超过13年，累计投放车辆达4万辆。长期运行实践表明，该模式不仅实现了商业可持续运营，更保持了优异的安全纪录。从全生命周期分析，甲醇汽车相比传统燃油车可减少约82%的碳排放，减碳效果显著。

甲醇的成功实践，为“泛氢”经济的发展提供了宝贵思路。“泛氢”概念涵盖氢、氨、醇、醚等一系列以氢为源头或载体的能源形式。其中，甲醇因其在常温常压下为液体，可利用现有燃油基础设施进行储存、运输和加注，改造成本相对较低，从而率先走出了从技术可行到商业可行的关键一步。对于拥有雄厚煤化工产业基础和科研实力的地区而言，发展以绿氢或捕集二氧化碳合成的绿色甲醇，是实现化石能源清洁高效利用和产业转型升级的重要方向之一。

甲醇的应用场景正在不断拓宽。除汽车领域外，其在船舶动力、无人机乃至应急发电等领域的示范应用也已展开。在寒冷地区进行的测试表明，甲醇燃料具备良好的低温适应性和运行可靠性。这些探索证明，甲醇作为一种低碳液态能源载体，在交通乃至更广泛的能源消费领域拥有巨大潜力。

当前，氢能的技术研发与产业培育仍在加速，其长期战略价值毋庸置疑。然而，绿色甲醇凭借其现有的经济性、安全性和基础设施兼容性，在中期内扮演了重要的过渡角色和有益补充。它不仅是将可再生能源转化为易于储存运输的化学能源的有效途径，也为氢能产业链的降本增效和市场培育赢得了时间。未来，随着可再生能源制氢成本的持续下降以及碳捕集利用技术的进步，绿色甲醇的经济与环境效益将进一步提升，有望在构建多元化清洁能源供应体系、推动终端用能深度脱碳的进程中发挥更为重要的作用。

本文文字由科学导报记者刘娜根据录音整理，图片由刘娜摄