

# 我国工业低碳转型的基础、 路径与政策

——历史述评与未来思考

李继峰 常纪文

**摘要** 我国实现碳达峰碳中和目标需要一场广泛而深刻的系统性变革。工业绿色低碳转型是统筹发展和减排的必由之路，任重道远。研究表明，我国自“十一五”规划期就高度重视工业节能，通过促进工业结构优化升级、制定技术标准和实施一系列政策和行动，取得显著的节能成效，主要高耗能行业碳强度均呈现持续下降态势。面向碳达峰碳中和要求，需在工业节能的基础上系统推进低碳转型。根据对已有研究的梳理，这意味着工业领域需要大力推进结构优化、节能技术进步、循环利用和能源低碳化。工业低碳转型目前面临材料工艺基础相对薄弱、企业主流商业模式不适应、技术创新仍存短板、法律法规标准不足、公正转型压力大等挑战，基于此，我国初步建立的工业低碳转型政策体系须有的放矢、形成合力。

**关键词** 工业 碳排放 能源 低碳转型 低碳政策 目标

[中图分类号] F062.9 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X (2023) 02-0056-16

## 一、引言

2020年9月22日，国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布：“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，力争2030年

【基金项目】国家电网有限公司总部管理科技项目“考虑省间碳排放转移的多区域协同减排模拟关键技术研究及应用”（批准号：1400-202357320A-1-1-ZN）。

【作者简介】李继峰，国务院发展研究中心资源与环境政策研究所研究员，邮政编码：100010；常纪文，国务院发展研究中心资源与环境政策研究所研究员、副所长，本文通讯作者，邮政编码：100010。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

前二氧化碳排放达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”，展现了我国负责任大国风范。<sup>①</sup> 不过，实现“双碳”目标需要一场广泛而深刻的系统性变革，不是轻轻松松就能达成的。为此，习近平总书记明确指出“要正确认识和把握碳达峰碳中和”，“绿色低碳发展是经济社会发展全面转型的复杂工程和长期任务。实现碳达峰碳中和目标要坚定不移，但不可能毕其功于一役，要坚持稳中求进，逐步实现。”实现碳中和必将给我国的能源系统、国民经济各产业、社会的生产和消费体系带来深刻的变革。<sup>②</sup>

党的二十大报告擘画了未来以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的宏伟蓝图，作出了到本世纪中叶全面建成社会主义现代化强国的“两步走”战略安排。其中，构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局的过程中，工业无疑将长期作为经济发展的支柱，工业占经济的比重有望长期保持在 30% 以上。因此推动工业绿色低碳转型是统筹发展和减排的必由之路，也任重道远。我国政府长期高度重视工业节能降碳工作，出台了系列政策，取得了显著成效。今后我国应以“双碳”目标为导向，坚定不移地推动工业低碳转型。

## 二、2005—2020 年我国工业减碳政策及其成效分析

### （一）2005—2020 年我国碳排放量和碳强度的走势

我国自 1992 年成为《联合国应对气候变化框架公约》缔约方以来，一直积极推进节能减排工作。特别是“十一五”规划首次提出“控制温室气体排放取得成效”的目标以来，我国取得了显著的碳减排效果。2021 年《中国应对气候变化的政策与行动》指出，2020 年我国碳强度比 2005 年下降 48.4%，超过了向国际社会承诺的 40%—45% 的目标，基本扭转了二氧化碳排放快速增长的局面。依据《第三次气候变化国家信息通报》《第二次气候变化两年更新报》中发布的 2005 年、2010 年、2014 年碳排放清单数据，以 2005 年能源活动碳排放 56.65 亿吨二氧化碳为基数，2015 年、2019 年、2020 年分别达 89.2 亿吨二氧化碳、94.7 亿吨二氧化碳、94.5 亿吨二氧化碳。2005—2020 年累计碳排放量预计达 1282 亿吨二氧化碳。

若碳强度始终保持在 2005 年水平，按照实际 GDP 增长速度，我国 2005—2020 年累计碳排放量达到约 1900 亿吨二氧化碳。这表明，通过积极推动产业结构优化、推进重点行业节能减排和努力发展清洁能源等措施，我国在 15 年里累计减排二氧

<sup>①</sup> 习近平：《习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话》，[http://www.qstheory.cn/yaowen/2020-09/22/c\\_1126527766.htm](http://www.qstheory.cn/yaowen/2020-09/22/c_1126527766.htm) [2023-04-29]。

<sup>②</sup> 习近平：《正确认识和把握我国发展重大理论和实践问题》，[http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2022-05/15/c\\_1128649331.htm](http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2022-05/15/c_1128649331.htm) [2023-04-29]。

化碳排放量达 617 亿吨，相当于减排 32.5%（李继峰等，2021）。其中，通过调整产业结构、提高能效等措施，实现的碳减排效果约为 567 亿吨二氧化碳，贡献率为 91.9%；而能源结构清洁化实现的碳减排效果为 50 亿吨二氧化碳，贡献率为 8.1%（见图 1）。

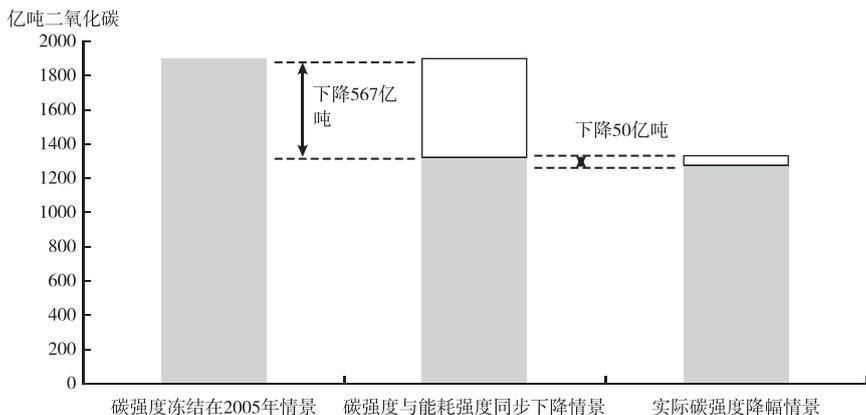


图 1 2005—2020 年累计二氧化碳排放量分析

资料来源：作者根据公开数据计算得到。

## （二）我国工业节能降碳政策发展情况

“十一五”规划提出了建设资源节约型与环境友好型社会、走新型工业化道路的目标。随着生态文明建设被纳入“五位一体”总体布局，国家发展战略和规划对工业绿色发展的要求逐步明确和深化。总的来看，我国 2005—2020 年采取了以下三方面的工业节能降碳政策措施。

一是促进工业结构优化升级的政策。自 2005 年《国务院关于发布实施〈促进产业结构调整暂行规定〉的决定》（国发〔2005〕40 号）以来，我国持续出台大量政策，优化调整工业结构，淘汰高耗能落后产能，持续推动工业结构优化升级。2005 年起，国家连续更新发布《产业结构调整指导目录》，明确鼓励类、限制类和淘汰类行业目录。目前的最新版是 2021 年发布的第五版。2018 年，国家统计局开始发布《战略性新兴产业分类》，2019 年起国家发展改革委发布《绿色产业指导目录》。相关部门以这些引导目录为基础，出台投融资、财税等支持政策，有效引导了产业投资流向。

二是完善工业节能减排及绿色发展技术标准。2008 年以来，国家陆续制定了单位产品能源消耗限额标准，覆盖钢铁、煤炭、电力、石化、有色、建材和通用标准共七大类，针对每类产品生产都提出了能耗限额的限定值、准入值和先进值三个标准。根据 2023 年国家发展改革委、市场监管总局发布的《关于进一步加强节能标准更新升级和应用实施的通知》（发改环资规〔2023〕269 号），我国已发布实施强制性能

耗限额国家标准 108 项、强制性能效国家标准 66 项、推荐性节能国家标准 190 项，基本建立节能标准体系，为依法加快各行业节能工作提供了有力支撑。

三是制定一系列节能减排政策，开展系列行动。国务院 2015 年发布的《中国制造 2025》中，将“全面推行绿色制造”作为九项战略重点工作之一，包括绿色制造工程、绿色产品推广和工业资源循环利用等。截至 2020 年，我国建设了 2121 家绿色工厂、171 家绿色工业园区、189 家绿色供应链企业；累计推广 2 万多种绿色产品，4000 多种节能节水和资源综合利用工艺技术装备，环保装备制造业总产值年复合增长率超过 10%；建设了一批示范效应显著的工业资源综合利用基地，一般工业固废的综合利用率达到 55.4%，再生资源回收利用量约 3.8 亿吨<sup>①</sup>。

### （三）我国工业碳减排效果分析

为客观反映上述工业节能降碳政策的实施情况，本研究从分行业碳排放量和碳强度走势两个指标评估工业减排效果。分析的数据主要来源于 1990—2021 年《中国能源统计年鉴》和 1992—2020 年《中国投入产出表》。根据我国历年能源统计年鉴，我们收集了 1995 年以来 25 个工业部门的分行业分品种能源消费数据。参考已有研究中的碳排放核算方法（刘竹等，2018）开展分行业碳排放核算。工业部门包括了电力部门，发电用煤、天然气产生的二氧化碳排放都归入电力部门。为避免重复计算，其他行业的碳排放仅考虑煤炭、油品、天然气等消费，即主要计算各部门生产过程的直接碳排放。

为计算各行业碳强度走势，我们使用投入产出表中的细分行业增加值数据。我国已公开的 2000 年之后的投入产出表主要包括 2000 年、2002 年、2005 年、2007 年、2010 年、2012 年、2015 年、2017 年、2020 年共 9 个年份。由于不同年份投入产出表的行业划分、投入产出表与能源能耗的分行业口径等都存在差异，本研究最终确定以 2020 年为基准，协调投入产出表口径与分行业能源消费口径，开展统一测算分析。使用年份为上述 9 个年份。根据测算，2000—2020 年工业分行业能源利用的碳排放及碳强度呈现如下走势。

一是工业部门始终是我国最主要的碳排放部门，特别是高耗能行业。测算表明，工业部门碳排放始终占我国能源碳排放的 80% 以上，特别是 2005 年后一直维持在 85% 左右，这主要是因为发电供热的碳排放比重持续扩大，从 2000 年占国家能源碳排放总量的 36% 提高到 2020 年的 44%。相比之下，制造业的直接碳排放比重基本稳定在 35%—40% 之间。前十大工业碳排放行业包括：发电供热、石油化工和炼焦、煤炭开采业、金属冶炼、化工、非金属矿物制品业、造纸印刷及文教体育用品业、石油天然气开采业、纺织品业、食品和烟草业。从碳排放趋势看，随着煤炭开采业煤矸石的利用水平提升，煤炭开采业的碳排放已经在 2010—2015 年达到

<sup>①</sup> 工业和信息化部：《“十四五”工业绿色发展规划》，<http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/03/5655701/files/4c8e11241e1046ec9159ab7dead9ed44.pdf> [2023-04-29]。

峰值，发电供热和石化炼焦业碳排放仍在上升，其他7个行业的碳排放水平则相对稳定（见图2）。

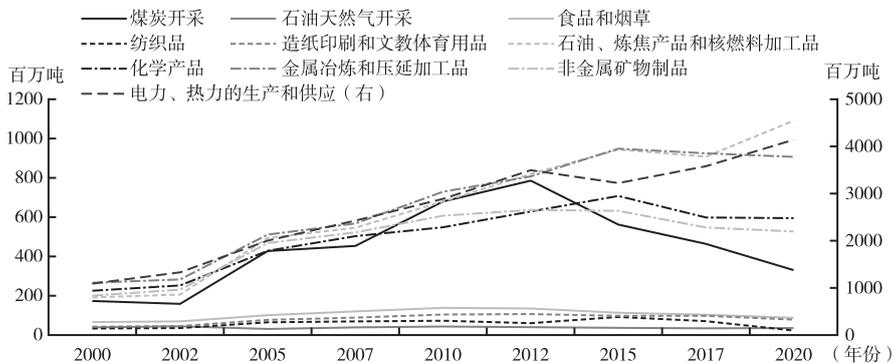


图2 2000—2020年分行业碳排放走势

资料来源：作者根据公开数据计算得到。

二是分行业碳强度走势明显分化。为开展行业碳强度的横向和纵向比较，在使用各年的投入产出表时，需要对分行业增加值进行价格处理。本研究中所有行业增加值的价格都统一到2020年。使用的价格指数为国家统计年鉴中公布的“工业生产者购进价格指数”。这个价格指数是从1989年开始公布的8类产品的连续价格指数，包括燃料动力、黑色金属材料、有色金属材料及电线、化工原料、木材纸浆、建材及非金属、农副产品、纺织原料。计算结果显示，不同行业的碳强度存在明显差异。2020年，发电供热和石化炼焦行业的碳强度最高，分别为 $17.2\text{tCO}_2/\text{万元}$ 和 $9.6\text{tCO}_2/\text{万元}$ ；另外，金属冶炼、煤炭开采、非金属矿物制品业、化工行业的碳强度分别为 $3.5\text{tCO}_2/\text{万元}$ 、 $3.9\text{tCO}_2/\text{万元}$ 、 $3.5\text{tCO}_2/\text{万元}$ 、 $2.0\text{tCO}_2/\text{万元}$ 、 $1.6\text{tCO}_2/\text{万元}$ ，均高于全国平均值（ $0.9\text{tCO}_2/\text{万元}$ ），剩余大部分行业则明显低于全国碳强度均值。纵向比较而言，2000年以来中国大部分行业大部分时间的碳强度都呈下降趋势，2020年部分行业碳强度较2000年下降80%，发电供热和石油天然气开采业的降幅也有60%（见图3）。不过，2002年我国加入WTO后的一段时间内，也出现部分行业碳强度不降反升的现象。

三是发电供热行业碳强度波动态势明显。碳强度从1995年到2002年持续下降，但2002—2012年不断上升，2012年后进入稳定下降的新阶段。2002—2012年，我国燃煤发电装机快速增长，机组平均发电煤耗持续下降，从2000年的392克标煤/千瓦时，下降到2012年的325克标煤/千瓦时，但煤价市场化导致的燃料价格上升，及非化石能源快速发展导致的电力行业运行成本上升等综合因素，使得电力行业盈利能力下降。具体分析，电力行业新旧技术转换与燃料价格上升导致的电力行业盈利能力下降，是其碳强度不降反升的主要原因。2012年后，我国加大环境污染治理，煤炭产

能过剩问题逐渐突出，煤价受到市场压制，加上可再生能源发电成本快速下降，电力行业碳强度稳步下降。

四是石化及炼焦行业碳强度下降呈现先缓后快的态势。虽然在能源统计里面，石油炼化和煤炭炼焦分属两个行业，但在投入产出表中，两个行业作为能源加工转换行业合并在一起。2000—2002年受国内需求和出口的共同拉动，我国进入高速增长期。房地产加速发展，基础设施建设持续推进，使得我国炼钢产业对焦炭的需求持续加大，炼焦规模持续扩大，减缓了石化及炼焦行业碳强度的下降速度。此后，随着技术进步及落后产能淘汰，石化炼焦行业的碳强度稳步下降，2020年碳强度较2000年下降76%。

五是化工、冶金、建材、造纸业等高排放行业的碳强度总体呈现稳步下降态势。综合来看，2005年以来工业节能降碳政策措施有效推动各行业碳强度的持续下降，形成了良好的政策环境，培育了工业企业节能降碳的良好意识，取得了显著降碳效果。同时，从近年来大部分高排放行业碳强度降幅趋缓的态势，也反映其节能降碳潜力边际下降，未来工业降碳需要新思路和新举措。

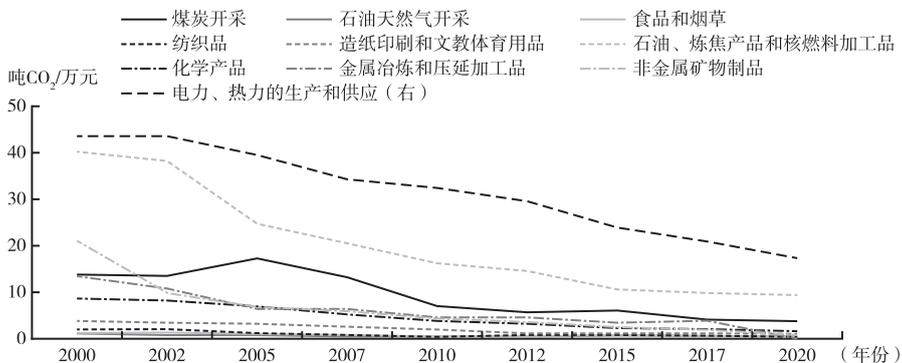


图3 2000—2020年分行业碳排放强度走势

资料来源：作者根据公开数据计算得到。

### 三、2020—2030年碳达峰目标下我国工业低碳转型的路径

工业低碳转型正在成为全球实现碳中和的重要途径。2019年，欧盟发布以全面低碳转型为目标的《欧洲绿色新政》，明确了包括面向清洁生产、循环经济的工业战略在内的8项重点任务。日本在《2050年碳中和绿色增长战略》中提出促进产业结构和经济社会变革的14个重点领域节能减碳方案，其中也包括海上风电设备制造、氢能装备、碳循环产业、资源循环利用等绿色低碳制造业的发展。在我国，新能源发展是实现“双碳”目标的重要途径。2020年至2030年我国将初步进入高

比例可再生能源发电阶段，到2030年，我国电源装机规模将达到35亿—40亿千瓦，可再生能源发电装机占比达到57%，其中风电和光伏发电等波动性新能源发电装机占比达到44%。由于未来可再生能源的迅猛发展，风光发电产业的就业岗位将会迅速增长，2030年就业人数有望比当前翻一番，达到200万—250万人（国网能源研究院有限公司，2021）。

顺应国际低碳转型趋势，推行工业低碳转型有望成为我国统筹发展与减排的重要途径。近年来，我国新能源装备制造产业快速发展，特别是在数字化技术的支持下，有望在助力减碳的同时，还成为新的经济增长点。其一，光伏全产业链已具有国际竞争优势。光伏产业形成了从上游原材料采集加工、中游电池片组件制造以及下游光伏电站建设运营的全球最完善的产业链，已成为可同步参与国际竞争并在产业化方面取得领先优势的产业。其二，风机产业达到国际先进水平。我国已建成全球最大的风电装备生产基地，产量占全球的三分之二以上，建成了涵盖风电开发建设、设备制造、技术研发、检测认证、配套服务的成熟产业链。我国风电技术水平也在不断提高，基本掌握了关键核心技术，并且在适合低风速风况和恶劣环境风电机组开发方面取得了突破性进展，在大容量机组开发方面基本实现了与世界同步。风机产品国产化程度达到90%以上，风能利用效率显著提高，风机产业科技创新进入高度活跃的快速发展期。其三，新能源汽车产业具有“先手优势”。目前我国新能源汽车产量占全球60%，是全球最大出口国，建立了全球最高效完备的产业链供应链体系。我国在售的新能源汽车车型超过300款、占全球的2/3，本土品牌占据国内电动汽车市场81%的份额。我国新能源汽车产业在电池、电控和电驱三大领域均达到了世界先进水平，在自动驾驶、智能网联等领域的技术创新、模式创新具有扎实的技术积累（袁志逸等，2021）。其四，电子信息技术和新能源需求融合创新产生并快速发展。通过先进通信技术、人工智能、工业互联网等新一代信息技术改造传统产业工艺流程，优化能源调度和精准实施梯级利用，可在促进工业节能上展现出巨大潜力。根据中国信息通信研究院的研究，到2030年，数字技术将赋能全社会减碳12%—22%，赋能各行业减碳10%—40%。<sup>①</sup>

综合来看，随着新能源装备、新能源汽车等工业产品的快速发展和对能源结构清洁化的推动，以及信息通信技术带来的传统产业升级，我国工业低碳转型前景广阔，在有效支撑经济增长的同时，传统工业产业的低碳化发展趋势更加明朗。通过梳理已公开发表的研究，2030年工业用能预计在28.2亿—31.5亿吨标煤，工业碳排放在2030年前达峰（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，2021；谢伏瞻、庄国泰，2021）。

以钢铁行业为例，2020年钢铁产量达到10.65亿吨，大量研究结论且被普遍认

<sup>①</sup> 中国信息通信研究院（2021）：《数字碳中和白皮书》，<http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/lbps/202112/P020211220632111694171.pdf> [2023-04-29]。

可的判断是，我国粗钢产量未来还将增长，但增量有限，达峰后将呈现稳步下降的趋势（李晋等，2022）。包括耗能碳排放和工业过程碳排放在内的钢铁行业二氧化碳排放量在2020年达17.7亿吨，随着电炉钢比重的提升和传统炼钢技术的低碳化发展，预计碳排放会在达峰后稳步下降，到2030年降至15亿吨左右（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，2021）。影响钢铁行业碳排放的因素主要包括建筑用钢的减量、机械装备用钢的增量、钢铁生产工艺的改进、钢铁生产流程的转换、电力碳强度的下降五个方面（李晋等，2022）。

以水泥行业为例，2014年前水泥产量达到24.92亿吨的峰值后，出现高位小幅波动，2023年达到23.8亿吨。水泥行业碳排放（包括燃料消耗产生的直接碳排放、工艺过程碳排放和耗电产生的间接碳排放）峰值出现于2016年，峰值为14.6亿吨，2020年已降至13.5亿吨二氧化碳。综合考虑水泥需求减量、生产工艺改进和电力碳强度的下降等因素，2030年前水泥行业碳排放有望持续下降，到2030年降至7.5亿—9亿吨（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，2021）。未来水泥行业仍需加快低效产能退出，严禁新增水泥熟料、平板玻璃产能，引导建材行业向轻型化、集约化、制品化转型。

以石化行业为例，2020年我国原油消费量6.5亿吨，包括原油加工、乙烯和PX等基础化工原料加工在内的碳排放量约4.7亿吨（按炼油化工行业的口径，包括加工过程中燃料消耗产生的直接碳排放、消耗电力产生的间接碳排放和化学反应过程碳排放）。预计到2030年前原油需求达峰，通过产业结构调整、节能降耗以及深度电气化、轻质原料替代，并结合发展绿氢、CCUS等措施，石化行业可能在2025—2030年之间实现碳达峰，碳排放峰值不超过5亿吨（油控研究项目课题组，2022）。炼油化工产业减碳将主要从以下三个方面入手：一是加大淘汰落后炼油产能，二是加快促进废塑料的闭环循环利用，三是加大力度充分利用可再生能源。

根据对我国钢铁、建材、石化产业减排路径的分析，这些高耗能行业未来的减排路径不仅包括继续加强节能降耗，还包括充分利用经济结构优化、循环利用等低碳转型措施。同时，还需要大力发展新能源产业，推动整个能源产业低碳转型，以低碳能源助力传统工业降碳。

## 四、面向2030年碳达峰的工业低碳转型政策及其分析

习近平主席宣布中国碳达峰碳中和目标以后，我国陆续出台了一些工业低碳转型政策文件，制定了一些包括低碳转型的法律法规，明确提出要“深入实施智能制造和绿色制造工程，推动制造业高端化智能化绿色化”，同时也建议面向未来产业变革方向，“打造战略性全局性产业链”“培育壮大产业发展新动能”。我国未来工业低碳

转型的政策体系和法律法规体系正在逐步完善。

### (一) 我国推进工业低碳转型的战略规划、政策和法律法规

2021年以来,以碳达峰碳中和为战略导向,我国健全顶层设计,加强专业指导,使工业低碳转型战略、政策和法律法规体系快速完善(见表1)。

表1 2021年以来我国工业绿色发展的主要政策文件

序号	发布时间	名称	文号
1	2021年02月02日	关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见	国发〔2021〕4号
2	2021年09月03日	关于加强产融合作推动工业绿色发展的指导意见	工信部联财〔2021〕159号
3	2021年11月15日	“十四五”工业绿色发展规划	工信部规〔2021〕178号
4	2021年11月30日	贯彻落实碳达峰碳中和目标要求推动数据中心和5G等新型基础设施绿色高质量发展实施方案	发改高技〔2021〕1742号
5	2021年12月21日	“十四五”原材料工业发展规划	工信部联规〔2021〕212号
6	2021年12月31日	智能光伏产业创新发展行动计划(2021—2025年)	工信部联电子〔2021〕226号
7	2022年01月13日	环保装备制造业高质量发展行动计划(2022—2025年)	工信部联节〔2021〕237号
8	2022年01月15日	关于公布2021年度绿色制造名单的通知	工信厅节函〔2022〕7号
9	2022年01月20日	关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见	工信部联原〔2022〕6号
10	2022年01月27日	关于加快推动工业资源综合利用的实施方案	工信部联节〔2022〕9号
11	2022年06月23日	工业能效提升行动计划	工信部联节〔2022〕76号
12	2022年07月07日	工业领域碳达峰实施方案	工信部联节〔2022〕88号
13	2022年08月22日	信息通信行业绿色低碳发展行动计划(2022—2025年)	工信部联通信〔2022〕103号
14	2022年08月24日	加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划	工信部联重装〔2022〕105号
15	2023年01月17日	关于推动能源电子产业发展的指导意见	工信部联电子〔2022〕181号

资料来源:作者整理。

在工业低碳转型战略方面,2021年国务院出台《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》,首次从产品生产到消费的全链条出发,提出绿色低碳循环发展经济体系的建设思路,聚焦生产、流通、消费、基础设施、绿色技术、法律法规政策六方面,系统性提出“绿色规划、绿色设计、绿色投资、绿色建设、绿色生产、绿色流通、绿色生活、绿色消费”要求。这是从产业发展的客观规律入手,明确了建立健全绿色低碳循环发展经济体系的内在逻辑。《“十四五”工业绿色发展规划》则以实现碳达峰碳中和目标为要求,进一步强化了“深入实施绿色制造,加快产业结构优化升级,大力推进工业节能降碳,全面提高资源利用效率,积极推行清洁生产改造,提升绿色低碳技术、绿色产品、服务供给能力”等任务。《工业领域碳达峰实施方案》在上文基础上,进一步突出了实施路径,提出了“以重点行业达峰为突破,着力构建绿色制造体系,提高资源能源利用效率,推动数字化智能化绿色化融合,扩大绿色低碳产品供给”等要求。

在政策保障方面,我国重点耗能行业分领域已建立健全碳减排的一些相关政策。这些政策包括钢铁、建材、石化化工、有色金属等重点行业的碳达峰实施方案。面向

更广泛的工业绿色转型和低碳发展，我国发布了《智能光伏产业创新发展行动计划》《环保装备制造业高质量发展行动计划》《工业水效提升行动计划》《工业能效提升行动计划》《信息通信行业绿色低碳发展行动计划》《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》等专项行动计划；发布了《关于加强产融合作推动工业绿色发展的指导意见》，规定了金融领域支持工业绿色发展的重点工作任务；出台了《关于推动能源电子产业发展的指导意见》，明确培育能源电子产业生态，推动能源电子产业发展。

在法制保障方面，2020年以来，我国修订了《固体废弃物污染环境防治法》等生态环境保护专门法律法规，对低碳发展作了相关规定，如《固体废弃物污染环境防治法》第3条要求国家推行绿色发展方式，促进清洁生产和循环经济发展。在区域和流域保护专门法律方面，我国于2020年12月出台了《长江保护法》，于2022年12月出台了《黄河保护法》，于2023年4月出台了《青藏高原生态保护法》。这些法律规定，为政策、标准和行动计划的实施奠定了法制基础。

从上述工业绿色发展、低碳转型的规划、政策、法律法规来看，我国高度重视产业发展与碳减排的有机统一，重点体现在以下六个方面：以调整产业布局、遏制高耗能项目盲目发展、优化重点产业规模和促进产业低碳协同为重点，深度调整产业结构；以调整工业用能结构、加快工业微电网建设、实施降碳节能改造、加强监管等方式，深入推进节能降碳；以打造绿色工厂、构建绿色低碳供应链、打造绿色低碳工业园区、培育绿色低碳发展评价及清洁生产审核与评价等生产性服务为重点，积极推行绿色制造；以推动低碳原料替代、加强再生资源循环利用、机电产品再制造和工业固废综合利用等方式，大力发展循环经济；以部署前沿技术研究、推广低碳技术和开展试点示范为手段，加快工业绿色低碳技术变革；以推动新一代信息技术与制造业深度融合为方向、建立数字化碳管理体系和“工业互联网+绿色低碳”等为方向，主动推进工业领域数字化转型。

## （二）现有政策目标与相应政策措施分析

### 1. 现有政策提出了五个方面的量化目标

一是碳减排控制目标。包括单位工业增加值二氧化碳排放降低18%，钢铁、有色金属、建材等重点行业碳排放总量控制取得阶段性成果。

二是污染物排放控制目标。包括有害物质源头管控能力持续加强，清洁生产水平显著提高，重点行业主要污染物排放强度降低10%；完成5.3亿吨钢铁产能超低排放改造、4.6亿吨焦化产能清洁生产改造、4000台左右有色金属窑炉清洁生产改造。

三是能效提升目标。包括重点行业资源产出率持续提升；规模以上工业单位增加值能耗降低13.5%，粗钢、水泥、乙烯等重点工业产品单耗达到世界先进水平；单位信息流量综合能耗比“十三五”期末下降20%；2025年新增高效节能电机和变压器的占比分别达到70%和80%以上。

四是循环综合利用率目标。包括大宗工业固废综合利用率达到57%，2030年进一步提升至62%；冶炼渣（不含赤泥）、工业副产石膏综合利用率分别达到73%、

73%；主要再生资源回收利用量达到4.8亿吨，力争废钢、废纸、废有色金属回收利用量分别达到3.2亿吨、6000万吨、2000万吨，其中，再生铜、再生铝、再生铅产量分别达到400万吨、1150万吨、290万吨；建成较为完善的动力电池回收利用体系；培育50家再制造解决方案供应商。

五是绿色制造体系建设目标。包括重点行业和重点区域绿色制造体系基本建成，创建一批生态（绿色）设计示范企业，推广万种绿色产品；绿色环保产业产值达到11万亿元，其中环保装备制造业产值力争达到1.3万亿元。

## 2. 现有政策文件中明确的主要政策措施

一是行政性监督管理措施。在节能方面，对新建项目开展能源评估审查、周期性的节能监督检查、节能监察执法和节能审计。未来将进一步强化和规范化这些手段的应用，扩展监管范围，创新监管方式，如探索开展跨地区节能监察等。在绿色制造领域，开展绿色设计评价，工业固体废物资源综合利用评价，绿色产品开展绿色认证和星级评价，强化有害物质管控的强制性标准约束等，推动建立部门联动的监管机制。此外，现有政策还将推动面向中小企业需求的绿色低碳发展评价、企业清洁生产审核和评价认证服务等第三方认证与咨询服务工作，对第三方社会评价机构依法依规开展监督管理。

二是推进标杆引领和试点示范。针对多个领域建立标杆引领或试点示范工程，包括节能低碳领域的“超级能效”和“零碳”工厂，工业废水循环利用试点示范，循环回收领域的再生资源回收利用企业名单、工业资源综合利用基地和工业资源综合利用“领跑者”企业，绿色制造领域的专精特新“小巨人”企业和制造业单项冠军企业、取得突破的低碳零碳负碳关键技术开展产业化示范应用等。针对区域布局，也规定了试点示范措施，如高水平建设长三角生态绿色一体化发展示范区、大湾区“清洁生产伙伴计划”等。

三是夯实基础能力的措施。包括加强各领域的技术标准、评估评价、统计检测评估核算方法、审计培训、信息系统和数据库建设，如推动绿色设计评价标准，制定、修订一批低碳、节能、节水、资源综合利用等重点领域标准及关键工艺技术装备标准，推进绿色设计、产品碳足迹、绿色制造、新能源、新能源汽车等重点领域标准国际化工作；建设重点工业产品碳排放基础数据库、覆盖产业链上下游的有害物质数据库、产品全生命周期绿色低碳基础数据平台、绿色制造公共服务平台等；积极培育碳排放核算专业化机构和生产性服务业，建设一批制造业创新中心、产业创新中心、工程研究中心、技术创新中心等支持产业发展的基础设施。

## （三）现有政策中工业低碳转型路径的分析

### 1. 全面调整或者优化工业结构和布局

梳理已有的工业低碳转型政策，可以发现，调整或者优化工业结构是工业低碳转型的重要路径。我国将主要从推动绿色新产业的发展和推进传统产业升级两方面推进工业结构调整（见表2）。

表2 工业绿色发展政策中鼓励和限制的产业类别

总体方向	产业类别
鼓励	新能源、新材料、新能源汽车、绿色智能船舶、绿色环保、高端装备、能源电子等
限制	控制钢铁、水泥、平板玻璃、电解铝、石化化工(尿素、磷铵、电石、烧碱、黄磷)等产能,加快钢铁、有色金属、石化化工、建材、纺织、轻工、机械等实施绿色化升级改造

资料来源：作者整理。

在促进绿色新产业发展方面，具体包括三方面的路径。其一，加大绿色低碳产品和低碳环保装备的供给，包括新能源汽车、光伏光热产品、绿色建材等低碳产品；绿色消费类电器电子产品和节能、节水、高效、安全的绿色智能家电等消费品；高效加热、余能利用的工业节能装备；污水、烟气、固废处理等工业环保装备；源头分类、过程管控、末端治理等工艺装备；生物质供能和农膜污染治理等农村节能环保装备等。其二，打造绿色消费场景。例如，推动电商平台设立绿色低碳产品销售专区，鼓励企业组织开展绿色低碳相关公众开放日活动等，鼓励地方采取补贴、积分奖励等方式促进绿色消费，引导建立绿色生产消费模式。其三，发展绿色低碳服务产业。培育绿色制造、低碳发展、数字孪生、第三方认证评估等领域的服务产业，提供咨询、计量、监测、过程管理、分析、评估、检验、认证、审计、培训等类型的服务。

在促进传统行业的绿色化和高端化升级方面，具体包括两方面的路径。其一，继续淘汰落后产能。对于高耗能、高排放且产能过剩的行业，通过加强能效设计要求、严控产能和落实能耗“双控”等方式，坚决遏制其盲目发展。其二，鼓励部分高耗能产业，如电解铝、工业硅等，转移至可再生能源富集、资源环境承载力强的地区，提升绿色能源资源的供给能力，引导生态脆弱地区发展与资源环境适宜的特色产业和生态产业。

## 2. 节约和循环利用两手抓，促进工业能效提升

通过科技创新推进节能工作并强化循环利用，是对传统工业低碳转型路径的深化和延展，具体措施包括以下三方面。

一是继续深度改善工艺流程，加强原有产业的节能降碳改造升级。具体措施包括加快重点用能行业的节能技术装备创新和应用，提升工业窑炉、锅炉、电机、泵、风机、压缩机等重点设备的能效水平，降低数据中心、移动基站功耗；利用大数据、人工智能等技术优化典型工艺流程，加强高温和中低温的余能回收利用等，探索尾矿、粉煤灰、煤矸石、冶炼渣、工业副产石膏、赤泥、化工渣等大宗工业固废规模化综合利用，强化企业、园区、产业集群之间资源的循环链接，提高综合资源利用效率。

二是提高循环综合利用水平。全面推进再生资源的循环利用，包括废钢铁、废有色金属、废塑料、废旧轮胎、废纸、废弃电器电子产品、废旧动力电池、废油、废旧纺织品等；高价值废弃物资源进口也逐步放开；不断培育、提升再生资源的加工处理工艺水平，改变“小作坊”模式，形成规模化、技术化的再生资源加工处理产业，补齐短板。

三是用好数字化手段，加强对再生资源全生命周期数据的智能化采集、管理与应

用；支持采用物联网、大数据等信息化手段开展信息采集、数据分析、流向监测、财务管理，推广“工业互联网+再生资源回收利用”新模式。大力发展高端智能再制造；重点发展工程机械、重型机床、内燃机等再制造装备。

### 3. 加强完善绿色制造体系

全方位改变传统制造业运用模式，可打造可持续的工业低碳转型路径。具体措施包括建设绿色工厂，开展绿色制造技术创新及集成应用；打造绿色园区，通过“横向耦合、纵向延伸”，构建园区内绿色低碳产业链条，促进园区内企业采用能源资源综合利用的生产模式；构建绿色供应链，支持龙头企业在供应链整合、创新低碳管理等关键领域发挥引领作用，将绿色低碳理念贯穿于产品设计、原料采购、生产、运输、储存、使用、回收处理的全过程，形成贯通绿色供应链管理体系，最终实现绿色产品的充足供应。

## 五、2020—2030年深化我国工业低碳转型工作的改革建议

### （一）我国深化工业低碳转型工作面临的挑战

尽管我国既有的节能降耗工作基础比较扎实，已出台的工业低碳转型政策文件覆盖范围比较广泛，但目前我国工业低碳转型仍面临着材料工艺基础相对薄弱、企业主流商业模式不适应、技术创新仍存短板、法律及标准缺乏和公正转型压力大等挑战。这些都是我国未来工业低碳转型过程中需高度重视解决的事项。

一是我国工程材料工艺基础相对薄弱，深度改善工艺流程和开展绿色设计面临一些挑战。目前绿色低碳材料在快消品、包装等领域的应用快速增加，但是在工程领域的替代仍然缓慢。发达国家二百余年的工业化进程，积累了大量关于原料性能、工艺流程、关键参数选择方面的基础理论和经验知识。如电动汽车发展过程中，需要使用全铝车身尽量替代钢架结构，以大幅减轻车重来提高续航里程。但不同部位对防撞强度、抗疲劳性能等要求各异，需要选用性能最匹配的铝材，而且还需要考虑到铝材在加工变形过程中的性能变化。目前我国车企使用的铝材仍主要来自进口，国内尚不能满足需要（王祝堂，2022）。究其原因我国工业企业对原材料认知的积累相对不足，未来需高度重视其对未来工业低碳转型的影响。

二是企业商业模式仍以降低成本为主，企业加大创新及创造绿色新产品面临挑战。低成本一直是我国产品国际竞争优势的主要来源，久而久之，大部分市场主体都把千方百计降低成本作为提升企业竞争力的主要方向。然而，市场主体过于强化“降本增效”的经营策略，产品利润率过低，则限制了低碳转型的潜力。在没有行政手段的干预下，面向终端市场的企业，即使是只少量抬升成本的低碳转型方案也难以付诸实施。为下游企业提供原材料、零配件的中游企业，也为了降低产品成本倾向于选择“面向库存”的规模化生产模式，而不会选择“面向订单”的精细化生产模式。单纯倚靠市场机制而忽视政府引导的作用，我国市场主体难以全面、有效推进工业低碳转型。

三是原创技术和关键设备仍大量依赖国外，低碳科技创新面临多方挑战。我国已

高度重视先进可再生能源、安全高效核能、绿色高效化石能源开发利用、能源数字化智能化的技术研发，但在推动传统高耗能行业的转型升级、战略新兴产业的加快发展、构建清洁低碳安全高效能源体系方面，仍存在大量技术短板。《“十四五”能源领域科技创新规划》指出，一是关键零部件、专用软件、核心材料等大量依赖国外，二是能源领域原创性、引领性、颠覆性技术偏少。唯有持续加大有效科技投入，才能促使工业低碳转型蓬勃发展。

四是法规和标准严重缺乏，阻碍了转型的规范化、制度化和程序化。在碳达峰碳中和立法中，目前我国出台了《碳排放权交易管理办法（试行）》《企业温室气体排放报告核查指南（试行）》《企业环境信息依法披露管理办法》等与碳交易有关的少量规章或者部门规范性文件，不仅缺乏工业低碳转型的专门法律法规，法律法规中关于碳达峰碳中和或者低碳发展的具体规范还严重不足。在标准方面，碳达峰碳中和标准体系包括基础通用标准子体系、碳减排标准子体系、碳清除标准子体系和市场化机制标准子体系，并进一步细分为15个二级子体系、63个三级子体系。目前，碳清除标准子体系和市场化机制标准子体系还很不健全，主要行业碳核算核查标准尚未实现全覆盖。为此，2022年，市场监管总局等九部门联合印发《建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》；2023年，国家标准委等部门发布《碳达峰碳中和标准体系建设指南》，但是标准体系的建立健全尚需一定时间。

五是传统涉煤行业体量庞大，低碳转型面临社会影响复杂度高的挑战。目前，我国的工业体系建立在以煤为主体的能源系统之上。煤炭开采、运输和加工转换体系构成了我国保障能源和电力系统安全运行的基础。煤炭的退出，这些既有基础设施会成为沉默成本。若没有相应措施，无疑会增加全社会用能成本上升的风险，特别是煤炭资源型城市难以及时培育新的经济增长点，可能面临经济衰退风险。因此，在替代煤炭的过程中，如何实现相关产业和就业人员的平稳转型，促进社会稳定，仍面临艰巨挑战。

## （二）深入开展我国工业低碳转型的政策建议

一是加快推进工程材料的绿色转型。工业绿色转型需要推动更多绿色低碳材料对传统材料的替代。为弥补我国对于材料性能研究积累不足的缺陷，我国可更好利用大数据、人工智能等技术，以少量的实测数据为基础，通过计算机仿真等做法，完成对各类工程材料的各种工艺性能的模拟。为此，建议加大对相关材料性能大数据分析、计算机仿真工作的政策支持，为工程材料的绿色转型打下坚实基础。

二是利用碳交易市场推动企业商业模式的变换。我国除发电企业已进入国家碳排放权交易市场外，还有石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸等传统高碳排放的工业在等待进入。碳定价可有效推进这些产业低碳转型，并形成长期减排的预期。我国可尽快把这些行业纳入碳交易。对于无法纳入国家碳市场的工业企业，可鼓励其开发出具有额外性的碳减排量，参与碳信用交易。这方面，需要我国加快自愿碳交易机制的建立，为更广泛的工业企业自发开展绿色低碳转型奠定良好的制度环境。

三是发挥举国体制优势优化低碳科技创新的模式。低碳创新需要新材料、新工

艺,需要借助数字技术等,都对跨学科创新提出了新要求,为此可探索加强“双碳”领域国家实验室和全国重点实验室布局建设,推动跨领域的“双碳”重大科技专项。集合企业、高校、研究机构和金融的多方面优势力量,按照需求导向的原则,加快突破多能融合关键技术,超前布局前沿技术和颠覆性技术,加强基础研究。

四是健全法律法规和相关标准。在碳达峰碳中和立法中,建议出台《碳达峰碳中和促进(保障)法》或者《应对气候变化法》,作为工业低碳转型的基本法。在此基础上出台《工业绿色低碳转型条例》《碳排放权交易管理》《碳税征收管理条例》《碳汇建设和碳清除条例》等行政法规,结合风力发电、光伏发电发展的时代趋势,结合氢能及相关产业的发展趋势,修订《可再生能源法》等法律法规,促进工业低碳转型的规范化。在标准方面,建议按照《碳达峰碳中和标准体系建设指南》的规定,按期补足碳减排标准子体系、碳清除标准子体系、市场化机制标准等子体系,为全国开展工业领域的碳减排、碳交易或者征收碳税,奠定核算方法、核算规则、交易规则等标准基础。

五是把公正转型的能力作为工业低碳转型节奏的上限。考虑到煤炭对我国工业体系的支撑能力,工业低碳转型目标不能过激,需要稳妥设置工业低碳发展的政策目标。同时,积极扩大转型中的技术正外部性,尽量做大工业转型的经济增量,探索找到用正外部性效应抵消转型成本的路径。

## 六、总结

本研究分析了我国工业低碳转型的必要性;通过定性的政策评估和定量测算,对新世纪以来的工业节能降碳工作取得的成绩做了客观描述;按照工业低碳转型要求,对已出台的促进工业低碳转型的政策作了评估,对我国2030年前重点产业低碳转型的路径进行了梳理;在全面分析我国工业低碳转型面临的挑战基础上,提出了深化我国工业低碳转型工作的改革建议。总体来看,我国已有较充分的低碳转型规划和政策体系,未来需要进一步改革,并确保相关政策切实落地实施。由于现行政策对于公正转型的考虑不多,未来需更加重视公正转型能力的提升。

### 参考文献

- 国网能源研究院有限公司(2021):《中国能源电力发展展望2021》,北京:中国电力出版社。
- 李继峰、郭焦锋、高世楫等(2021):《我国实现2060年前碳中和目标的路径分析》,《发展研究》第4期,第37—47页。
- 李晋、谢臻阳、蔡闻佳等(2022):《碳中和背景下中国钢铁行业低碳发展路径》,《中国环境管理》第1期,第48—53页。
- 刘竹、关大博、魏伟(2018):《中国二氧化碳排放数据核算》,《中国科学:地球科学》第7期,第878—887页。
- 王祝堂(2022):《铝与新能源汽车面面观》,《轻合金加工技术》第11期,第1—12、27页。
- 谢伏瞻、庄国泰(2021):《气候变化绿皮书(2021):碳达峰碳中和专辑》,北京:社会科学

文献出版社，第 282—293 页。

油控研究项目课题组（2022）：《中国石化行业碳达峰碳减排路径研究报告》，北京：北京大学能源研究院。

袁志逸、李振宇、康利平等（2021）：《中国交通部门低碳排放措施和路径研究综述》，《气候变化研究进展》第 1 期，第 27—35 页。

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（2021）：《读懂碳中和：中国 2020—2050 年低碳发展行动路线图》，北京：中信出版集团。

## The Basis, Road and Policies for China's Industrial Low-carbon Transformation —Commentary and Prospect

LI Ji-feng, CHANG Ji-wen

(Institute for Resource and Environmental Policy Studies,  
Development Research Center of the State Council, Beijing 10010, China)

**Abstract:** It needs a broad and profound systemic change for China to meet the carbon dioxide peaking and carbon neutrality target. The green and low-carbon transformation of industry is the only way to coordinate the dual target of economic and social development and emission reduction, and there is a long way to go. It has shown that China has taken great efforts on industrial energy conservation since the “Eleventh Five-Year Plan” period, and achieved remarkable energy conservation results through promoting the optimization and upgrading of industrial structure, formulating technical standards and implementing a series of policies and actions. The carbon intensity of major energy-intensive industries has continued to decline. However, to meet the requirements of carbon dioxide peaking and carbon neutrality, it is necessary to systematically promote industrial low-carbon transformation on the basis of energy conservation. According to the review of existing research, the industries need to positively promote structural optimization, energy-saving technological innovation, recycling and low-carbon transition of energy. There are big challenges of industrial low-carbon transformation, such as relatively weak material technology foundation, unsuitable mainstream business models of enterprises, shortcomings in technological innovation, insufficient laws and regulations, and high pressure of just transformation. A systematic and efficient policy system should be built continuously to promote the industrial low-carbon transformation.

**Key Words:** industry; carbon emission; energy; low carbon transition; low carbon policies; target