

中银研究产品系列

- 《经济金融展望季报》
- 《中银调研》
- 《宏观观察》
- 《银行业观察》
- 《国际金融评论》
- 《国别/地区观察》

作者：梁 婧 中国银行研究院
刘佩忠 中国银行研究院
电 话：010 - 6659 6623

签发人：陈卫东
审 稿：周景彤
联系人：王 静 刘佩忠
电 话：010 - 6659 6623

* 对外公开
** 全辖传阅
*** 内参材料

中国产业电气化发展现状、 路径与对策*

党的二十大报告指出“中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化”，要“加快推动产业结构、能源结构、交通运输结构等调整优化。推进工业、建筑、交通等领域清洁低碳转型”。电气化是推动各产业清洁低碳转型的重要途径。工业、建筑、交通部门作为中国二氧化碳排放的主要领域，具有较为可行的电气化改造前景和路径。工业部门需要引导重点碳排放行业实施电气化设备技术改造，实现工业生产减碳。交通部门需要推广电动化、燃料电池和新型电力基建，促进交通运输低碳运行。建筑部门需要运用电气设备解决日常用能需求，着力推动供暖方式低碳转型。未来需要从政策、资金、技术以及基础配套设施等方面支持各部门电气化发展。

中国产业电气化发展现状、路径与对策

党的二十大报告指出“中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化”，要“加快推动产业结构、能源结构、交通运输结构等调整优化。推进工业、建筑、交通等领域清洁低碳转型”。电气化是推动各产业清洁低碳转型的重要途径。工业、建筑、交通部门作为中国二氧化碳排放的主要领域，具有较为可行的电气化改造前景和路径。工业部门需要引导重点碳排放行业实施电气化设备技术改造，实现工业生产减碳。交通部门需要推广电动化、燃料电池和新型电力基建，促进交通运输低碳运行。建筑部门需要运用电气设备解决日常用能需求，着力推动供暖方式低碳转型。未来需要从政策、资金、技术以及基础配套设施等方面支持各部门电气化发展。

一、电气化发展的重要意义、总体现状与相关部署

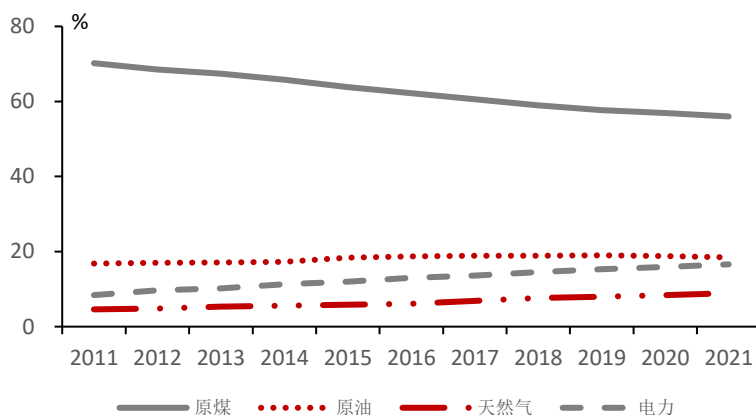
（一）重要意义与总体现状

电气化是指运用电气工艺技术、机械设备、动力能源等，推动工业生产、居民生活以及交通运输等领域使用电力消费替代化石能源消费。近年来电气化推动能源消费转型的作用逐渐凸显。2020 年，中国全年通过电气化产生的替代电量达到 2252 亿千瓦时，占新增用电量的 76.1%，成为了新增用电量的主体。

电气化能促进能源消费结构转型，降低二氧化碳和污染物排放量。2011 至 2020 年，中国能源消费结构持续优化，水电、核电和风电等电力在能源消费总量中的占比由 8.4% 增加到 16.6%（图 1），但该比重有待进一步提高。一方面，电力的生产和消费结构尚不匹配。电力的消费占比（16.6%）尚低于其生产占比（20.3%）（图 2），这与中国对化石能源依赖度较高有关。另一方面，与西方国家相比，中国电力能源消费占比仍有提升空间。以低碳转型较快的欧盟为例，电力在其最终能源消费中的占比为 23%（图 3）。电气化能够通过增强终端能源消费方式对电力的依赖，提高电力消费占比，进而从需求侧带动能源结构低碳转型。此外，电气化能够有效减少二氧化碳和污染物排放。二氧化碳、二氧化硫、二氧化氮等污染物主要由各产业部门燃烧化石能

源产生，利用清洁“绿电”¹替代化石能源能从根本上减少二氧化碳和污染物排放。据文献研究测算²，电力系统清洁化、终端用能电气化能够为中国实现碳中和目标贡献80%以上的二氧化碳减排量。

图 1：中国各类能源消费占比变化



资料来源：Wind，中国银行研究院

图 2：中国各类能源生产和消费占比

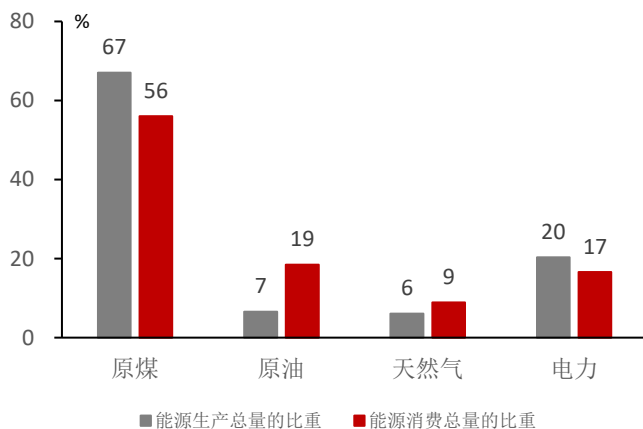
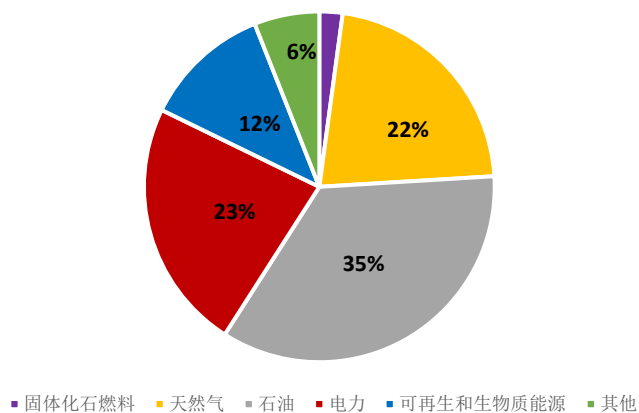


图 3：欧洲各类能源消费占比



资料来源：Wind，EuroStats，中国银行研究院

中国电气化进程任重道远。一是从发展阶段看，中国与发达国家电气化水平仍有

¹ 绿电指由水能、风能、核能、太阳能等可再生能源生产的电力，其生产过程中二氧化碳排放量趋近于零。

² 舒印彪等. 碳中和目标下我国再电气化研究[J]. 中国工程科学, 2021 (3): 201.

差距。根据电气化进程指数³大小可将各个国家电气化发展进程分为电气化前期、电气化中期（细分为初级、中级、高级）以及电气化后期几个阶段。当前日本、美国、德国等发达国家处于电气化中期高级阶段，而中国尚处于中期中级阶段（图 4）。二是与国内“双碳”目标对比，各产业部门电气化水平仍有较大提升空间。当前中国的工业、交通运输以及建筑部门的电气化率分别为 26.2%、3.7%和 44.1%。为实现碳达峰碳中和目标，上述三部门电气化率需在 2030 年分别达到 40%、10%和 51%，在 2060 年分别达到 71%、54%和 81%⁴。三是与国际目标相比，中国电气化目标高、难度大。当前全球工业、交通运输和建筑部门总体电气化率分别为 27%、1%、31.8%，为实现《巴黎协定》将全球气温上升控制在 1.5℃以内的目标，全球三部门电气化率需在 2050 年达到 42%、33%和 56%⁵，均低于中国的目标水平。由于中国的二氧化碳排放强度较大，碳达峰碳中和目标更高，需要在电气化方面付出更大的努力。

图 4：2017-2020 中国电气化发展趋势

判据	进程阶段	电气化中期			电气化后期	进程研判
		初级阶段	中级阶段	高级阶段		
电能占终端能源消费比重（%）		2017年	23.3 26.5		2020年	处于中期中级阶段
单位GDP电耗（千瓦时/万元）		2017年	809 827		2020年	处于中期中级阶段
人均生活用电量（千瓦时/人）		2017年	628 781		2020年	处于中期中级阶段
非化石能源电力消纳量占比（%）		2017年	30.4 33.7		2020年	处于中期中级阶段
单位发电量二氧化碳排放强度（克/千瓦时）	2017年	599 565			2020年	处于中期中级阶段
用户平均停电时间（小时/户年）		2017年	16.27 11.87		2020年	处于中期中级过渡到高级阶段
电气化进程指数		2017年	73.8 77.3		2020年	处于中期中级阶段

资料来源：《中国电气化年度发展报告 2021》

（二）相关部署规划

中国碳达峰碳中和政策体系着力推动各产业电气化发展。当前中国已经形成由

³ 《中国电气化年度发展报告 2021》使用包括电能站终端能源消费比重、用户平均停电时间、人均生活用电量、单位 GDP 电耗、非化石能源发电量占比以及单位发电量二氧化碳排放强度的六项指标构建的综合指数。

⁴ 谢典等，“双碳”目标下我国在电气化路径及综合影响研究[J]. 综合智慧能源，2022 年（3）：3.

⁵ 洪博文等，基于可再生能源的全球电气化路径与远景分析[J]. 中国电力，2020(3)：164.

《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030 年前碳达峰行动方案》构成的碳达峰碳中和“1+N”政策体系。顶层设计文件均提出要将提高电气化水平作为工业、交通和城乡建设等领域绿色低碳转型的重要任务。在“1+N”的政策体系下，各部门进一步提出了具体电气化发展规划。工业部门以传统行业绿色化改造为重点，推广工业“绿电”和电动制造。《“十四五”工业绿色发展规划》提出要推动传统行业绿色发展和工业能源低碳转型，提升工业部门终端用能电气化水平，鼓励工厂、园区开展绿色低碳微电网建设，推广运用先进适用的电动工业技术。交通部门着眼新能源推广运用，加强交通电力设施建设。《绿色交通“十四五”发展规划》提出要加快电动和氢燃料电池等新能源技术推广应用，推进公路服务站、客运枢纽、港口码头的电力基础设施建设。建筑部门推动清洁电能应用，实施电气化建筑工程。《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》提出要在建筑运行中运用光伏、储能、热泵等电气技术，开发利用太阳能、地热能等可再生能源，在房屋修建中开展新型建筑电力系统建设。

表 1：各部门绿色发展和电气化规划内容

规划文件	绿色发展目标	电气化具体措施
《“十四五”工业绿色发展规划》	降低碳排放和污染物排放强度、提升能源和资源利用效率、完善绿色制造体系	工业用能煤改电；推广应用电窑炉、电锅炉、电动力设备；发展屋顶光伏、分散式风电、多元储能、高效热泵等；等等。
《绿色交通“十四五”发展规划》	促进交通基础设施与生态环境协调、降低交通工具能耗和碳排放、防治交通运输污染、优化客货运输结构	客货运输领域新能源汽车推广；公路服务区、客运枢纽等区域充（换）电设施建设；港口码头岸电设施改造；等等。
《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》	提升绿色建筑发展质量、提高新建建筑节能水平、加强建筑节能绿色改造	太阳能建筑建设；地热能等可再生能源利用；建筑用能电力代替行动；新型建筑电力系统建设；等等。

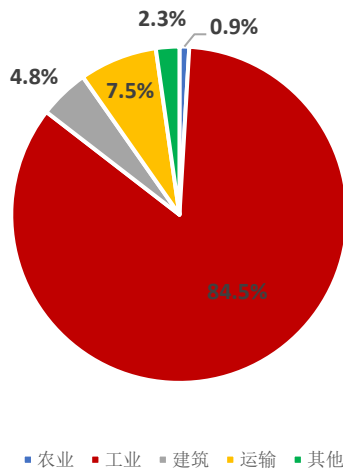
资料来源：中国银行研究院

二、主要产业部门碳排放来源和电气化发展路径

工业、交通和建筑部门的二氧化碳排放量约占全社会总量的 84.5%、7.5%和 4.8%（图 5），是重点减排领域。需明确各部门二氧化碳排放来源，分析其通过电气化发

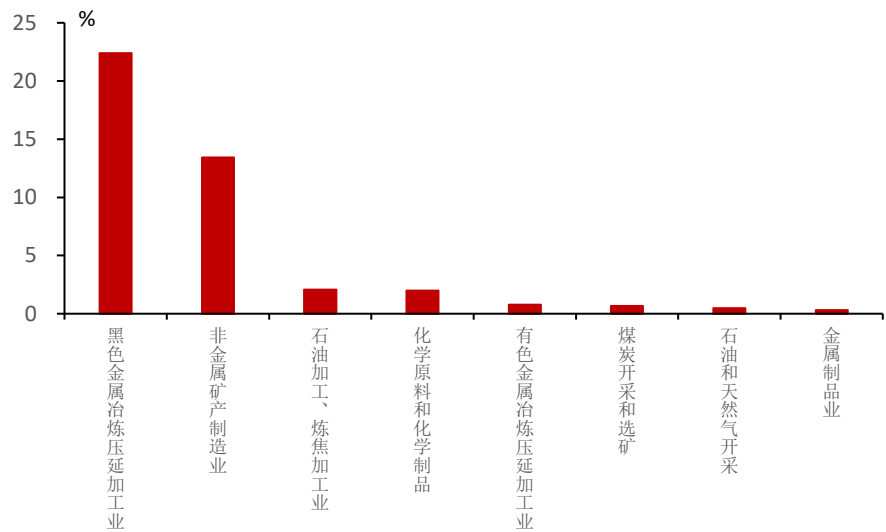
展减排的可行性和发展方向。

图 5：中国二氧化碳排放占比情况



资料来源：Wind，中国银行研究院

图 6：工业部门各行业碳排放占比情况



资料来源：Wind，中国银行研究院

（一）工业部门引导重点碳排放行业实施电气化设备技术改造

工业部门的二氧化碳排放主要集中在黑色金属、非金属矿产、石油化工、有色金

属等传统制造业⁶（图 6）。其中，黑色金属加工业和非金属矿产制造业的碳排放占比分别达到了 22.38%和 13.43%，主要来自钢铁行业和建材水泥行业。

钢铁行业主要通过推广电炉冶炼实施减排。现阶段，钢铁行业的主要冶炼工艺为高炉炼铁和转炉炼钢。冶炼钢铁的二氧化碳排放量为 1.68 吨/吨钢，其中非用电能耗的排放量为 1.42 吨/吨钢，用电能耗的排放量为 0.26 吨/吨钢。目前，电炉炼钢是最成熟的电气化减排方式，其优势有以下几点。一是电炉炼钢能有效减少碳排放。电炉炼钢主要使用电能，二氧化碳排放量约为 0.4 吨/吨钢，远低于传统转炉炼钢工艺。未来电炉炼钢的碳排放量将随着“绿电”普及而进一步下降。二是电炉炼钢有助于促进资源循环利用。区别于传统炼钢使用铁矿石，电炉炼钢以相近钢种的废钢为原料，能促进废钢资源消化，降低中国铁矿对外依赖度。三是电炉工艺流程短且投资成本低。与传统“高炉炼铁-转炉炼钢-连续铸钢”工艺相比，电炉炼钢工艺因使用废钢而省去了庞杂的炼铁系统，其投资成本要低 50%以上。据预测，2050 年钢铁生产中将有 45%使用电炉炼钢，仅有 5%为转炉炼钢（剩余为氢能炼钢）⁷。

建材水泥行业通过原料替代、余热发电等方式发展电气化，但碳减排效果较为有限。当前干法熟料工艺是水泥制造最主要且成熟的技术路线，其二氧化碳排放可分为原料和燃料动力两个部分。制造石灰石原料的碳排放约为 0.36 吨/吨水泥，燃烧和用电碳排放分别约为 0.18 吨/吨水泥和 0.05 吨/吨水泥。其电气化路径可以选择使用电炉渣⁸等低碳排放物替代原材料，使用电解制氢替代传统化石燃料，利用余热发电、接入清洁能源电力等。但目前由于电炉无法替代水泥煅烧的燃煤窑炉，电气化方式的碳减排效果较为有限，未来水泥行业主要需要使用碳捕获技术来实现减排。

⁶ 从工业部门内部结构上看，电力、热力和热水生产供应业的二氧化碳排放占比达 56.6%，剩余部分主要集中于传统制造业。电力、热力和热水生产供应业的碳排放主要对应电力能源生产和建筑部门的供暖、热水需求等。电力能源生产不属于通过电气化调整能源消费方式的讨论范畴，供热、热水需求将纳入后文建筑部门的分析，故在工业部门电气化讨论中排除了该行业。

⁷ 中国长期低碳发展战略与转型路径研究课题组、清华大学气候变化与可持续发展研究院. 读懂碳中和[M]，中信集团出版社，2021:236.

⁸ 电炉渣是采用电炉冶炼金属的过程中排出的固体废物，主要成分是钙、铁、铜、硅、镁、铝、锰、磷等氧化物。

石油化工行业可采用电解“绿氢”⁹替代燃料和原料的间接电气化发展方式。石油化工中的碳排放主要来自于化学合成品能耗、燃料排放以及化学反应过程。煤炭和石脑油既是合成原料又是生产燃料。电解“绿氢”可替代化石燃料和原料，甚至能在生产过程中消耗二氧化碳，实现“负碳”。一方面，电解“绿氢”是化石燃料的高效、低碳替代品。氢的热值为 143 千焦耳/克，分别是汽油和焦炭热值的 3 倍和 4.5 倍，并且其燃烧产物是水。另一方面，氢气可以替代化石原料。以合成氨和乙烯为例，合成氨的工艺结构改进可大幅提高氢的用量，降低煤炭用量；乙烯的工艺结构改进可提高由“绿氢+二氧化碳”直接合成的烯烃用量，降低石脑油用量。“绿氢+二氧化碳”的合成方式不仅能产生新的原料，还消耗了二氧化碳，从而实现“负碳”。此外，化工生产中所需的蒸汽可采用电加热制造，化学反应中的碳排放可通过碳捕获技术解决。

有色金属行业使用绿色电力实现减排。制铝行业的二氧化碳排放量占有色金属行业排放总量的 80%以上，是该行业的重点减排领域。电解铝的生产步骤为“铝土矿-氧化铝-电解铝”，其中“铝土矿-氧化铝”过程的非用电能耗碳排放占总量的 20%，“氧化铝-电解铝”过程的用电能耗碳排放占 80%。当前，“铝土矿-氧化铝”生产大多采用碳排放较低的拜耳法工艺，技术改进的减排作用有限，需采用碳捕捉技术。“氧化铝-电解铝”生产工艺采用电气技术，在电解槽内使用强大的电流把氧化铝分解出金属铝。该生产过程主要通过自备火电厂改为“绿电”厂或外接清洁能源电力来实现碳减排。

一般制造业可采用电气设备改造和电解“绿氢”替代燃料的电气化发展路径。一

预览已结束，完整报告链接和二维码如下：

https://www.yunbaogao.cn/report/index/report?reportId=1_50477

