

# 低碳能源系统中能源利用技术现状及展望

张川<sup>1,2,3\*</sup>, 胡沛裕<sup>1</sup>, 殷格格<sup>1,3</sup>, 严武斌<sup>1,4</sup>, 许石炜<sup>1,3</sup>, 曹洵铭<sup>1,4</sup>, 冯轶楠<sup>1,3</sup>,  
赵铭生<sup>1</sup>, 杨雷<sup>1,2,3</sup>, 金之钧<sup>1,3</sup>

(1. 北京大学能源研究院, 北京 100871; 2. 北京大学碳中和研究院, 北京 100871; 3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 4. 北京大学工学院, 北京 100871)

**摘要:** 能源系统脱碳是实现碳中和的关键, 开展能源系统低碳转型需要在一次能源供应、能源加工与转化、能源终端消费等方面大规模地运用低碳能源技术。本文从低碳能源系统优化分析的角度出发, 按照一次能源、二次能源、终端用能的分类, 梳理了各类能源利用技术的发展现状并展望了未来趋势, 进一步分析了能源利用技术在我国低碳能源系统中的应用前景与布局挑战。研究认为: 太阳能发电、风力发电作为增长最快的可再生能源类型, 将在能源供给环节持续发挥重要作用; 生物质利用需要系统评估各类转换技术, 促成生物质资源的跨行业优化分配; 氢能、储能等二次能源亟需突破材料、性能、寿命等方面的技术瓶颈, 追求低的系统成本与规模化应用; 终端用能技术未来将以电气化为核心, 依赖输配电系统的安全稳定转型与有效扩容。未来的能源系统低碳转型还需关注不同能源技术的协调发展, 妥善处理技术因素与市场、制度、社会等非技术因素的协同关系, 推动能源系统加速脱碳。

**关键词:** 能源系统; 低碳转型; 一次能源; 二次能源; 终端用能; 电气化; 非技术因素

**中图分类号:** TK0 **文献标识码:** A

## Comprehensive Review and Future Trend Outlook on Energy Utilization Technologies in Low-Carbon Energy Systems

Zhang Chuan<sup>1,2,3\*</sup>, Hu Peiyu<sup>1</sup>, Yin Gege<sup>1,3</sup>, Yan Wubin<sup>1,4</sup>, Xu Shiwei<sup>1,3</sup>, Cao Ruming<sup>1,4</sup>,  
Feng Yinan<sup>1,3</sup>, Zhao Mingsheng<sup>1</sup>, Yang Lei<sup>1,2,3</sup>, Jin Zhijun<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Carbon Neutrality, Peking University, Beijing 100871, China; 3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 4. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Energy decarbonization is essential for achieving carbon neutrality. To facilitate the low-carbon transition of the energy system, extensive utilization of low-carbon energy technologies is crucial across various sectors, including primary energy supply, energy processing and conversion, and end-use consumption. This study provides a comprehensive overview of the current status and future trends of key energy utilization technologies from the perspective of low-carbon energy system analysis and optimization. We

收稿日期: 2024-03-25; 修回日期: 2024-06-19

通讯作者: \*张川, 北京大学能源研究院研究员, 研究方向为能源系统碳中和; E-mail: czhang@pku.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF0613900); 中国工程院咨询项目“我国碳达峰碳中和若干重大问题研究”(2022-PP-01); 国家自然科学基金项目(72243012)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

analyze the application prospects and layout challenges of energy utilization technologies in China's path toward carbon neutrality from multiple dimensions. Our study highlights the following points: Wind and solar energy, as the fastest-growing renewable energy sources, will continue to play a crucial role in energy supply. The utilization of biomass resources requires systematic evaluation of different conversion technologies, optimizing the allocation of biomass resources across industries. Utilization technologies of secondary energies such as hydrogen and energy storage face challenges related to materials, performance, and lifespan. Overcoming these technical bottlenecks is necessary to achieve low-cost and scalable system applications. Future end-use energy utilization technologies will focus on electrification, which depends on the secure and stable transformation and expansion of electricity distribution systems. Achieving low-carbon transformation in the energy system requires balancing the coordinated development of different energy technologies while addressing non-technical factors such as market dynamics, institutional frameworks, and societal acceptance, ultimately accelerating the decarbonization process.

**Keywords:** energy system; low-carbon transition; primary energy; secondary energy; end-use energy utilization; electrification; non-technical factors

### 一、前言

能源是现代社会不可或缺的重要资源，对经济、社会、环境都有重要影响。进入工业革命以来，煤炭、石油、天然气等化石能源成为人类社会赖以生存的物质基础。在我国，能源消耗随着经济发展和人口增长显著增加，化石能源转化利用导致的气候环境问题更为突出，传统能源系统高碳排放与经济社会可持续发展之间的矛盾愈发显著，加速推进能源系统低碳转型进程尤为迫切。

从能源领域相关研究、近年来我国“双碳”行动实践来看，能源系统低碳转型是具有广泛性、系统性、复杂性的宏大变革。就转型的广泛性而言，能源系统涉及一次能源供应、能源加工与转化、能源终端消费3个关键环节，服务于制造业、交通运输业、建筑业、服务业等经济活动。就转型的复杂性而言，能源系统低碳转型需要打破能源的“不可能三角”，同步保障能源的廉价、环保和安全。能源系统“产-运-储-用”相关基础设施具有显著的路径锁定效应，相应低碳转型不仅提出各类能源技术的清洁化与经济性要求，还驱动相关基础设施进行有序替代，实现氢能、储能等二次能源技术协同发展，增强新型能源系统的安全性及可靠性。就转型的系统性而言，能源作为技术、经济、政治、环境、社会等要素共同作用的复杂系统，相应低碳转型既需要技术层面的进步与创新，也涉及经济社会、生态环境、行为方式等方面的复杂变革。

综合评价能源转型的广泛性、系统性、复杂性，技术与进步最为关键，在能源转型中具有重要的推动作用，将保障低碳能源发展、能源效率改善、低碳能源商业化、能源存储方案演进。为此，本文按照一次能源、二次能源、终端用能的分

类，梳理低碳能源利用技术发展现状并展望未来趋势；从能源低碳转型中的技术因素、非技术因素综合作用的角度出发，探讨整合多种能源利用技术、构建低碳能源系统的挑战与机遇，为深化我国能源系统低碳转型研究提供参考。

### 二、一次能源开发利用现状及展望

一次能源是能源系统的源头，即自然界中存在的原始能源，如煤炭、石油、天然气、核能、太阳能、风能等。一次能源是获取其他形式能源（如热能、电能）的起点，可转化为终端用能供给居民生活和工业生产（见表1）。2022年，我国一次能源供应中化石能源占比合计为81.7%，其中煤炭、石油、天然气的占比分别为55.5%、17.7%、8.5%<sup>[1]</sup>。尽管化石能源的清洁利用可以在一定程度上减少化石能源相关的碳排放，但难以阻挡可再生能源逐步取代化石能源（一次能源侧）的演变趋势。太阳能、风能、生物质能是未来可再生能源的主要品类（见表2）。

#### （一）太阳能发电技术

太阳能发电技术主要分为光伏发电、光热发电（聚光太阳能发电）。光伏发电利用光电效应将太阳辐射转化为电能：当太阳光照射到光伏电池表面时，光子的能量被光伏电池的半导体材料吸收，形成空穴-电子对并在外加电场的作用下产生电流，由此实现电能的转换。光热发电先将太阳辐射转化为热能，再将热能转换为电能：利用聚光器将太阳辐射聚焦并反射至吸热器上，加热吸热器内的传热流体，将太阳能转换为热能；通过换热装置提供蒸汽，驱动汽轮机发电。

表1 能源系统的能流平衡表

(单位:  $\times 10^8$  tce)

项目		煤炭	天然气	石油	电力	其他
能源供应	一次能源	28.01	4.34	10.52	3.01	—
能源消费	农业	0.17	0.002	0.26	0.17	0.007
	工业及建筑业	4.26	0.79	4	6.16	7.24
	生活消费	0.47	0.71	1.12	1.4	0.06
	交通运输	0.02	0.35	2.99	0.22	0.0009
	批发零售及其他	0.37	0.15	0.6	1.19	0.016

注:表中数据引自文献[2];能源供给与消费之间差值为能源转化过程的能量损失。

表2 代表性的一次能源发展现状及趋势

一次能源	装机容量/GW		平准化电力成本/(元/kW·h)	
	2022年(统计值)	2050年(预测值)	2022年(统计值)	2050年(预测值)
太阳能光伏 <sup>[3,4]</sup>	392.4	4000~6000	0.32	0.08~0.2
陆上风电 <sup>[3,5]</sup>	335.5	2000~3000	0.21	0.13~0.2
海上风电 <sup>[3,5]</sup>	30.5	100~200	0.53	0.2~0.59
生物质发电 <sup>[6,7]</sup>	29.5	300~800	0.4	0.2~0.3

随着光伏发电、光热发电技术的广泛应用,相应成本快速下降,体现出规模效应<sup>[8]</sup>。2012—2022年,我国光伏发电总装机容量从6.7 GW增长至392.4 GW,发电量从4.4 TW·h增至327.55 TW·h(约占全社会用电量的3.9%);光热发电装机容量从11 MW增长至596 MW<sup>[3]</sup>。我国分布式光伏发电的市场空间也快速拓展。在2022年新增的光伏发电装机容量(87.4 GW)中,分布式光伏发电占比达到58.5%<sup>[9]</sup>。随着太阳能发电项目的广泛部署,2022年的光伏发电平准化电力成本(LCOE)下降到0.32元/kW·h,相比2010年(2.87元/kW·h)下降了89%;光热发电的LCOE则从2010年的2.45元/kW·h降至2022年的0.76元/kW·h<sup>[10]</sup>。可以预见,未来我国电力结构中太阳能发电技术的占比仍将进一步提高<sup>[11]</sup>,相关成本有望进一步下降,如2030年的光伏发电、光热发电LCOE分别下降至0.26元/kW·h、0.56元/kW·h<sup>[12]</sup>。

在太阳能发电技术经济性提高的同时,技术水平也在不断进步,电能转化效率得到显著提高。①在光伏发电方面,目前的最高转换效率突破了30%,主流的发射极钝化和背面接触(PERC)型光伏组件转换效率也达到25%并接近理论效率极限<sup>[13]</sup>。隧穿氧化层钝化接触(TOPCon)、本征非晶层异质结(HJT)等光伏发电技术产业化进程加快,如TOPCon电池性价比较高,最高转换效率可

达25.7%<sup>[14,15]</sup>。此外,钙钛矿太阳能电池的实验室最高转换效率达到26.1%,与硅电池结合的叠层电池转换效率最高可达33.9%<sup>[16]</sup>;工艺简单、效率提升快、成本较低,具有良好的发展前景。不断开发大尺寸超薄单晶硅片以提高组件效率也是趋势,相应光伏组件可稳定运行25年<sup>[17]</sup>,实验室功率突破740 W<sup>[18]</sup>。②光热发电技术配备长周期、大容量的储热装置,能够实现连续稳定发电。我国光热发电技术创新能力较强,太阳能集热器、光热玻璃等环节的产品质量处于国际先进水平,聚光太阳能总发电效率超过16%,但相应电厂的建设成本仍然较高<sup>[19]</sup>。

未来,光伏电池的发展方向是高效率、低成本。钙钛矿电池与叠层电池的转换效率极高,但相应电池的低成本和规模化制造仍待突破。以TOPCon、HJT等为代表的N型晶硅电池,产业化发展逐渐提速,有望成为新一代主流产品<sup>[8]</sup>。为解决光热发电技术的效率低、成本高问题,需要优化定日镜的聚光比和聚光效率,发展新型吸热器技术以提高光热转换效率<sup>[20]</sup>。近年来,光伏建筑一体化、农光互补、牧光互补、渔光互补等光伏发电应用类型更加多样,“光伏+”应用模式将更好推动一次能源供给转型。

## (二) 风力发电技术

风力发电技术主要分为陆上风电、海上风电两

类，具有相同的工作原理：将风的动能转换为机械能，再通过发电机转换为电能。我国风电装机容量快速提升，2022年的风力发电总装机容量为366 GW，占世界总容量的40%以上，其中陆上风力发电装机容量为335.5 GW，海上风力发电装机容量为30.5 GW。在成本方面，2022年的我国陆上风电、海上风电项目的平均LCOE分别为0.17元/kW·h、0.46元/kW·h，分别较2006年、2010年下降了70%、64%<sup>[10]</sup>。合理预测，2050年我国陆上风电的LCOE将下降至0.12~0.15元/kW·h。关于海上风电，我国也在逐渐实现平价上网的目标，预计2050年的LCOE将与煤炭、天然气相当（0.2~0.21元/kW·h）<sup>[10]</sup>。2030年，我国风电装机容量将为400 GW，占总电力容量的15%，风电将占全社会总用电量的8.4%；2050年，我国风电装机容量将超过1000 GW，占总电力容量的26%，风电将占全社会总用电量的17%，成为主要的电力供应形式之一<sup>[21]</sup>。

从技术突破的角度看，风电机组大型化是提升风力发电效率的主要发展方向。风力机叶片作为风电机组荷载的主要来源、吸收风能的主要载体，在生产工艺、设计水平方面进展显著。例如，基于非线性动力学的超长叶片颤振预测、复合材料叶片变形及胶界面失效规律等基础研究成果提高了超大型叶片的使用安全性；新型碳纤维材料，玻璃、碳纤维、磁性材料回收再利用等方面的关键技术突破，促成了超大型风力机叶片规模化生产与应用<sup>[22]</sup>。此外，大功率齿轮箱等关键部件的生产工艺与技术水平也在持续提升。2013年以来，陆上风电机组的平均叶轮直径由72 m增长至145 m，平均单机容量从1.6 MW增加至4.3 MW；海上风电机组的平均叶轮直径由130 m增长至163 m，平均单机容量从2.8 MW增加到7.4 MW<sup>[8]</sup>。在关键零部件技术突破的基础上，中速半直驱风力发电技术得到广泛应用，面向更为复杂的应用环境设计了低风速型、低温型、高海拔型、抗盐雾型、抗台风型等专用风电机组<sup>[23]</sup>。

风电场的集中运行优化设计是另一个重要发展方向。随着风电机组的大型化、风电场规模的扩大，需要开展大功率风电场集群的优化设计、风电机组实时寿命评估及运行监测，形成智能运维解决方案，有效应对风电输出不稳定性影响低碳能源系统运行安全的风险<sup>[24]</sup>。深远海漂浮式风电也是一种新型风能利用技术，不存在传统意义上的“稳定、

不变”基础结构，导致波浪对风电机组振动更加剧烈的影响以及相对高的风电机组倾覆风险。需要描述海上漂浮式风电的多场耦合演化过程，构建浮动式风电场级缩尺理论，支持相应装备技术研发与应用突破<sup>[7]</sup>。

### （三）生物质能转化利用技术

从碳循环角度看，生物质能源具有碳中性的特点，可视为传统化石能源的绿色替代形式。根据最终的产物形式，生物质转化利用技术主要分为：生物质基能源及燃料、生物质基化学品、生物质基材料<sup>[25]</sup>。我国具有丰富的生物质资源，农林废弃物产量约为 $1.2 \times 10^9$  t/a，但能源化利用的比例仅有8%左右<sup>[6]</sup>。开发生物质资源的能源转化潜力，有助于实现能源结构的低碳转型和“双碳”目标。《“十四五”生物经济发展规划》（2022年）、《“十四五”可再生能源发展规划》（2022年）均提出了生物质能源多元开发的发展要求，以生物质发电、热电联产、生物质燃料等为技术发展及应用要点。

生物质发电是目前技术成熟度最高、应用规模最大的生物质转化利用方式。虽然风电、光伏发电成为电力系统低碳转型的重要方向，但是未来新型电力系统中仍需保留一定比例的火力发电以确保电力系统的稳定性，因而从传统的燃煤发电过渡到生物质发电成为火力发电转型的重要路径之一。我国生物质发电起步较晚但发展迅速，生物质发电累计装机容量从2012年的4.5 GW增长至2022年的34.1 GW<sup>[6]</sup>。热电联产技术在生物质发电的基础上，回收发电过程中的余热进行供热，实现不同品质能量的梯级利用；相比单一的生物质发电，联产模式进一步提高了生物质能源的利用效率，成为生物质能源利用的重点改进方向；未来再辅以碳捕集与封存技术，将显著提升生物质热电联产的减碳能力，有助于实现规模化负碳的目标<sup>[26]</sup>。为此，需要构建稳定高效的生物质供应链，优化生物质原料“收集-转运-储存-供应”体系。

生物质燃料是广受关注的生物质高值化能源转化形式，主要包括燃料乙醇、生物航油、生物柴油等液态生物燃料。燃料乙醇、生物柴油在我国已经形成一定的工业化生产规模，2021年的产量分别为 $2.9 \times 10^6$  t、 $1.65 \times 10^6$  t；生物航油正处于起步发展阶段，预计2025年可生产规模为 $5 \times 10^4$  t。生物质基醇

类的市场需求将进一步扩大,但制备过程中依然普遍存在碳排放较大、糖醇转化效率偏低的问题,也将降低规模化生产的经济性。未来研究需要针对生物质转化过程中碳排放特点,设计原位转化策略,开展生物质中碳的高效利用,进而提升生物质转化的综合效益。

从生物质中获得高附加值的精细化学品也是生物质转化研究的热点。早在2004年即有研究提出12种具有高价值的生物质基平台化合物,如羧酸、醇、酯类化工合成原料<sup>[27]</sup>;以这些平台化合物为起点,可衍生出一系列其他化学品甚至聚合为环境友好型生物质基高分子材料。有关生物质转化为精细化学品的研究多处于基础研究阶段,相关的催化转化机理以及传质、传热、传动机制仍待探索<sup>[28]</sup>。未来研究需关注自然生物质的高效解聚及选择性转化调控机制、廉价高效催化体系下精细化学品合成路径、生物质系统化转化及多产品综合制备策略。

通过生物质热解得到的生物质基材料(同时产出焦油、合成气等燃料产品)也是极富潜力的应用方式,如生物炭因其良好的固碳潜力备受关注,从我国农林草废弃物中获得的生物炭可固定 $9.2 \times 10^8 \text{ tCO}_2/\text{a}$ <sup>[29]</sup>。生物质基塑料也是生物质基材料开发的重点方向,具有可降解、环境友好、碳排放低等特点<sup>[30]</sup>,显著区别于传统的石油基塑料;研究较多的有生物质基聚乳酸塑料、生物质基聚乙烯塑料、生物质基环氧树脂塑料等<sup>[31]</sup>。从生物质中获得聚合所需的单体分子是生物质基塑料生产的关键,提高生物质向目标单体化合物催化转化的选择性是“瓶颈”技术环节。

### 三、二次能源开发利用现状及展望

二次能源是一次能源经过加工转化形成的另一种形态的能源,具有更高的终端利用效率,也更加清洁、便于利用。本研究重点讨论氢能、储能两类

关键二次能源技术的现状及发展趋势(见表3)。

#### (一) 氢能技术

氢能是一种绿色低碳、来源丰富、应用广泛的二次能源类型,在构建清洁低碳、安全高效的能源体系,支持实现“双碳”目标方面具有重要意义;相应生产主要包括化石能源制氢、工业副产氢、电解水制氢。①化石能源制氢以煤炭、天然气等化石能源作为原料,通过重整或热解等方式将化石能源转化为 $\text{H}_2$ 。重整制氢过程需要化石燃料、蒸汽或 $\text{O}_2$ 等反应物参与,热解是没有 $\text{O}_2$ 参与情况下发生的分解过程。②工业副产氢是在工业生产过程中产生的富含 $\text{H}_2$ 的气体,通过提纯及去除杂质等过程后获得,主要来源于钢铁、化工等行业。③电解水制氢基本原理为,在直流电的作用下,水分子在阴极被分解为氢离子、氢氧根离子,氢离子得到电子生成氢原子并进一步生成 $\text{H}_2$ 。主要分为3类:碱性水电解,需要优化提升制氢效率、放大装置生产规模<sup>[32]</sup>;质子交换膜水电解,瓶颈在于设备成本高、寿命短,实际电解效率低于理论效率<sup>[33]</sup>;固体氧化物水电解,采用水蒸气电解,在高温环境下工作,理论能效最高,但仍处于实验室研发阶段<sup>[34]</sup>。

我国 $\text{H}_2$ 生产主要依赖于石化、化工、焦化等行业,2022年的 $\text{H}_2$ 产能约为 $4.882 \times 10^7 \text{ t}$ ,产量约为 $3.533 \times 10^7 \text{ t}$ <sup>[35]</sup>。其中,煤制氢的产量最高,占比为63.5%;工业副产氢和天然气制氢产量次之,占比分别为21.18%、13.76%;仅有1.52%由电解水制氢提供<sup>[36]</sup>。在化石能源价格升高的背景下,2022年的煤制氢、天然气制氢综合成本约为13元/kg、25元/kg,而部分资源优势地区的绿氢评估成本降至约20元/kg<sup>[35]</sup>,已与化石能源制氢成本相当,这为绿氢在化工等领域的扩大试点提供了支撑。我国 $\text{H}_2$ 消费集中在工业部门:合成氨是 $\text{H}_2$ 需求量最高的领域,相应占比为32.3%,甲醇、现代煤化工对 $\text{H}_2$ 需求的占比分别为27.2%、24.5%<sup>[36]</sup>;  $\text{H}_2$ 还可通过燃

表3 代表性的二次能源开发利用技术

二次能源技术		装机容量/GW		投资成本/(元/kW)	
		2022年(统计值)	2050年(预测值)	2022年(统计值)	2050年(预测值)
制氢	电解槽 <sup>[36,37]</sup>	0.2	100~300	7400	1000~2000
	抽水蓄能 <sup>[36~38]</sup>	46	—	6000	3500~4000
储能	锂电池 <sup>[7,39]</sup>	11.9	—	3000	1500~2000
	压缩空气储能 <sup>[39~41]</sup>	17.9	—	5000	2500~3000

料电池或氢内燃机转化为电能与热能，在交通、工业、建筑、电力等行业应用前景广阔。

随着电力成本、电解槽成本的下降，电解水制氢将成为未来的主力制氢来源。2040年，可再生能源电价将下降至0.16元/kW·h，电解水制氢成本与蓝氢成本相当；2060年，可再生能源电价将降至0.13元/kW·h，电解水制氢成本与灰氢成本相当<sup>[42]</sup>。2030年，氢能需求总量将为 $3.1 \times 10^7$  t，2060年将为 $9 \times 10^7$  t，交通、工业氢能使用占比最高<sup>[41]</sup>。然而，我国作为世界最大的H<sub>2</sub>生产国，在制取方面仍以化石能源制氢为主。未来需突破多源高效制氢方法，发展电解水制氢、太阳能光解水制氢、碳/氮基燃料重整制氢等技术路线；研究液氢储运加注、可逆储放氢技术，构建高安全性的氢能“转注-输运-存储-释放”技术体系；扩大先进燃料电池、氢动力等技术应用，推动氢能规模化利用。

### (二) 储能技术

储能新型能源系统调节、能源质量提升、促进可再生能源消纳等方面发挥着重要作用。我国在储能领域进展显著，2022年新增储能项目投运规模占世界总量的36%，累计储能项目装机规模为59.8 GW；锂电池、压缩空气、液流电池等新型储能技术发展较快，累计装机规模突破10 GW<sup>[43]</sup>。市场上的主流储能方式有抽水蓄能（占比为77%）、锂电池储能（占比为20%）、压缩空气储能（占比为0.3%）。

抽水蓄能以水为储能介质，通过电能和势能的转化实现储存；储能总量大，系统寿命长（40 a以上），但储能密度较低（0.5~1.5 W·h/kg）<sup>[38]</sup>。受项目选址施工条件的影响，抽水蓄能总安装成本具有较高的不确定性（4000~14000元/kW），全周期度电储能成本约为40~1000元/kW·h<sup>[38,44]</sup>。为应对可再生能源大规模并网过程的随机性与波动性，我国在变速抽水蓄能技术方向上取得重要进展，首台全功率5兆瓦级的变速恒频抽水蓄能机组已并网发电（2022年），代表了变速恒频可逆式抽水蓄能设计、制造、控制等方面的综合性突破<sup>[45]</sup>。

锂电池以锂金属或合金为电极材料，利用电化学过程实现电能的存储与释放；能量密度为150~500 W·h/kg，开路电压与储能效率高，运行过程几乎无需维护<sup>[46,47]</sup>。近年来，以高镍三元材料、富锂

锰基材料为代表的电极材料不断发展，推动了锂电池能量密度的持续提升<sup>[43]</sup>；固态、凝胶电解质有望取代传统的液态电解质，在获得更好电化学性能的同时，大幅提升锂电池的稳定性与安全性。基于此，锂电池储能电站广泛部署在电力系统的供给侧，用于平衡风电、光伏发电的波动性，提升电网的稳定性与安全性。2023年，我国新增锂电池储能项目的总安装成本约为3000元/kW<sup>[48]</sup>。尽管如此，锂电池储能电站的初始投资相对较高、设备寿命短（5~15 a），未来需要从电极材料升级、电池结构改进等方面予以突破，同时完善产业链与供应链，形成低成本、高安全性的储能解决方案<sup>[45,49]</sup>。

压缩空气储能利用压缩机将空气输送至高压储气罐或地下空间，实现电能与势能的转化及存储；储能密度约为30~60 W·h/kg，系统寿命约为20~40 a，储能损耗低，可实现超过1 a的电能长期存储<sup>[47,50]</sup>。压缩空气储能的经济性良好，总安装成本约为5000元/kW，全周期度电储能成本为15~350元/kW·h，可视为最具有发展潜力的大规模储能技术方案之一<sup>[40,41]</sup>。近年来，绝热压缩空气储能系统性能、压缩机内部流体特性及运行工况调控等研究进展良好，数个百兆瓦级压缩空气储能项目实现并网发电。

随着可再生能源使用比例的逐步提高，储能技术领域需要在多元技术开发、过程安全管理、智慧调控创新等方面开展研究。① 不同储能技术的特征差异明显，单一技术无法满足应用需求。暴雪、高温等极端天气事件频发，暴露出单一储能技术在保障高比例可再生能源系统稳定运行方面的局限性。开发兼具高能量密度、高功率密度的复合型储能系统，突破超导、超级电容等新型储能技术，形成低成本、高可靠的综合储能解决方案，是未来储能领域的研究重点<sup>[51]</sup>。② 安全是储能技术应用的底线和门槛，《国家能源局综合司关于加强发电侧电网侧电化学储能电站安全运行风险监测的通知》（2023年）等政策文件强调了储能发展中需进行全过程安全监测预防。电池本质安全控制、电化学储能系统安全预警、阻燃材料等也是未来储能领域的研究重点。③ 高效应用储能技术也是一项系统工程，涉及储能设施、电源、电网、用户之间的优化联动。需要攻关规模化储能系统集群智能协同控制技术，深化分布式储能系统的协同聚合研究。

## 四、终端用能技术现状及展望

在我国，终端用能技术的关键类型是电气化技术，2060年实现能源系统低碳转型需要终端用能的电气化率达到80%。终端用能的电气化，既依赖电动汽车、热泵等化石能源替代基础设施及技术，也取决于输配电系统的安全稳定转型与有效扩容<sup>[51]</sup>。有研究表明<sup>[52]</sup>，在现有基础设施、未来能源利用技术装机速度的双重约束下，2050年我国工业领域的电气化率仅能从当前的30%增长到50%，交通领域的电气化率可从当前的5%增长到50%，建筑领域的电气化率可从当前的30%增长到60%，因而2050年我国能源系统终端用能的整体电气化率较难超过60%，如何将其提高到80%需要更加深入的论证。

在交通部门，我国正在积极推动电动汽车、电动短途/轻型卡车替代传统燃油车，新能源车企和电动汽车产业链发展水平快速提升，这些因素都有利于提高交通领域电气化率并有序低碳转型。重型/长途货运卡车、轮船、飞机等是交通领域电气化和碳减排的困难环节，采用氢能燃料、生物质燃料等替代传统化石燃料是普遍认可的转型方案。

在建筑与工业部门，终端用能既包含电能，还包含极高比例的热能。2021年，我国建筑与工业部门的热能需求超过 $1 \times 10^4$  TJ，还将在未来10 a提高5倍。目前，“碳基燃料燃烧+锅炉”仍是我国供热的主要方式。加快推动供热由传统的高排放模式转向“清洁电力+热泵”的低碳模式，是实现建筑与工业部门终端用能低碳化转型的关键举措。2021年，我国建筑行业供热相关的直接碳排放为 $5.1 \times 10^8$  tCO<sub>2</sub>、间接碳排放为 $4.3 \times 10^8$  tCO<sub>2</sub><sup>[53]</sup>；北方和中部地区城镇每个供热季所需能量约为50 GJ<sup>[54]</sup>，成为终端热能消耗的核心部门。受低碳供热要求的驱动，分布式热泵在我国农村、中部城市区域具有较高应用潜力。50%~70%的工业能耗都是热能，45%的为中低温（<250 °C，多为80~170 °C）热量。针对食品加工、干燥等低温工业用热场景，应用空气源热泵、地源热泵、水源热泵等并由高品位电能驱动，提取低品位热源中的热能并实现低碳供热，相应技术路线较为成熟。针对化工与轻工业的中温用热需求，基于多级热能品位提升方法研发工业热泵，实现了>200 °C的高品位热能供应与商业应用<sup>[55]</sup>。

热泵技术的广泛应用对我国建筑与工业低碳供热具有重要意义。受碳中和目标的驱动，2050年我国热泵装机容量将为 $1.4 \times 10^9$  kW，可满足总热能需求的25%<sup>[56]</sup>。也要注意，尽管热泵技术为终端供热/制冷提供了更为低碳环保与高效率的解决方案，但仍面临诸多挑战：高昂的前期投资需求对普及应用构成障碍，热泵的能效比及其使用寿命依赖系统设计和循环工质特性。以CO<sub>2</sub>跨临界循环热泵为例，高的运行压力对系统部件的持久耐压能力构成挑战，增加成本并导致低温环境下的能效下降；需要研发低的全球增温潜势（GWP）制冷剂，才能解决制冷剂使用过程中非CO<sub>2</sub>温室气体排放问题<sup>[57]</sup>。

## 五、从能源利用技术到低碳能源系统

能源系统低碳转型是能源利用技术在社会制度、市场环境、地理条件等非技术因素影响下应用发展的过程。加速构建低碳能源系统，需要处理好两方面因素：不同能源利用技术协同发展，确保生产侧、传输侧、消费侧之间能源技术的有效衔接，进而在技术层面实现能源系统的低碳高效目标；社会、文化、市场等因素对能源系统低碳转型过程存在限制作用，需要提高低碳能源系统的可接受度。为此，进一步讨论技术因素和非技术因素对能源系统低碳转型的影响，有助于促进不同能源利用技术协同发展并加速低碳转型进程。

### （一）能源系统低碳转型中的技术因素

在低碳能源系统的建设过程中，作为能源开发与生产关键构成的太阳能、风能、生物质能、氢能、储能等技术，既保持独立发展，又存在紧密联系。例如，太阳能、风能的不稳定输出可以通过储能技术得到平衡，能源供应的连续性和可靠性得以增强；氢能作为能量载体，可以连接电力、运输等能源消费领域，兼有的储能和转换功能将促成跨领域的能源利用。本研究在全面梳理近年来我国能源领域科研项目申请指南、国内外能源科技研究进展的基础上，形成了能源利用技术的未来重点发展方向（见图1）。

构建低碳能源系统需要全面的协同优化，涵盖能源生产侧、传输侧、消费侧等环节以及物理、信息等层面的技术<sup>[58]</sup>。例如，优化光热-生物质联合

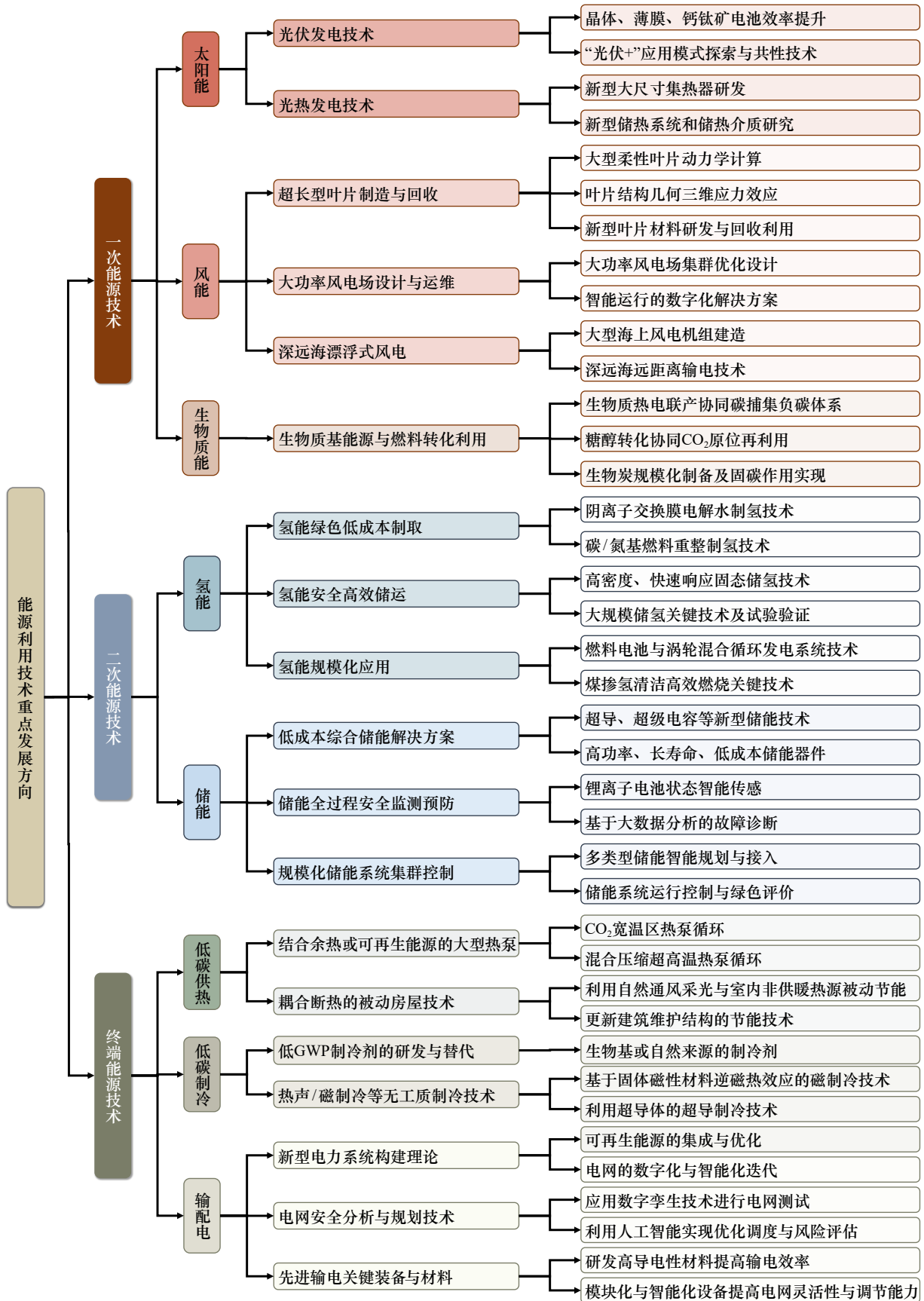


图1 能源利用技术重点发展方向



发电、光热-风电联合发电的组合配置,根据不同地区的气候和环境条件,实现能源产出的最大化和稳定化;结合与终端需求相匹配的智能电网技术,开展更高效的多能流生产协同控制与多能调度,深度优化能源资源配置。

技术创新是推动能源系统低碳转型的核心驱动力。新材料、高效能源转换设备、能源管理技术创新等因素,共同提升能源系统效率,显著降低能源生产和消费的碳排放量。例如,钙钛矿太阳能电池材料的应用,使太阳能电池板的转换效率从15%提升到25%<sup>[59]</sup>;风电机组的单位成本也因技术进步和规模化效应而稳步下降。技术创新还表现在能源系统设计和运行优化能力:采用先进的预测工具和模拟软件,在能源系统规划阶段即预测和解决潜在的技术与环境问题;基于智能化技术构建运行状态透明的低碳能源系统、超低边际成本的能源输送网,更好保障能源系统的技术经济性和环境友好性。

## (二) 能源系统低碳转型中的非技术因素

能源系统低碳转型的实现过程是多维的,涉及技术因素、地理条件、市场条件、社会文化与制度之间的协调。现有的能源转型模型,多侧重技术经济维度以确定成本最低的途径,而技术要素的落地应用与其他非技术要素的相关性(见图2)较难衡量且未引入现有的模型,需要着力补充并完善。

能源系统低碳转型的驱动力在地理空间上存在天然的差异性,不同技术的实施成本、经济效益也存在显著的地理不公平性。这些自然资源、人文地理因素会导致各国的低碳能源技术选择与转型路径

存在区别。可再生能源技术的应用受制于自然资源禀赋,潜在应用规模密切依赖气候、土地、养分、水的可用性。例如,生物能源作物更适宜在温带、热带地区种植并表现出更强的市场竞争力<sup>[60]</sup>,太阳能在我国西北部地区的大规模开发潜力远高于东部和南部地区<sup>[61]</sup>。发展阶段、发展模式等人文地理区位条件也影响着一个国家的低碳能源转型技术选择<sup>[62]</sup>。例如,快速工业化和城市化的国家更适合使用混凝土建筑产品、CO<sub>2</sub>衍生化学品、燃料等<sup>[63]</sup>,发展中国家使用基于核能技术的低碳能源转型,效率一般高于发达国家<sup>[64]</sup>。克服或适应天然的地理要素差异、合理分配低碳转型过程中的责任与收益,是推动清洁能源技术落地应用,实现能源系统低碳转型的重要方面。

能源市场是能源系统的重要构成,能源在市场上的主要形式有能源商品的现货贸易、期货交易,能源技术的合作共享<sup>[64,65]</sup>。当前,国际上面向能源系统低碳转型的投资力度较大,2015—2022年可再生能源领域的投资增长了2倍,但多数投资位于发达国家,因而整体实现全球低碳转型所需的投资缺口依然较大<sup>[66]</sup>。全球清洁能源投资失衡,投资缺口主要位于新兴市场和发展中经济体<sup>[67]</sup>,如发展中国家每年需要可再生能源投资约1.7万亿美元,但2022年仅为5440亿美元。在全球尤其是发展中国家,需要鼓励公共和私营机构积极投资低碳能源利用技术开发与应用。此外,能源市场数据透明度及质量不足可能会干扰投资者对能源领域的投资判断,也将减缓能源系统低碳转型进程,需要加强相应的能源服务机制建设

社会文化与制度通常是技术能否落地应用并持续运行的决定性因素。能源系统低碳转型的参与主体多元,涵盖自然人(或家庭)、企业、公共机构等。这些行为者的行动意愿取决于自身性质、当地条件、能源目标等,受其意愿影响形成的社会文化与制度,可以抵制、推迟甚至破坏能源技术落地应用,进而阻碍能源低碳转型;如果相关能源战略、资源定位符合参与主体的利益,则可以加速能源低碳转型。例如,国外陆上风电项目面临着当地社会的关注甚至阻碍,推行智能电表也曾因执行标准、用户隐私、能源公司与消费者的利益分配等因素而受到阻滞。需要深化社会各界对能源系统低碳转型重要性的认识,协调参与主体之间的利益分配,提

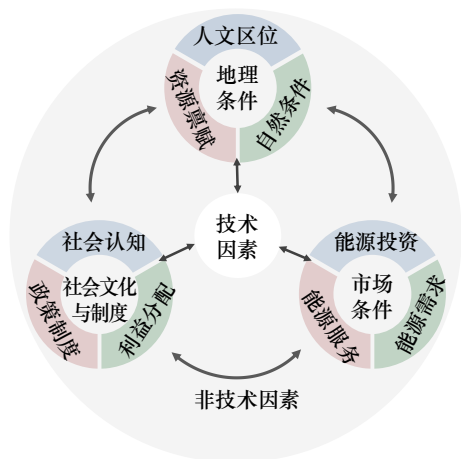


图2 低碳能源转型过程中技术因素与非技术因素相互关系

高相关政策的针对性，开展国际或地区间的合作，从而实现社会意愿正向驱动低碳能源技术发展及应用。

## 六、结语

本文面向能源系统低碳转型，按照一次能源利用、二次能源利用、终端用能的分类方式，从技术原理、工程应用、经济效益、社会影响等维度出发，分析了能源利用技术的研究与应用现状、发展方向与未来挑战。就现状能源系统低碳转型而言，太阳能、风能是增长最快的可再生能源类型，在我国能源供给中发挥越来越重要的作用；在波动性新能源占比稳步提高的背景下，氢能、储能等二次能源技术快速发展，为保障新型能源系统安全性提供了坚实支撑，仍需攻克材料、效率、寿命等方面的技术瓶颈，提升电解槽、电池的综合应用效能，推动实现低成本与规模化的商业应用。

未来的能源系统低碳转型需要更加关注不同能源技术的协调发展、技术因素与非技术因素的协同关系。在生物质能利用技术方向，需要筛选兼具市场前景和环境效益的转化策略，促成生物质资源跨行业的优化分配。在储能技术方向，需要更加关注飞轮储能、超级电容储能、超导磁储能等新型储能细分技术，建立多元且均衡的行业技术体系，适应复杂多样的储能场景需求。在终端用能技术方向，应以热泵、电动汽车等电气化技术为转型关键，以输配电系统的安全稳定转型与有效扩容来提升终端用能电气化率。还需要目标可及、因地制宜的能源规划，投资平衡、机制健全的能源市场，愿景明确、分配合理的社会与文化制度，稳妥处理好技术因素、非技术因素协同作用关系，更好推进能源系统低碳转型。

### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** March 25, 2024; **Revised date:** June 19, 2024

**Corresponding author:** Zhang Chuan is a research fellow from the Institute of Energy, Peking University. His major research field is carbon neutrality in energy systems. E-mail: czhang@pku.edu.cn

**Funding project:** National Key R&D Program of China (2023YFF0613 900); Chinese Academy of Engineering project “Research on Several Major Issues Concerning China’s Carbon Peak and Carbon Neutrality” (2022-PP-01); National Natural Science Fund Project (72243012).

### 参考文献

- [1] Energy Institute. Statistical review of world energy 2023 [R]. London: Energy Institute, 2022.
- [2] 金之钧, 江亿, 戴民汉, 等. 碳中和概论 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2023.  
Jin Z J, Jiang Y, Dai M H, et al. Introduction to carbon neutrality [M]. Beijing: Peking University Press, 2023.
- [3] International Renewable Energy Agency. Renewable energy statistics 2023 [R]. Bonn: International Renewable Energy Agency, 2023.
- [4] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国2050年光伏发展展望 (2019) [R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2019.  
Energy Research Institute of the National Development and Reform Commission. China’s photovoltaic development outlook for 2050 (2019) [R]. Beijing: Energy Research Institute of the National Development and Reform Commission, 2019.
- [5] AR6 scenario explorer and database [EB/OL]. (2023-01-19)[2024-05-07]. <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/ar6-scenario-explorer-and-database>.
- [6] Guo H, Cui J, Li J H. Biomass power generation in China: Status, policies and recommendations [J]. Energy Reports, 2022, 8: 687–696.
- [7] Zhang S, Chen W Y. Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 87.
- [8] 鲁玺. 中国碳中和目标下的风光技术展望 [R]. 北京: 清华大学碳中和研究院, 2023.  
Lu X. Technology outlook on wind and solar power toward China’s carbon neutrality goal [R]. Beijing: Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University, 2023.
- [9] 国家能源局. 2022年光伏发电建设运行情况 [EB/OL]. (2023-02-17)[2024-05-07]. [https://www.nea.gov.cn/2023-02/17/c\\_1310698128.htm](https://www.nea.gov.cn/2023-02/17/c_1310698128.htm).  
National Energy Administration. Photovoltaic power generation construction and operation in 2022 [EB/OL]. (2023-02-17)[2024-05-07]. [https://www.nea.gov.cn/2023-02/17/c\\_1310698128.htm](https://www.nea.gov.cn/2023-02/17/c_1310698128.htm).
- [10] International Renewable Energy Agency. Renewable power generation costs in 2022 [R]. Bonn: International Renewable Energy Agency, 2023.
- [11] International Energy Agency. Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector [R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [12] International Renewable Energy Agency. Global renewables outlook: Energy transformation 2050 [R]. Bonn: International Renewable Energy Agency, 2020.
- [13] Cellura M, Luu L Q, Guarino F, et al. A review on life cycle environmental impacts of emerging solar cells [J]. Science of the Total Environment, 2024, 908: 168019.
- [14] Deng S, Cai Y L, Roemer U, et al. Mitigating parasitic absorption in poly-Si contacts for TOPCon solar cells: A comprehensive review [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024, 267: 112704.
- [15] Green M A, Dunlop E D, Yoshita M, et al. Solar cell efficiency tables (Version 62) [J]. Progress in Photovoltaics: Research and

- Applications, 2023, 31(7): 651–663.
- [16] National Renewable Energy Laboratory. Best research: Cell efficiency chart [EB/OL]. (2024-04-04)[2024-05-07]. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [17] Allouhi A, Rehman S, Buker M S, et al. Recent technical approaches for improving energy efficiency and sustainability of PV and PV-T systems: A comprehensive review [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 56: 103026.
- [18] Trina Solar claims 740 W output for TOPCon PV module [EB/OL]. (2024-04-23)[2024-05-07]. <https://www.pv-magazine.com/2024/04/23/trina-solar-claims-740-w-output-for-topcon-pv-module/>.
- [19] Alami A H, Olabi A G, Mdallal A, et al. Concentrating solar power (CSP) technologies: Status and analysis [J]. *International Journal of Thermofluids*, 2023, 18: 100340.
- [20] Yerudkar A N, Kumar D, Dalvi V H, et al. Economically feasible solutions in concentrating solar power technology specifically for heliostats—A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 189: 113825.
- [21] Wang Z, Shi J, Zhao Y. Technology roadmap: China wind energy development roadmap 2050 [R]. Paris: International Energy Agency and Energy Research Institute, 2011.
- [22] European Technology and Innovation Platform on Wind Energy. ETIPWind roadmap [R]. Brussels: European Technology and Innovation Platform on Wind Energy, 2019.
- [23] Bošnjaković M, Katinić M, Santa R, et al. Wind turbine technology trends [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(17): 8653.
- [24] Gao Y, Ma S X, Wang T, et al. Assessing the wind energy potential of China in considering its variability/intermittency [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 226: 113580.
- [25] Liu S J, Abrahamson L P, Scott G M. Biorefinery: Ensuring biomass as a sustainable renewable source of chemicals, materials, and energy [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 39: 1–4.
- [26] Gilbert A, Sovacool B K. Emissions accounting for biomass energy with CCS [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 495–496.
- [27] Ashokkumar V, Venkatkarthick R, Jayashree S, et al. Recent advances in lignocellulosic biomass for biofuels and value-added bioproducts—A critical review [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344: 126195.
- [28] Lin L F, Han X, Han B X, et al. Emerging heterogeneous catalysts for biomass conversion: Studies of the reaction mechanism [J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(20): 11270–11292.
- [29] Deng X, Teng F, Chen M P, et al. Exploring negative emission potential of biochar to achieve carbon neutrality goal in China [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 1085.
- [30] Spierling S, Knüpffer E, Behnsen H, et al. Bio-based plastics—A review of environmental, social and economic impact assessments [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 185: 476–491.
- [31] Shen L, Worrell E, Patel M. Present and future development in plastics from biomass [J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2010, 4(1): 25–40.
- [32] Brauns J, Turek T. Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review [J]. *Processes*, 2020, 8(2): 248.
- [33] Khatib F N, Wilberforce T, Ijaodola O, et al. Material degradation of components in polymer electrolyte membrane (PEM) electrolytic cell and mitigation mechanisms: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 111: 1–14.
- [34] Hauch A, Küngas R, Blennow P, et al. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis [J]. *Science*, 2020, 370(6513): eaba6118.
- [35] 中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟. 中国氢能源及燃料电池产业发展报告 2022 [M]. 北京: 人民日报出版社, 2023. National Alliance of Hydrogen and Fuel Cell. China hydrogen energy and fuel cell industry development report 2022 [M]. Beijing: People's Daily Press, 2023.
- [36] 中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟. 中国氢能源及燃料电池产业发展报告 2020 [M]. 北京: 人民日报出版社, 2021. National Alliance of Hydrogen and Fuel Cell. China hydrogen energy and fuel cell industry development report 2020 [M]. Beijing: People's Daily Press, 2021.
- [37] Schmidt O, Hawkes A, Gambhir A, et al. The future cost of electrical energy storage based on experience rates [J]. *Nature Energy*, 2017, 2(8): 17110.
- [38] Chen H S, Cong T N, Yang W, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(3): 291–312.
- [39] International Energy Agency. Projected costs of generating electricity 2020 [R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [40] 吴全, 孙春良, 郭海涛, 等. 压缩气体储能技术经济特点和发展方向探析 [J]. *油气与新能源*, 2023, 35(6): 90–98. Wu Q, Sun C L, Guo H T, et al. Analyzing the technological and financial features and prospects for compressed gas energy storage technologies [J]. *Petroleum and New Energy*, 2023, 35(6): 90–98.
- [41] 张玮灵, 古含, 章超, 等. 压缩空气储能技术经济特点及发展趋势 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(4): 1295–1301. Zhang W L, Gu H, Zhang C, et al. Technical economic characteristics and development trends of compressed air energy storage [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(4): 1295–1301.
- [42] 张胜杰. 清洁制氢有望取得长足进展 [N]. *中国能源报*, 2023-09-18 (15). Zhang S J. Clean hydrogen production expected to make great strides [N]. *China Energy News*, 2023-09-18 (15).
- [43] 中国能源研究会储能专业委员会, 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书 2023 [R]. 北京: 中国能源研究会储能专业委员会, 中关村储能产业技术联盟, 2023. Energy Storage Specialized Committee of China Energy Research Society, China Energy Storage Alliance. Energy storage industry research white paper 2023 [R]. Beijing: Energy Storage Specialized Committee of China Energy Research Society, China Energy Storage Alliance, 2023.
- [44] Zakeri B, Syri S. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 569–596.
- [45] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2022 年中国储能技术研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(5): 1516–1552. Chen H S, Li H, Xu Y J, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2022 [J]. *Energy Storage Science*

- and Technology, 2023, 12(5): 1516–1552.
- [46] 艾欣, 董春发. 储能技术在新能源电力系统中的研究综述 [J]. 现代电力, 2015, 32(5): 1–9.  
Ai X, Dong C F. Review on the application of energy storage technology in power system with renewable energy sources [J]. Modern Electric Power, 2015, 32(5): 1–9.
- [47] Mostafa M H, Abdel A S H E, Ali S G, et al. Techno-economic assessment of energy storage systems using annualized life cycle cost of storage (LCCOS) and levelized cost of energy (LCOE) metrics [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 29: 101345.
- [48] 中关村储能产业技术联盟. 全球储能数据库 [EB/OL]. (2023-12-01)[2024-05-07]. <http://www.esresearch.com.cn/>.  
China Energy Storage Alliance. Global energy storage database [EB/OL]. (2023-12-01)[2024-05-07]. <http://www.esresearch.com.cn/>.
- [49] Inderwildi O, Zhang C, Wang X N, et al. The impact of intelligent cyber-physical systems on the decarbonization of energy [J]. Energy & Environmental Science, 2020, 13(3): 744–771.
- [50] 薛福, 马晓明, 游焰军. 储能技术类型及其应用发展综述 [J]. 综合智慧能源, 2023, 45(9): 48–58.  
Xue F, Ma X M, You Y J. Energy storage technologies and their applications and development [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(9): 48–58.
- [51] Dunn B, Kamath H, Tarascon J M. Electrical energy storage for the grid: A battery of choices [J]. Science, 2011, 334(6058): 928–935.
- [52] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1–14.  
Shu Y B, Zhang L Y, Zhang Y Z, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1–14.
- [53] Azevedo I, Bataille C, Bistline J, et al. Net-zero emissions energy systems: What we know and do not know [J]. Energy and Climate Change, 2021, 2: 100049.
- [54] 倪龙, 董世豪, 郑渊博, 等. 热泵技术在中低温热能生产中的减碳效益 [J]. 暖通空调, 2022, 52(11): 23–34.  
Ni L, Dong S H, Zheng Y B, et al. Carbon reduction benefits of heat pump in medium-low temperature heat production [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(11): 23–34.
- [55] Yan H Z, Zhang C, Shao Z, et al. The underestimated role of the heat pump in achieving China's goal of carbon neutrality by 2060 [J]. Engineering, 2023, 23: 13–18.
- [56] 江亿, 胡珊. 中国建筑部门实现碳中和的路径 [J]. 暖通空调, 2021, 51(5): 1–13.  
Jiang Y, Hu S. Paths to carbon neutrality in China's building sector [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(5): 1–13.
- [57] International Energy Agency. The future of heat pumps in China [R]: Paris: International Energy Agency, 2024.
- [58] 饶宏, 李立涅, 郭晓斌, 等. 我国能源技术革命形势及方向分析 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 9–16.  
Rao H, Li L C, Guo X B, et al. Study on situation and direction of China energy technology revolution [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 9–16.
- [59] Liang Z, Zhang Y, Xu H F, et al. Homogenizing out-of-plane cation composition in perovskite solar cells [J]. Nature, 2023, 624(7992): 557–563.
- [60] Kantola I B, Masters M D, Beerling D J, et al. Potential of global croplands and bioenergy crops for climate change mitigation through deployment for enhanced weathering [J]. Biology Letters, 2017, 13(4): 20160714.
- [61] Song Z, Cao S L, Yang H X. Assessment of solar radiation resource and photovoltaic power potential across China based on optimized interpretable machine learning model and GIS-based approaches [J]. Applied Energy, 2023, 339: 121005.
- [62] Kim Y J, Soh M, Cho S H. Identifying optimal financial budget distributions for the low-carbon energy transition between emerging and developed countries [J]. Applied Energy, 2022, 326: 119967.
- [63] Shih C F, Zhang T, Li J H, et al. Powering the future with liquid sunshine [J]. Joule, 2018, 2(10): 1925–1949.
- [64] Brookes N J, Locatelli G. Power plants as megaprojects: Using empirics to shape policy, planning, and construction management [J]. Utilities Policy, 2015, 36: 57–66.
- [65] 赵云龙, 孔庚, 李卓然, 等. 全球能源转型及我国能源革命战略系统分析 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 15–23.  
Zhao Y L, Kong G, Li Z R, et al. Strategic analysis of global energy transition and China's energy revolution [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 15–23.
- [66] United Nations Conference on Trade and Development. World investment report 2023 [R]. New York: United Nations Conference on Trade and Development, 2023.
- [67] International Energy Agency. World energy investment 2023 [R]. Paris: International Energy Agency, 2023.