

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

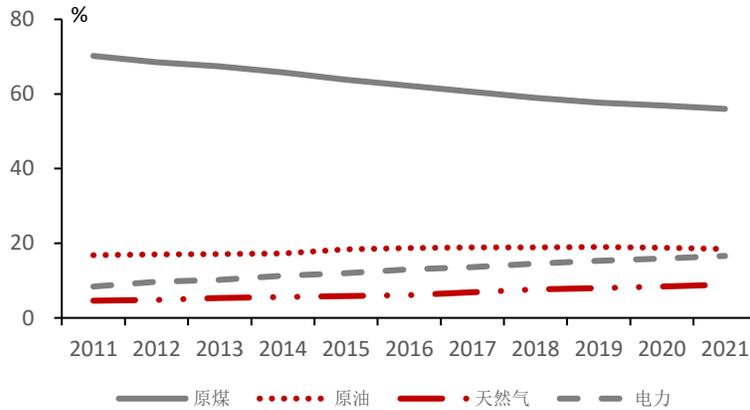
（一）重要意义与总体现状

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

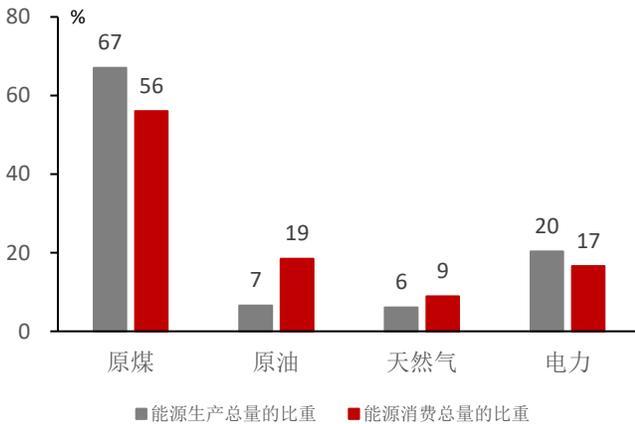
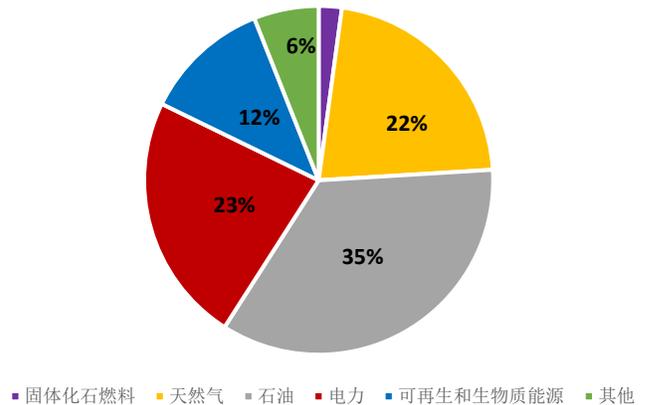


图 3：欧洲各类能源消费占比



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
	电气化前期	初级阶段	中级阶段	高级阶段	电气化后期		
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。

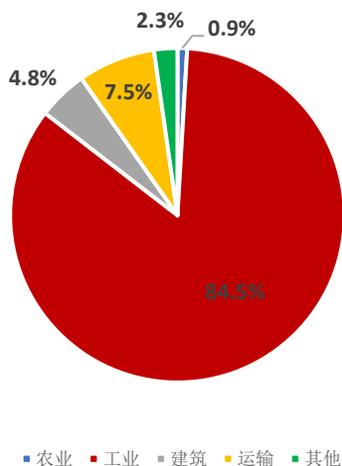
资料来源：中国银行研究院

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

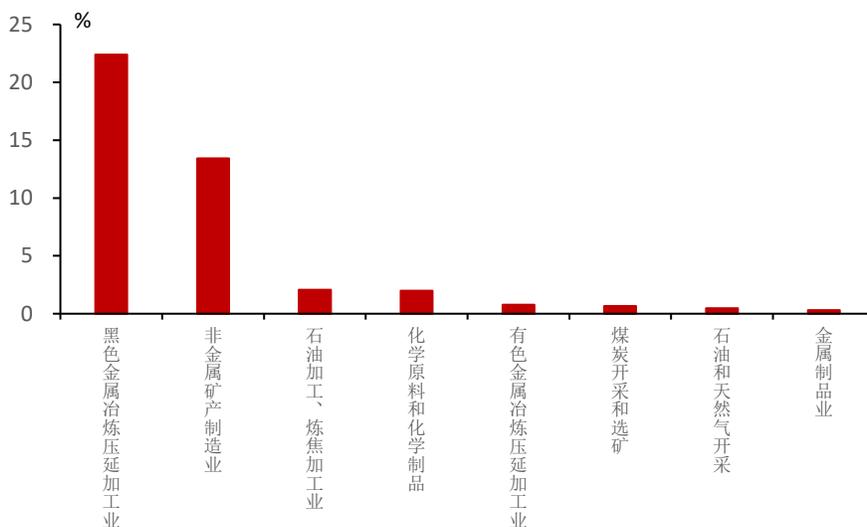
展减排的可行性和发展方向。

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。

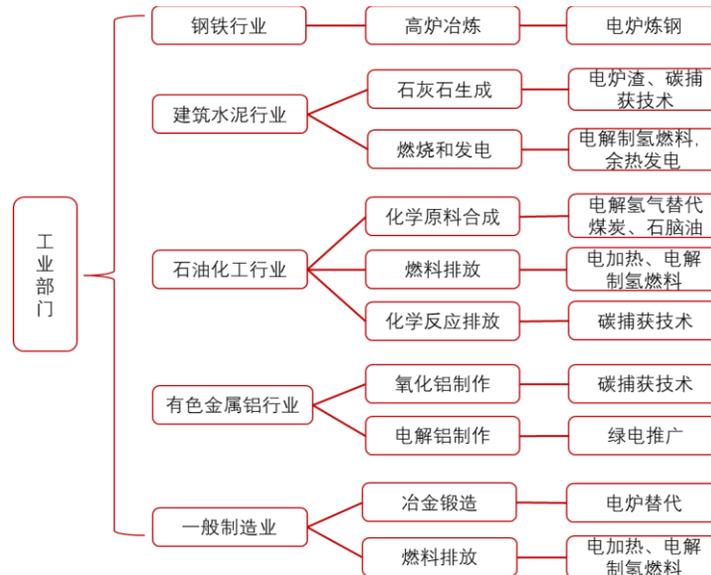
石油化工行业可采用电解“绿氢”⁹替代燃料和原料的间接电气化发展方式。石油化工中的碳排放主要来自于化学合成品能耗、燃料排放以及化学反应过程。煤炭和石脑油既是合成原料又是生产燃料。电解“绿氢”可替代化石燃料和原料，甚至能在生产过程中消耗二氧化碳，实现“负碳”。一方面，电解“绿氢”是化石燃料的高效、低碳替代品。氢的热值为143千焦耳/克，分别是汽油和焦炭热值的3倍和4.5倍，并且其燃烧产物是水。另一方面，氢气可以替代化石原料。以合成氨和乙烯为例，合成氨的工艺结构改进可大幅提高氢的用量，降低煤炭用量；乙烯的工艺结构改进可提高由“绿氢+二氧化碳”直接合成的烯烃用量，降低石脑油用量。“绿氢+二氧化碳”的合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。一般制造业的碳排放规模最小，占工业部门总量的2%左右。一般制造业中的冶金锻造可以使用电炉替代冲天炉，生产燃料可以使用电解“绿氢”替代化石燃料。目前，一般制造业已经实现碳达峰目标，未来可依靠运用电气设备、清洁燃料以及碳捕获技术实现碳中和目标。

⁹ 绿氢是指利用可再生能源分解水得到的氢气，其燃烧时只产生水。“电解水”制氢是生产绿氢的重要途径。

图 7：工业部门二氧化碳主要来源及其电气化路径

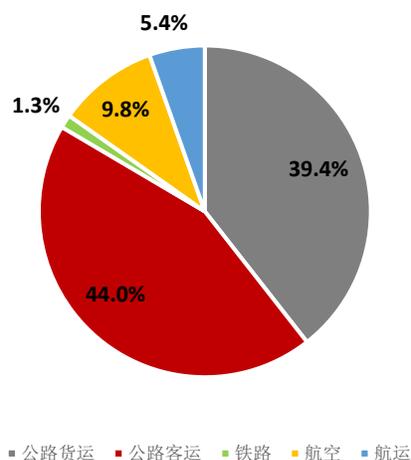


资料来源：中国银行研究院

（二）交通部门推广电动化、燃料电池和新型电力基建

中国交通运输部门中，公路交通二氧化碳排放占总量的 83.4%，其中公路客运、货运分别占 44%和 39.4%。航空、航运、铁路的碳排放占比分别为 9.8%、5.4%、1.3%（图 8）。

图 8：各类交通运输方式碳排放量占比



资料来源：中金公司研究部

公路运输需要推广新能源电动车和燃料电池技术，完善充电、换电、智能路网等公路基础设施建设。当前，新能源汽车销售渗透率¹⁰已经达到 28%（图 9），其中纯电动车占比达到了 80%左右（图 10）。工信部《新能源车汽车产业发展规划》和中国汽车工程学会《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》分别提出，中国新能源新车销售量到 2025 年和 2035 年分别达到新车销售总量的 20%和 50%，2035 年纯电动汽车将占新能源汽车 95%以上。未来公路运输领域的电气化转型方向，一是乘用车领域需要提升新能源电动渗透率，直至完全替代燃油车，实现“零碳排”。目前乘用车电动技术主要分为纯电动和混动技术。混动技术为“发动机+发电机”双驱动模式，仍保留了部分化石燃料需求。未来随着动力电池技术解决里程和充电难题后，纯电动车将完全占有乘用车市场。二是商用车将采取电动和氢能燃料电池并用的路线。商用车对载重和里程的要求比乘用车更高，动力电池无法完全满足其行驶需求。重型卡车可以使用能量密度高且清洁低碳的氢能燃料电池供能，中轻微型卡车可以主要使用动力电池驱动。三是不断完善电气化公路基础设施建设。未来需要加大充电桩、换电站等公共基础设施建设投资力度，构建数字化、智能化路网管理系统，高效指挥城市道路交通，合理匹配客货运输商用车的供需。

图 9：新能源汽车销售渗透率

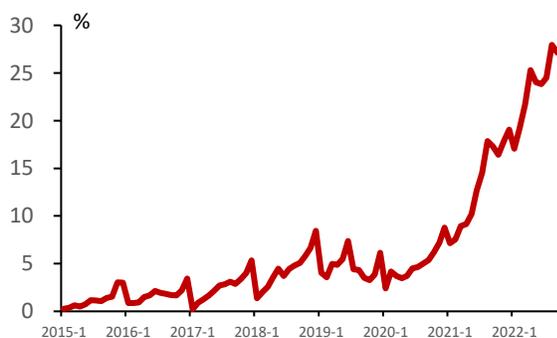
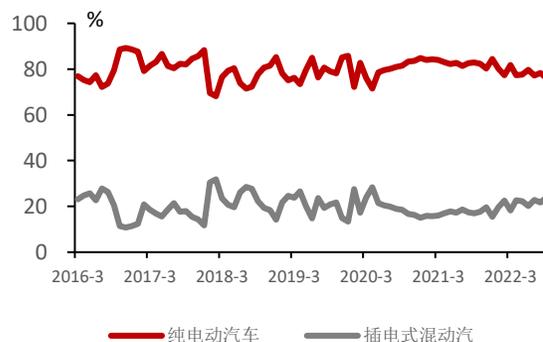


图 10：纯电动和插电式混动汽车销售占比



资料来源：Wind，中国银行研究院

铁路交通将进一步提高电气化水平，助力优化陆路交通运输结构。过去十年中，中国高铁、动车等轨道交通发展迅速，新建铁路交通基本实现电气化。2020 年，中国

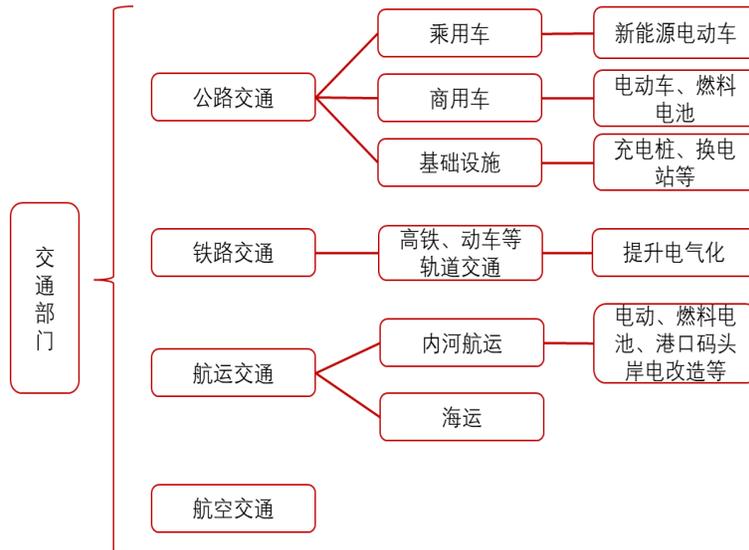
¹⁰ 新能源汽车销售渗透率=新能源汽车销售量/汽车销售量。

铁路电气化率达到了 74.9%，较 2005 年提高了 44.9 个百分点，高于国际平均水平。未来随着新建电气铁路工程不断竣工，中国铁路交通能够实现完全电气化。此外，在大宗货物和长距离运输由公路转向铁路的运输结构优化调整策略下，铁路电气化发展有利于推动陆路交通进一步降低整体碳排放。

航运交通可实现部分电动化，港口码头电气化水平将不断提高。航运交通可分为内河航运、沿岸航运以及海运几个部分。内河航运由于运距较短，适宜推广电动化和燃料电池技术。《绿色交通“十四五”发展规划》提出因地制宜推动电动旅游客船应用，加快现有营运船舶受电设施改造和码头岸电设施改造。沿岸航运以及海运需要探索突破氨和氢等清洁燃料替代传统化石燃料的技术，以满足长距离运输需求。

航空交通电动化改造难度较大。航空运输具有能耗大、运输距离长以及中途充能较难的特点，对传统化石燃料的依赖性强。目前生物质能、氢能用作清洁燃料的实用性尚处于探索阶段，动力电池能量密度至少需要提高 6-8 倍才可能达到起飞的最大重量标准，尚缺乏实现空运电动化的切实路径。

图 11：交通部门各领域电气化路径



资料来源：中国银行研究院

（三）建筑部门运用电气设备解决日常用能需求，着力推动供暖方式低碳化转型

建筑部门的二氧化碳排放主要来自于保障建筑设施运行和生活需求的能耗。建筑部门的用能和碳排放大致可以分为集中供暖、城市住宅、农村住宅和商业公共建筑四个部分。城市住宅和商业公共建筑能耗中有70%左右为电力，剩余部分是用于分散采暖、炊事、热水的天然气、煤气等化石能源。集中供暖和农村住宅中分别有80%和60%左右的用能来源于煤炭等化石燃料。因此，集中供暖和农村住宅是发展电气化的重点部分。

集中供暖可使用热电联产¹¹以及工业余热等热源，结合热泵设备满足供暖需求。目前燃煤是集中供暖的主要方式，在供暖采热源中的占比为70%-80%。2020年北方城镇供暖能耗为2.8亿吨标准煤，二氧化碳排放量约为7.26亿吨。为减少集中燃煤供暖的碳排放量，可以利用火力、核能发电以及工业生产中的大量余热作为替代热源，运用热泵等电气设备将低品类热源集中转化为高品类热源，将热量传送至房屋建筑内供暖。核电余热结合热泵是较为可行的电气化供暖方式。一是核能既是清洁的可再生能源，也能提供有效热源。一方面，核电相较于其他可再生能源具有较强的供电稳定性。另一方面，沿海核电余热可满足沿海至腹地200-300公里范围内、近70亿平方米建筑冬季供热需求，约占中国北方城镇未来供热建筑总量的1/3。二是热泵配合发电余热能够有效降低碳排放。据测算¹²，当热泵的电力来自燃煤电厂和热电联产燃煤电厂时，热泵和火电结合供暖方式的二氧化碳排放量要比燃煤锅炉低30%-40%；当热泵的电力完全来自可再生能源时，可以实现零碳排放。

农村住宅需要推广绿色家电和光伏设备。农村住宅的碳排放主要来自于用炊事、采暖、热水的燃煤和烧柴。一方面，绿色家电能替代燃煤烧柴等方式满足农村用能。随着家电下乡政策持续推进，绿色智能家电在农村的渗透率将不断提高，进而减少农

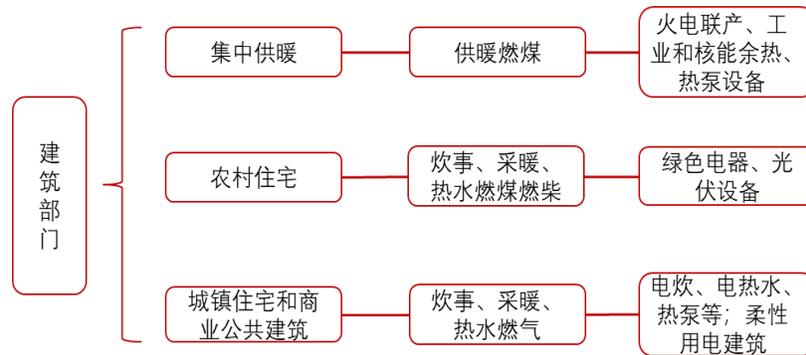
¹¹ 热电联产是指使用热机或发电站同时生产电力和热能。

¹² 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, 2021:277.

村住宅中化石燃料燃烧的碳排放。另一方面，光伏发电设备可为农村住宅供能。由于农村土地面积大、建筑高度低、房屋密度小、用电负荷轻，适合在屋顶及周边区域安装光伏设备，建立起相对分散的供电系统，支持农村住宅用电。

城镇住宅和商业公共建筑将实现全面电气化，逐步发展柔性用电建筑。城镇住宅和商业公共建筑中的电气化水平已经较高，剩余的二氧化碳排放来自于燃气炊事、热水和分散供暖。城镇住宅中可以逐步引导居民转变生活方式，使用电炊替代燃气做饭，采用电驱动热泵加热取代燃气烧水。城市商场、办公楼、酒店等建筑中可采用热泵、电蓄冷空调、蓄热电锅炉等电气设备替代燃气炉供暖。此外，公共建筑中可试点建设光伏建筑，在屋顶外墙区域配置光伏设备。着力开发以“光储直柔”¹³为特征的新型柔性用电建筑，增强建筑用电的可调节性和可中断性，提高建筑用电系统对太阳能、风能等间歇式供电方式的适应性。

图 12：建筑部门二氧化碳排放源和电气化路径



资料来源：中国银行研究院

三、政策建议

电气化发展是助力产业清洁低碳转型、经济社会绿色发展的重要方式之一。从主要产业部门电气化发展路径看，在电气设备改造、技术研发和基础设施建设等方面仍有较大提升空间，需要从政策、资金、技术以及基础配套设施等方面给予支持。

¹³ “光”是在建筑场地内建设分布式、一体化太阳能光伏系统，“储”是在供配电系统中配置储电装置，“直”是低压直流配电系统，“柔”是建筑用电具有可调节、可中断特性。

第一，不断完善各产业部门实施电气化改造的引导政策，提升经济社会碳减排动力。进一步细化对既有工业机械设备、交通基础设施、公共设施建筑等领域的电气化改造的引导和支持措施，通过财政、金融政策有针对性地引导社会资本关注产业领域电气化改建。各地区可以根据实际情况，因地制宜地通过资金奖励、贷款贴息、融资租赁补贴或无偿资助等方式，鼓励工业部门进行电锅炉、电窑炉以及热泵等生产设备改造升级。地方政府可以设立重点产业、园区电气化改造项目，加强国有企业、产业示范基地在电气化推广运用中的带动作用。继续积极落实促进绿色家电消费政策，鼓励城市居民以旧换新，推进绿色家电下乡，引导城乡居民购置低能耗低排放家用电器。

第二，支持电气化和减排固碳领域的技术研发创新。加大对电气化技术研发创新的支持，通过补贴、奖励等手段激励企业、高校和科研院所开展工业原料燃料、交通工具动力和建筑清洁用能等方面的电气化理论技术攻关，加大对电解制氢、高能量密度动力电池等新技术和新材料的研发投入。不断创新终端用户的电气能源消费方式。加大对碳捕获、利用和封存技术的研发力度，提高其实用性和商业性，使之成为主要的低成本碳减排手段。

第三，不断推进电气化基础设施建设。鼓励工厂、园区发展绿色低碳微电网建设，建设光伏、分散式风电等清洁能源设施。优化充电桩、换电站等陆路交通充电基础设施布局，推进电动汽车与智能电网间的能量和信息互动。推进港口岸电、空港陆电改造。推广新能源汽车在城市公交领域运用。在公共建筑领域试点建设光伏建筑，探索绿色低碳建筑柔性用电模式。

