

# 碳中和目标下我国再电气化研究

舒印彪<sup>1</sup>, 谢典<sup>2</sup>, 赵良<sup>2\*</sup>, 高亚静<sup>2</sup>, 赵勇<sup>2</sup>, 周朝阳<sup>2</sup>

(1. 中国华能集团有限公司, 北京 100031; 2. 中国华能集团有限公司能源研究院, 北京 100031)

**摘要:** 我国将碳达峰、碳中和纳入生态文明建设总体布局, 电力在引领绿色发展中将发挥更加重要的作用。实施再电气化, 实现能源生产侧“清洁替代”和能源消费侧“电能替代”, 对我国如期实现碳达峰、碳中和目标具有重要意义。本文剖析了再电气化的核心内涵, 结合基本国情及资源禀赋, 提出以再电气化助力我国实现低碳发展, 按照“终端能源需求—能源转换系统—一次能源结构”的研究框架, 综合考虑经济、技术、政策、环境等要素, 分析了不同情景下我国能源电力演变趋势, 提出再电气化发展前景。研究表明, 实施再电气化将有力推动实现碳中和目标, 2060年非化石能源消费比重达80%以上、清洁能源发电量比重达90%、终端电能消费比重达70%。研究建议, 一是统筹协调好各行业碳预算与减排路径, 二是加快经济、产业结构调整, 三是推动关键领域科技创新, 四是完善电力市场、碳市场体系建设。

**关键词:** 再电气化; 碳中和; 能源转型; 电能替代

**中图分类号:** TK0 **文献标识码:** A

## Re-electrification in China Under the Carbon Neutrality Goal

Shu Yinbiao<sup>1</sup>, Xie Dian<sup>2</sup>, Zhao Liang<sup>2\*</sup>, Gao Yajing<sup>2</sup>, Zhao Yong<sup>2</sup>, Zhou Chaoyang<sup>2</sup>

(1. China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100031, China; 2. Energy Research Institute of China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100031, China)

**Abstract:** As carbon peak and carbon neutrality have been incorporated into the overall layout of China's ecological civilization construction, electric power will play an increasingly important role in leading green development. Implementing re-electrification to realize clean substitution at the energy production side and electric energy substitution at the energy consumption side is significant for China to achieve carbon peak and carbon neutrality on schedule. In this article, we analyze the concept of re-electrification and propose to help China achieve low-carbon development with re-electrification considering the basic national conditions and resource endowment of the country. We analyze the evolution trend of energy and power in China under different scenarios using a research framework of terminal energy demand—energy conversion system—primary energy structure while considering the factors of economy, technology, policy, and environment. The development prospect of re-electrification is also proposed. The research results show that re-electrification will significantly promote carbon neutrality. In 2060, the proportions of non-fossil energy consumption, clean energy power generation, and terminal power consumption will reach 80%, 90%, and 70%, respectively. Therefore, we suggest that China should (1) coordinate the carbon budget and emission reduction paths of various industries, (2) accelerate the adjustment of economic and industrial structures, (3) promote scientific and technological innovation in key fields, and (4) improve the policy system for power and carbon markets.

收稿日期: 2021-10-13; 修回日期: 2021-11-08

通讯作者: \*赵良, 中国华能集团有限公司能源研究院教授级高级工程师, 研究方向为能源电力规划; E-mail: zhao\_liang@chnng.com.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国碳达峰、碳中和战略及路径研究”(2021-HYZD-14)

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

**Keywords:** re-electrification; carbon neutrality; energy transition; electric energy substitution

### 一、前言

气候变化是人类面临的共同挑战，国内外已有多个国家和地区提出碳中和目标并已开展了一系列行动计划 [1~3]。我国始终高度重视应对气候变化，坚持节能优先、绿色发展，2016年签署了《巴黎协定》并不断加大国家自主贡献力度，2020年9月正式宣布CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达峰、努力争取在2060年前实现碳中和 [4]。

能源系统低碳转型是碳中和行动的主要技术手段，对国家能源安全、可持续发展、经济增长等均具有重要意义 [5]。能源转型的核心是大幅减少化石能源消费、大力发展可再生能源，90%以上非化石能源需要通过转化为电能加以利用，因此，再电气化是推进能源清洁利用、实现碳中和目标的主要途径。再电气化的内涵包括清洁化、电气化、数字化和标准化，即在能源生产侧实现“清洁替代”，增加清洁能源供应；在能源消费侧推进“电能替代”，建设高度电气化社会；通过数字化为能源电力赋能，实现高度感知、双向互动、灵活高效；以标准化促进科技创新和成果转化，建设与国际接轨的碳标准体系，推动低碳技术进步、产业升级和成果共享。

在终端电气化推进方面，许多学者开展了相关研究，包括电能替代的战略路径、挑战与潜力分析等 [6~8]。再电气化本质是高效利用清洁能源，以清洁电能替代化石能源直接消费，其不仅涉及能源系统本身的转型升级，更是一场广泛而深刻的经济社会变革 [9]。有研究结合我国经济发展，从价格弹性和技术扩散的角度，分析“电能替代”“多能互补”等转型模式的科学性和可行性 [10]。对于可再生能源发展的影响，虽然大部分学者认为其有助于社会发展，但也有观点认为需要区分不同国家、不同地区进行研究、讨论 [11]。

综上所述，实施再电气化推动经济社会低碳转型，需要坚持系统观念，充分考虑能源、经济、环境各要素，提出科学合理的发展路径。本文从再电气化的内涵出发，分析其发展需求、重点推进领域及主要影响因素，以力争2060年前实现碳中和为目标，构建模型研究我国再电气化路径，提出对策建议。

### 二、再电气化需求分析

#### (一) 环境驱动力

现阶段，我国面临着日益严重的局地大气污染物和CO<sub>2</sub>减排双重压力。大气污染物与CO<sub>2</sub>排放的同根同源性、措施的同效性使得两者之间的协同控制具有较大潜力 [12]，主要调控措施是以可再生能源大规模替代传统化石能源。目前我国CO<sub>2</sub>排放量巨大，约占世界CO<sub>2</sub>排放总量的28%，碳减排任务艰巨，对化石能源减量控制 and 环境污染物治理，要求我国加强节能措施和“双高”产业管控，加快开发利用清洁能源提升电气化水平。

#### (二) 经济驱动力

以能源革命推动经济发展成为当前世界的主流 [13]。改革开放以来，经过40年发展，我国经济发展步入新常态，转变经济发展方式需要培育新的支柱产业和新的经济增长点，促进我国产业升级。能源行业作为国民经济的传统支柱行业，对经济的发展和产业升级具有重要影响，一方面能源产业是国民经济的重要组成部分，另一方面能源作为重要的基础产业，对其他行业发展的支撑作用至关重要。当前，我国已进入新发展阶段，要求加快产业结构调整与转型升级。2020年9月，国家发展和改革委员会等4部委联合发文提出扩大战略性新兴产业投资、培育壮大新增长点和增长极，涉及新一代信息技术产业、高端装备制造产业、新能源产业等 [14]。2020年11月，国务院发布《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》[15]，电动汽车将进入快速发展阶段。《“十四五”规划和2035年远景目标建议》再次强调，将加快发展现代产业体系，发展战略性新兴产业，发展数字经济，推进数字产业化和产业数字化。根据预测，仅“十四五”期间，“新基建”直接用电需求将达到 $6.5 \times 10^{11} \sim 7 \times 10^{11}$  kW·h，占全社会用电量的7%~7.6%。我国产业调整和质量发展，带来电能需求快速增长，成为实施再电气化的有力推手。

#### (三) 技术驱动力

在能源生产侧，以风电、光伏为代表的清洁发

电技术处于快速发展期。据国际可再生能源署 (IRENA) 分析, 2010 年以来光伏发电成本下降了 82%, 是成本下降最快的发电技术, 风电、光伏进入平价上网阶段, 高参数、超低排放的燃煤发电技术进一步发展, 碳捕获与封存 / 二氧化碳捕集、利用与封存 (CCS/CCUS)、生物能源与碳捕获和储存 (BECCS) 等零碳或负碳技术正在加大力度研发。在能源消费侧, 电动汽车续航能力和电耗水平进步显著, 我国纯电动乘用车电耗平均值已降至 8.6 Wh/(100 km·kg), 节能效果显著, 快充技术正在不断发展; 电弧炉、电窑炉等工业电力设备已具备推广应用价值; 高效热泵、蓄热式电锅炉等清洁供暖方式正在逐步推广应用。此外, 智能用电、新型储能、智慧能源管理、需求响应等技术快速进步, 为再电气化发展提供了技术支撑。

### 三、再电气化重点领域及关键影响因素

#### (一) 重点领域

再电气化的关键路径是全面提升清洁能源的利用程度 [16]。从重点领域看, 主要涉及终端的工业、建筑、交通三大部门以及实现能源转换的电力部门。如图 1 所示, 电力部门通过发电将清洁能源大规模转换为清洁电力, 工业、建筑、交通等部门扩大电能使用规模和范围, 进而实现全社会清洁能源高效开发利用。

#### 1. 工业部门

目前工业部门能源消费量占终端能源消费总量的占比超过 60%, 且以化石能源为主, 电气化率仅为 26%, 碳排放占全国能源相关碳排放的 37%。钢铁、水泥、化工等重点高耗能、高排放行业是工业减排的重点, 也是电能替代的重要领域, 未来需要大力提升能效和电气化水平, 降低工业化石能源需求。

#### 2. 建筑部门

建筑能源主要用于供暖、制冷、照明、炊事、家用电器、生活热水等方面, 从能源形式看, 主要是电能和热能, 建筑热力需求以低品位热能为主, 能通过高效的电热泵、电锅炉等技术满足。建筑部门当前的电气化率已超过 40%, 是终端电气化率最高的部门, 未来仍具有巨大提升潜力, 用电能替代建筑领域的煤炭、石油、天然气消费, 将大幅减少二氧化碳和污染物排放。

#### 3. 交通部门

交通部门包括公路、铁路 (含城市轨道交通)、航运、航空与管道运输, 能源消费以石油为主, 电气化率尚不足 4%, 是目前化石能源占比最高的终端部门。公路是交通部门的主要用能领域, 随着新能源汽车的快速发展, 有望实现高度电气化, 大幅减少燃油汽车使用; 目前铁路的电气化率已达 70% 以上, 未来将继续稳步推进电能替代; 在航运和航空方面, 电能亦将在港口岸电、短途运输等方面发挥一定作用。

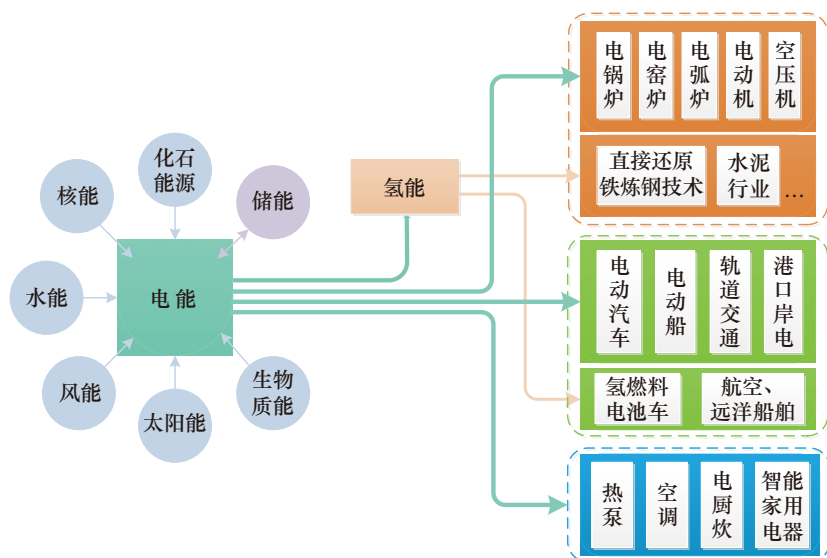


图1 再电气化重点领域

### 4. 电力部门

电力系统是目前碳排放最高的部门，同时又是能源转换平台，是能源生产侧和能源消费侧的枢纽环节，在规模高效利用清洁能源、推动全社会实现碳中和方面将发挥主要作用。随着清洁能源占比不断提升，核能、水能、风能、太阳能等大规模转换为电能，形成多能协同、互联集成的低碳电力系统，在消费侧发挥电能清洁、高效、灵活、便捷的优势，实现深度节能减排。

## （二）关键影响因素

### 1. 产业结构

不同产业结构能源强度差异较大，通常第三产业能源强度远低于第二产业。钢铁、水泥、乙烯等高耗能产业单位产值能耗水平高，且对能源需求多为高品位热能，以化石能源消耗为主，是通过提高电气化水平促进产业结构优化升级的关键领域。高端制造业、服务业、新一代信息技术、工业互联网等新兴产业消耗能源以电能为主，产业发展将助力提升全社会电气化水平。

### 2. 能效水平

能效水平的提升与节能管理、技术进步密切相关。随着节能水平的提升，余能回收利用程度提高，将降低终端有效能的需求总量。在已有的各种终端用能技术中，电能利用效率最高，因此增加电能使用成为提升能效水平的重要措施。

### 3. 电能替代技术

电能替代技术的广泛应用直接推动终端电气化水平提升。电能替代技术可应用于工业、建筑、交通多个领域 [17]，从技术层面分析，绝大多数行业、场景均可采用电能替代终端化石能源，电动汽车、热泵、电锅炉、电窑炉等技术逐步成熟。从经济性考虑，目前电能在终端应用的成本总体较高，尚不具备价格优势 [18]，通过降低可再生能源发电成本以及通过碳市场机制提高其综合成本竞争力，有望使电能更具经济性。

### 4. 氢能等的发展与应用

氢能、生物燃料及其他合成燃料在工业、建筑、交通等多个领域将更加广泛地被推广应用 [19]。在一些低品位用能领域，生物燃料可直接利用；在能量密度要求较高、难以直接电气化的应用领域，氢能、生物燃料等也将发挥补充作用。随着绿氢制

备技术的逐步成熟，氢能的使用比重提升也将提高用电需求，间接推动电气化。

### 5. 非化石能源开发利用水平

在能源生产侧，主要通过大规模开发非化石能源发电，尤其是风电、光伏发电等新能源发电来实现再电气化。新能源高质量发展是实现能源转型的关键 [20]，新能源发电平准化度电成本和并网友好性是实现深度再电气化的关键要素。此外，先进水电和核电技术将成为能源生产侧再电气化的重要补充。

### 6. CCS/CCUS、BECCS等零碳或负碳技术

基于可预见的技术发展，煤电等可控电源在保障电力系统安全、支撑新能源等波动性电源发展方面发挥着重要作用。煤电或天然气发电机组等主要通过加装CCS/CCUS减少二氧化碳排放，因此未来CCS/CCUS技术将得到更快发展以保障碳中和目标的实现。此外，还可在推动生物质发电的同时应用BECCS技术实现负碳，在一定程度上支撑必要的化石能源应用。

### 7. 碳市场、电力市场建设

碳市场是引导社会减排的重要市场化手段，国外发展经验表明，碳市场在推动绿色转型方面发挥着重要作用 [21]。2013年，我国在7个省市启动了碳市场交易地方试点。2021年，我国碳市场正式运行，成为全球涵盖碳排放量规模最大的碳市场。我国陆续出台多项全国碳市场建设相关政策，配额也将逐步从免费分配转变为有偿分配，将有利于提升可再生能源的综合竞争力，促进电气化水平提高。

电力市场在促进新能源消纳，发挥煤电调频调峰辅助服务，充分挖掘电动汽车等需求侧负荷响应方面具有重要作用。我国已建成32个地区电力交易中心和2个区域电力交易中心，电力市场交易以电能直接交易为主，在容量市场、辅助服务市场等方面还有待进一步完善 [22]。

## 四、再电气化路径

### （一）研究思路

从终端用能需求出发，综合考虑技术、经济、环境、政策等因素，根据宏观经济发展、产业结构调整、人口变化、城镇化率、能源替代等要素，预测终端用能结构。基于能源资源禀赋及当前能源供



给结构、发电装机规模等现状,充分考虑各类能源转换技术(发电、供热、制氢等)、储能技术等成熟度和发展趋势,结合能源安全、碳排放和污染物排放控制等约束,得到优化的一次能源供应结构和能源加工转换结构(主要体现为发电量结构),从而提出我国再电气化的前景及路径。

## (二) 主要评价指标

再电气化与传统电气化的主要区别在于目标是构建清洁低碳安全高效的能源系统,以电能为平台枢纽,实现各种能源交汇转换,保障经济社会高质量发展。传统电气化的评价指标主要是发电能源占一次能源消费比重和电能占终端能源消费比重。由于再电气化的内涵与传统电气化产生了差异,再电气化不仅是提高电能比重,更是实现整体能源系统的低碳化和高效化。根据再电气化的目标要求,可将其特征概括为4个维度:电力生产清洁低碳、电力消费广泛普遍、电力系统安全可靠、用电用能经济高效。以这4个特性作为一级指标构建再电气化评价指标体系,如表1所示。

表1中,1~6项体现了再电气化的核心内涵,为关键指标;7~12项是体现再电气化经济社会效益的指标,为辅助性指标。开展再电气化进程的定量研究时,宜主要采用1~6项指标为主要评价依据。

表1中,“含P2H的电能占终端能源消费比重”(用 $\alpha$ 表示)主要是为了体现未来电力作为转换能源的作用,将电能制取的氢能等其他终端能源折算为消耗的电能。计算公式如下:

$$\alpha = \frac{P_h}{E_{\text{终}} - H + P_h}$$

上式中, $E_{\text{终}}$ 为终端能源消费总量, $H$ 为终端消耗的通过电能制取的氢能等能源, $P_h$ 为制备氢能等能源消耗的电能。

## (三) 情景设置

以2060年前我国实现碳中和为目标,倒逼能源系统转型和社会经济结构调整。当前我国森林、海洋等碳汇存量仅 $6 \times 10^8 \sim 7 \times 10^8$  t,考虑未来生态碳汇增长,预计到2060年也不超过 $1.5 \times 10^9$  t,同时考虑工业过程二氧化碳排放与非二氧化碳温室气体等尚无有效减排途径,生态碳汇将主要分配于这些领域,能源系统只能保留少量化石能源消费,电力行业着力构建零碳新型电力系统。到2060年,电力系统保留的火电排放的 $\text{CO}_2$ 将全部通过加装CCS/CCUS、BECCS等移除,情景相关设定详见表2。

## (四) 路径分析

### 1. 碳达峰、碳中和目标下的能源电力供应结构

(1) 一次能源消费中,非化石能源占比和发电能源占比快速提高。非化石能源来源广泛,除了主要用于发电的风能、太阳能等之外,还包括太阳能直接热利用、地热能和生物质直接利用等,将构成一次能源的主要部分。由于消费侧电能替代不断加强,电能需求量持续上涨,直接用于终端消费的能源持续降低,发电能源占比持续提升。我国一次能源消费结构变化趋势如图2所示。2020年,我国一次能源消费中,非化石能源占比和发电能源占比分别为16%和47%。预计2030年,一次能源消费总量将达到峰值的 $5.7 \times 10^9$  tce,非化石能源占比和发电能源占比分别达到28%和57%。2060年,一次能源消费总量将降至 $4.8 \times 10^9$  tce,非化石能源消费占比达到85%,发电能源占比达到91%。

(2) 电力行业碳减排加速将成为全社会低碳转型的主力军。2020年,我国电力行业碳排放量约占全国碳排放总量的38%,非化石能源发电量占比达到34%。实现碳达峰、碳中和目标,要大力推动电力生产低碳化,统筹好电力保障与清洁发展,在西部北部建设多能互补大型清洁能源基地,大力发展海上风电,东中部因地制宜发展分布式能源;积极开发西南水电,在确保安全前提下积极有序发展核

表1 再电气化评价指标

序号	评价维度	评价指标
1	电力生产清洁低碳	发电能源占一次能源消费比重
2		非化石能源发电量比重
3		可再生能源发电量比重
4		单位发电量二氧化碳排放量
5	电力消费广泛普遍	电能占终端能源消费比重
6		含P2H的电能占终端能源消费比重
7		获得电力指数
8	电力系统安全可靠	平均供电可靠率
9		能源自给率
10	用电用能经济高效	单位国内生产总值(GDP)能耗
11		单位GDP电耗
12		平均销售电价

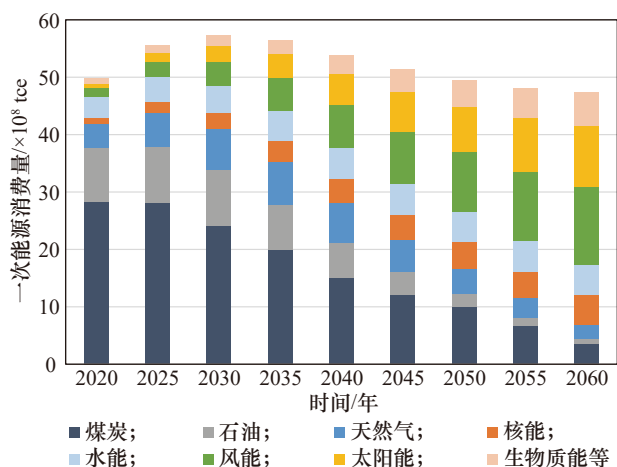


图2 我国一次能源消费结构

电；实现火电由电量提供主体向电力提供主体的功能转变，推动碳捕集、利用与封存技术研发应用，促进电力系统向零碳方向发展。

2030年前，电力行业碳排放达到峰值的 $4.5 \times 10^9$  t左右，经历34年平台期后快速下降，2060年前实现电力零碳排放。我国发电量结构变化趋势如图3所示。2030年，我国总发电量为 $1.18 \times 10^{13}$  kW·h，非化石能源发电量占比和新能源发电量占比分别为49%和26%。2060年，总发电量达到 $1.57 \times 10^{13}$  kW·h，非化石能源发电量占比达到90%，新能源发电量占比达到64%，电力装机达 $7 \times 10^9$  kW，其中新能源装机超过 $5 \times 10^9$  kW。

## 2. 终端电气化水平的发展趋势

(1) 终端能源消费总量持续降低，产业结构不断优化，能效水平显著提升。2020年，我国终端能源消费约为 $3.5 \times 10^9$  tce，工业、建筑、交通和其他部门用能占比分别为61%、22%、14%和3%。随着落后产能不断被淘汰，城镇化率持续提升并趋于稳定，对钢铁、水泥等高耗能产品的需求减少，高端制造业、信息技术产业和服务业成为未来终端能源的消费主体，工业用能占比不断降低，建筑和交通部门用能占比稳步提高，预计到2060年，我国终端能源消费量为 $2.2 \times 10^9$  tce，工业、建筑、交通和其他部门用能占比分别为49%、27%、22%和2%。

(2) 电能成为终端消费的主要能源，终端化石能源燃烧产生的二氧化碳排放占能源活动碳排放的一半以上，随着低碳转型的深度推进，必须加快以电代煤、以电代油、以电代气，以清洁、高效、便捷的电能满足更多用能需求。终端能源消费结构变化趋势如图4所示，预计到2060年，电能占终端能源消费比重达到70%。在工业领域，推广工业电炉、高温蒸汽热泵等电能装备应用，深度拓展工业电气化，提高综合能效和绿色用能水平。在建筑领域，应积极推进建筑供冷供暖电气化，健全市场化改造机制，鼓励利用建筑屋顶、墙壁发展分布式光储系统。在交通领域，未来应大力发展电动汽车、轨道交通、港口岸电等，形成交通综合能源系统。

表2 关键影响因素及相关设定

关键影响因素	情景设定
经济规模及人口变化	经济平稳增长，2035年前将维持5%及以上的增速，此后增速逐步放缓，降至3%~4%；人口变化将先小幅上升，于2030年左右达到峰值，为14.3亿人，而后出现人口负增长，2050年和2060年将分别降至13.4和12.8亿人；我国城镇化率将于2030年达到70%，2050年达到80%后基本趋于稳定
终端产业结构	产业转型升级力度加大，高耗能产业占比降低，工艺流程得以优化，大力发展高端制造业和服务业；人民生活水平提高，交通用能增多。2060年第三产业占比达到70%，终端工业能源消费占比降至50%以下，建筑、交通用能占比持续提升
能源效率	终端大力发展循环经济，生产工艺升级，推行建筑节能改造和绿色建筑，建筑暖通能耗降低50%，交通运输结构进一步优化，高效低耗车辆占比快速提升
电能替代	在工业设备、建筑供暖和交通部门的电动汽车等领域进一步加大电能替代力度，预计到2060年，电动汽车保有量达3.6亿辆
技术进步	2030年后，CCS/CCUS技术开始商业化应用于部分煤电、工业过程等领域。可再生能源制氢在2030年后得到较快应用。2060年，太阳能发电、陆上风电、海上风电、新型储能成本将分别降至1800元/kW、3800元/kW、7000元/kW和700元/kW
能源环境政策	按照碳达峰、碳中和目标，确定可排放的二氧化碳上限，设定各个阶段的碳排放控制目标。2030年单位GDP二氧化碳排放较2005年下降65%以上，新能源装机规模达到 $1.2 \times 10^9$ kW以上

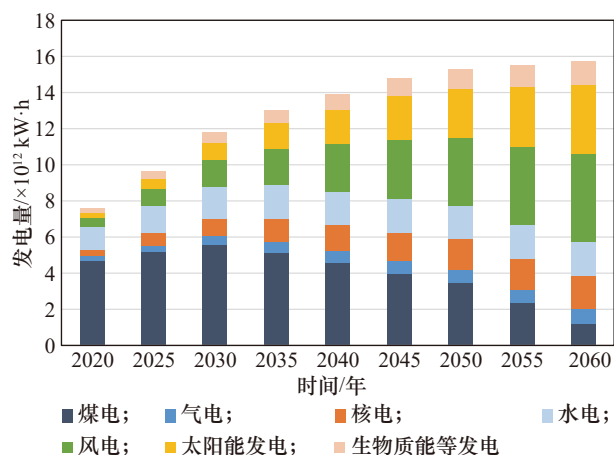


图3 我国发电量结构

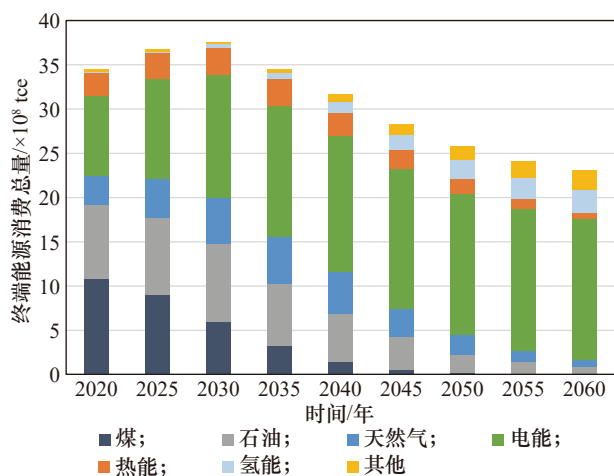


图4 我国终端能源消费结构

预计到2030年，工业、建筑、交通电气化率分别为40%、51%和10%，到2060年分别达71%、81%和54%。

(3) 在难以实现直接电气化的领域，主要通过绿氢、生物质等低碳能源以及“化石能源+CCS/CCUS”等技术手段实现减碳。在燃料方面，对于能量密度要求较高的用能领域，电能较难完全替代化石能源。在工业领域，长流程炼钢过程中高炉炼铁、烧结、焦化等工艺环节较难使用电能，水泥煅烧的燃煤窑炉尚不能采用电窑炉进行替代，化工行业中纯碱、烧碱、合成氨等产品制备的热力需求难以全部用电锅炉满足，其他的大部分轻工业所需要的热力、动力均可实现电气化。在建筑领域，从技术层面看，除严寒地区的供暖难以利用电能外，其他用能领域均可全面推进电气化。在交通领域，

尽管电动重卡、电动船舶已有应用，电动飞机也在研发中，但预计主要用于短途运输，长距离重载公路货运、远洋船舶、远程航空等方面仍较难实现电气化。在原料方面，工业原料带来的碳排放无法通过电气化移除，需要发展低碳原料实现减排。到2060年，电制氢在终端能源消费中占比达到10%，含P2H的电能占终端能源消费比重将超过80%。

### (五) 综合效益

(1) 再电气化有助于提升能源利用效率。在能源消费侧，电力设备效率远高于其他用能设备，工业领域的电窑炉效率可达85%，燃煤窑炉效率仅为30%；建筑供暖的热泵能效比(COP)为35，传统的燃煤锅炉效率通常不足80%；电动汽车百公里耗电约为20 kW·h，同类型燃油车百公里油耗为6~8 L，热值约为5070 kW·h，考虑发电过程损失后，在诸多应用领域提高电气化率具有节能效益。随着可再生能源发电比重的不断提升，若按照电热当量法进行折算，再电气化对于提升能源综合利用效率的作用将更加凸显。

(2) 再电气化是规模化利用非化石能源的主要途径，有利于实现集中控碳脱碳，推动实现碳中和。在能源生产侧，电力是能源互联集成的枢纽、清洁能源体系的核心，是唯一可以与其他能源直接大规模转换的能源；在能源消费侧，通过绿色电力替代化石能源的直接消费，改变传统行业用能方式，是降低终端碳排放和污染物的有效手段。2020年，我国能源领域相关碳排放量约为 $9.9 \times 10^9$  t，终端能源消费直接碳排放量为 $5.7 \times 10^9$  t，通过电力系统清洁化、终端用电电气化，加快减少二氧化碳排放，再电气化将为我国实现碳中和目标贡献80%以上的碳减排。

(3) 再电气化将推动经济高质量发展，带来产业、就业、环境等方面的综合效益。电力不仅是经济增长的动力保障，也将带动能源技术与数字技术深度融合，推动科技创新和产业升级，再电气化还将减少极端气候事件、改善空气质量、提升人类健康水平，从而改善劳动力供应水平，提高民生福祉，减少医疗支出和社会总体碳成本，提升经济社会发展质量。2020—2060年，预计再电气化相关投资规模累计将达到百万亿元级，有力促进上下游产业联动，带动装备和制造业转型升级。2060年，再



电气化将带来就业岗位增量达千万个，由于减排改善了碳排放的负外部性，环境效益估值有望达十万亿元，在产业优化升级、能源结构调整、再电气化水平提升等共同推动下，单位GDP能耗和碳排放强度分别较2020年下降80%和92%以上。

### 五、研究结论及对策建议

#### （一）研究结论

（1）本文以碳达峰、碳中和为目标，提出了再电气化的内涵，包括清洁化、电气化、数字化和标准化。在传统电气化评价指标的基础上，提出了再电气化评价指标，体现电能促进绿色发展、作为能源系统转换枢纽的作用。

（2）开展了我国再电气化进程定量研究，以碳中和为目标，设定了情景参数研究我国再电气化路径。到2060年，我国能源系统将实现“70/80/90”目标，即终端电能消费比重达70%、非化石能源消费比重达80%以上、清洁能源发电量比重达90%以上。

（3）能源生产侧将大规模发展风电、太阳能发电等非化石能源发电，由于高比例的新能源接入将对电力系统安全产生巨大挑战，预计我国能源结构仍需要维持一定的煤电和天然气发电机组实现应急备用、兜底保供和调峰调频，所产生的二氧化碳排放通过碳捕集、封存和利用等技术移除。能源消费侧电能替代成为关键路径，2060年，工业、建筑、交通领域电能消费占比将分别达到71%、81%和54%，形成以电能为中心的清洁低碳安全高效能源体系。

（4）再电气化将有助于经济社会高质量发展，实现综合能效提升、碳排放大幅下降。另一方面，再电气化仍面临经济、技术、市场、体制等多方面挑战，需要各地区、各行业协同努力，合力推进清洁低碳发展与电能替代技术攻关，构建良好的产业生态，促进全社会低碳发展。

#### （二）对策建议

##### 1. 加强顶层设计，统筹推动能源电力低碳转型

统筹协调各行业碳减排预算，特别是需综合考虑电能替代其他能源引起的碳排放转移，进一步明确电力行业碳预算。在电力系统低碳转型过程中，

统筹清洁发展和能源安全，短期内我国煤电仍是电力供应的重要保障，中长期煤电占比大幅下降、发挥灵活调节作用，应针对不同时期制定相适应、彼此衔接的政策，保障煤电实现功能定位转变。充分利用多元化清洁能源、需求侧资源保障电力供需平衡；在规划层面，应合理考虑新能源容量置信度，以科学合理方式参与电力平衡，发挥多元化清洁能源、需求侧资源和传统火电作用，全方位保障电力平衡。充分发挥电网的能源转换枢纽和基础平台作用，加快完善以特高压为骨干网架的坚强智能电网，着力打造可靠性高、互动友好、经济高效的主动配电网。

##### 2. 坚持节能优先，加快经济结构和产业结构调整步伐

强化节能提效，既要优化产业结构，又要大力推广电气化等高能效技术。加快经济、产业转型升级，严控“双高”产业无序扩张，压减落后产能，推动传统产业高端化、智能化、绿色化，加快发展新一代信息技术、新能源、新材料、高端装备等战略性新兴产业。大力发展综合能源服务，在工业领域广泛推广重点节能低碳技术和工业电炉应用；在建筑领域深化建筑节能改造、提高绿色建筑比例、发展建筑分布式能源，实现低碳发展；在交通领域加快构建节能高效的综合交通运输体系，重点发展电动汽车产业，加强充换电基础设施和智慧车联网平台建设，推动经济产业可持续发展。

##### 3. 加快科技创新，推进关键技术研发、示范和产业化整体布局

电力减排路径设计要充分考虑技术突破前瞻性，加强科技战略引领，制定/修订新型电力系统科技发展规划。持续加强碳中和、再电气化相关关键技术研发和示范工程支持力度，完善配套政策体系，为产业化提供激励政策。提前布局重大技术研发，力争颠覆性技术实现重大突破，加快商业化应用。推动低碳清洁能源生产-分配-流通-消费全环节技术进步，高效低成本储能、CCUS、氢能、终端高效用电等关键技术成熟度将对再电气化推进、实现碳中和目标具有深刻影响，应提前布局，尽早实现商业化。

##### 4. 完善体制机制，建立电力市场、碳市场等政策体系

制定全国统一电力市场顶层设计方案和实施路



线图,从发电侧、用电侧双向发力研究出台相关政策,进一步放开发/用电计划,扩大市场范围,通过市场机制充分激发发/用电两侧消纳新能源的潜能,形成“源荷互动”的良好消纳格局。在可再生能源消纳责任权重下,对现有超额消纳量与自愿认购绿色证书进行优化整合,依托绿色电力交易建立统一的绿色消费认证体系。做好消纳责任权重、碳配额、碳税等相关政策的统筹衔接,促进碳市场、绿电市场和绿证市场的目标协同、机制协同,形成同向合力。积极出台绿色金融发展支持政策,通过出台政策和制度使企业或项目的环境成本内部化,更好发挥市场机制在绿色金融中的作用,激发相关产业参与绿色信贷的活力与积极性。

#### 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:** October 13, 2021; **Revised date:** November 8, 2021

**Corresponding author:** Zhao Liang is a professor-level senior engineer from Energy Research Institute of China Huaneng Group Co., Ltd. His major research field is energy and power planning. E-mail: zhaoliang@chneng.com.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on and Paths for Carbon Peaking and Carbon Neutralization in China” (2021-HYZD-14)

#### 参考文献

- [1] Mahone A, Subin Z, Mantegna G, et al. Achieving carbon neutrality in California [R]. New York: Energy and Environmental Economics, 2020.
- [2] Natural Capital Partners. The carbon neutral protocol [R]. Europe: Natural Capital Partners, 2020.
- [3] Salvia M, Reckien D, Pietrapertosa F, et al. Will climate mitigation ambitions lead to carbon neutrality? An analysis of the local-level plans of 327 cities in the EU [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 135: 110253.
- [4] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [EB/OL]. (2020-09-22)[2021-09-30]. [http://www.xinhuanet.com/world/2020-09/22/c\\_1126527652.htm](http://www.xinhuanet.com/world/2020-09/22/c_1126527652.htm).  
Xi J P. Address at the general debate of the 75th United Nations General Assembly [EB/OL]. (2020-09-22)[2021-09-30]. [http://www.xinhuanet.com/world/2020-09/22/c\\_1126527652.htm](http://www.xinhuanet.com/world/2020-09/22/c_1126527652.htm).
- [5] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义 [J]. *石油学报*, 2021, 42(2): 233–247.  
Zou C N, He D B, Jia C Y, et al. Connotation and pathway of world energy transition and its signification for carbon neutral [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 233–247.
- [6] 王伟, 黄珂. 电能替代战略: 机遇、挑战与政策选择 [J]. *华北电力大学学报(社会科学版)*, 2014 (4): 1–5.  
Wang W, Huang K. The strategy of electric power alternation: Opportunities, challenges and policy options [J]. *Journal of North China Electric Power University(Social Sciences)*, 2014 (4): 1–5.
- [7] 孙毅, 许鹏, 单葆国, 等. 售电侧改革背景下“互联网+”电能替代发展路线 [J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3648–3654.  
Sun Y, Xu P, Shan B G, et al. Road map for “Internet Plus” energy substitution in electricity retail market reform in China [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3648–3654.
- [8] 孙毅, 周爽, 单葆国, 等. 多情景下的电能替代潜力分析 [J]. *电网技术*, 2017, 41(1): 118–123.  
Sun Y, Zhou S, Shan B G, et al. Analysis of electric power alternative potential under multi-scenario [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(1): 118–123.
- [9] Oudes D, Stremke S. Spatial transition analysis: Spatially explicit and evidence-based targets for sustainable energy transition at the local and regional scale [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2018, 169(169): 1–11.
- [10] 刘平阔, 王志伟. 中国“能源转型”是否合理?——能源替代—互补关系的实证研究 [J]. *中国软科学*, 2019 (8): 14–30.  
Liu P K, Wang Z W. Is it reasonable for China to promote “Energy Transition” now? —An empirical study on the substitution-complementation relationship among energy resources [J]. *China Soft Science*, 2019 (8): 14–30.
- [11] Apergis N, Salim R. Renewable energy consumption and unemployment: Evidence from a sample of 80 countries and nonlinear estimates [J]. *Applied economics*, 2015, 47 (52): 1–20.
- [12] 贾璐宇, 王艳华, 王克, 等. 大气污染防治措施二氧化碳协同减排效果评估 [J]. *环境保护科学*, 2020, 46(6): 19–26.  
Jia L Y, Wang Y H, Wang K, et al. Evaluation of carbon dioxide coordination emission reduction based on national air pollution control plan [J]. *Environmental Protection Science*, 2020, 46(6): 19–26.
- [13] 史丹, 王蕾. 能源革命及其对经济发展的作用 [J]. *产业经济研究*, 2015 (1): 1–8.  
Shi D, Wang L. Energy revolution and its effects on economic development [J]. *Industrial Economics Research*, 2015 (1): 1–8.
- [14] 国家发展和改革委员会, 科学技术部, 工业和信息化部, 等. 关于扩大战略性新兴产业投资培育壮大新增长点增长极的指导意见 [EB/OL]. (2020-09-08)[2021-09-30]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202009/t20200925\\_1239582\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202009/t20200925_1239582_ext.html).  
National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology of the PRC, Ministry of Industry and Information Technology of the PRC, et al. Guidance on expanding investment in strategic emerging industries, cultivating and expanding new growth points and growth poles [EB/OL]. (2020-09-08)[2021-09-30]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202009/t20200925\\_1239582\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202009/t20200925_1239582_ext.html).
- [15] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)的通知 [EB/OL]. (2020-10-20)[2021-09-30]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content\\_5556716.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm).  
General Office of the State Council of the People’s Republic of China. Notice of the general office of the State Council on printing and distributing the development plan of new energy vehicle industry (2021—2035)[EB/OL]. (2020-10-20)[2021-09-30]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content\\_5556716.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm).

- [16] 王冠. 发电侧与用电侧参与电能替代的效益分析与优化研究 [D]. 北京: 华北电力大学(博士学位论文), 2017.  
Wang G. The study on the comprehensive benefits analysis and optimization model for electric power alternative considering generation side and customer side [D]. Beijing: North China Electric Power University(Doctoral dissertation), 2017.
- [17] 何悦. 中国能源供需预测模型及电能替代对策研究 [D]. 北京: 北京交通大学(硕士学位论文), 2018.  
He Y. Research on prediction mode of energy supply-demand in china and electric energy substitution strategy [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University(Master's thesis), 2018.
- [18] 李春元. 电能替代在终端能源消费市场的竞争力研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学(硕士学位论文), 2016.  
Li C Y. The Research on the competitiveness of electric energy substitution in the terminal energy consumption market [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology(Master's thesis), 2016.
- [19] 符冠云. 氢能在我国能源转型中的地位和作用 [J]. 中国煤炭, 2019, 45(10): 15–21.  
Fu G Y. The status and role of hydrogen energy in China's energy transformation [J]. China Coal, 2019, 45(10): 15–21.
- [20] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893–1904.  
Zhou X X, Chen S Y, Lu Z X, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893–1904.
- [21] 秦炎. 欧洲碳市场推动电力减排的作用机制分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 37–45.  
Qin Y. Role of European carbon market in power sector decarbonization [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 37–45.
- [22] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369–378.  
Chen G P, Liang Z F, Dong Y. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369–378.