

新发展阶段工业绿色低碳 发展路径研究报告

(2023 年)

中国信息通信研究院

2023年12月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。



前言

工业绿色低碳发展是新发展阶段推进新型工业化、实现人与自然和谐共生的根本路径。立足新发展阶段、把握新趋势，紧扣中国式现代化建设、碳达峰碳中和等目标任务，我国积极部署一系列工业绿色低碳发展政策措施，全面推进工业高质量发展。

我国工业低碳发展已经取得积极成效，形成了良好的政策环境，培养了工业企业节能降碳的良好意识，能源资源利用效率显著提升，碳排放强度持续降低。然而，近年来高耗能行业碳排放强度降幅趋缓，节能降碳潜力边际下降，工业作为能源资源消耗的重点领域，要突破工业“由大转强”资源环境约束，必须持续推进低碳转型工作，工业降碳迫切需要新思路和新举措。

本研究报告系统梳理了工业绿色低碳发展的科学内涵和演进脉络，厘清绿色低碳与发展的辩证关系，总结国际工业脱碳经验及对我启示。选取钢铁、石化化工、建材三个重点行业，分行业分析碳排放现状和减碳挑战，提出低碳发展具体路径和策略，绘制工业绿色低碳发展技术体系、时间表路线图和施工图。从强化减碳责任、政策引导、技术创新、需求牵引、国际合作等方面提出政策建议。

本研究为我国工业生产方式和发展模式绿色低碳化革新提供方向指引与政策参考，将绿色低碳发展贯穿到工业高质量发展的主线中，加快形成新质生产力，推动新型工业化进程，建设美丽中国。

目 录

一、 新发展阶段新型工业化迈向绿色新征程	1
(一) 工业绿色低碳发展是推进新型工业化的关键所在	1
(二) 双碳背景下工业绿色低碳发展科学内涵不断丰富	3
(三) 工业发展方向从重经济收益向绿色低碳不断演进	5
(四) 新发展阶段我国工业低碳发展“含绿量”不断提升	8
二、 国际工业绿色转型为我提供经验和启示	12
(一) 美国：捍卫制造业综合实力高地	12
(二) 欧盟：引领工业部门数绿双转型	14
(三) 日本：推进绿色经济与社会变革	17
三、 我国工业重点行业低碳发展应分业施策	19
(一) 钢铁行业	19
(二) 石化化工行业	24
(三) 建材行业	30
(四) 时间表和技术路线图	35
四、 政策建议	38
(一) 强化减碳责任，推动工业绿色低碳发展上下联动	39
(二) 强化政策引导，统筹工业重点领域绿色低碳发展	40
(三) 强化科技创新，增强工业绿色低碳发展技术支撑	41
(四) 强化需求牵引，扩大工业绿色低碳发展市场空间	42
(五) 强化国际合作，积极参与全球工业绿色低碳治理	43

图目录

图 1 工业绿色低碳发展内在逻辑：“双三角(金/绿)”耦合关系	5
图 2 国际绿色发展理念发展历程	6
图 3 中国绿色发展理念发展历程	8
图 4 2019 年中国分行业碳排放结构	20
图 5 钢铁行业绿色低碳技术需求和路线图	24
图 6 我国石化化工重点子行业碳排放占比图（2021）	25
图 7 合成氨需求量预测	26
图 8 甲醇需求量预测	26
图 9 石化化工业绿色低碳技术需求和路线图	30
图 10 建材行业碳排放结构	31
图 11 建材行业绿色低碳技术需求和路线图	35
图 12 工业领域绿色低碳技术体系图	36
图 13 工业绿色低碳发展时间表、路线图	38

一、新发展阶段新型工业化迈向绿色新征程

（一）工业绿色低碳发展是推进新型工业化的关键所在

全球气候变化的影响给人类生存发展带来了日益严峻的挑战。工业化的快速发展导致大量排放以二氧化碳为主的温室气体，由此引发了冰川消融、旱涝两极化等一系列极端气候现象。日益严峻的气候变化问题促使世界各国就绿色低碳可持续发展达成共识。从2018年开始，各国积极行动，纷纷作出碳中和承诺。据清华大学碳中和研究院统计，目前全球已有超过130个国家地区提出碳中和目标，这些国家地区占全球92%的GDP、89%的人口和88%的排放¹。世界主要经济体为抢占绿色低碳发展制高点，大力加强战略布局。部分国家和地区为强化竞争优势，纷纷设置新的绿色贸易壁垒。从国际来看，推动绿色增长、实施绿色新政成为全球主要经济体的共同选择，绿色技术装备制造正成为产业竞争的新高地。

工业是我国经济发展的主力军，是立国之本、强国之基。近年来，中国工业发展迅速，总体规模不断扩大。2010年我国制造业产出超越美国，成为全球第一制造大国，实现了由小向大的历史性转变。目前，中国是全世界唯一拥有联合国产业分类当中全部工业门类的国家，在500余种主要工业产品中有220多种产量位居世界第一。然而，工业在创造社会财富的同时，也带来了不少生态环境问题。在工业化进程中，能源资源需求不断扩大，污染物排放也随之增多，资源环境的承载能力已经接近极限，资源环境约束已经成为

¹清华大学碳中和研究院，2023全球碳中和年度进展报告，2023.

制约工业绿色低碳发展的主要瓶颈。

随着全球应对气候变化的深入推进，工业绿色低碳发展成为我国实现碳达峰碳中和目标的重中之重，是破解资源环境约束突出问题、实现可持续发展的迫切需要，也是顺应技术进步趋势、推动工业转型升级的当务之急。工业绿色低碳发展将倒逼经济社会体系全面转型升级，加快改善生产要素及其配置水平，进而促进节约资源和保护环境的绿色低碳产业结构、生产方式、生活方式、空间格局的形成，推动实现人与自然和谐共生的高质量发展。在促进社会经济高质量发展过程中，工业领域既要做好自身碳达峰碳中和工作，还承担着为全社会实现碳达峰碳中和战略目标提供技术装备和产品的责任和使命。以减污降碳协同增效促进经济社会发展全面绿色转型，构建绿色发展空间格局，是推进工业绿色低碳转型、进而实现经济社会高质量发展战略目标的重要一环，责任重大、使命光荣。

我国已经进入向第二个百年奋斗目标进军的新发展阶段，党的二十大报告明确提出到2035年基本实现新型工业化的目标，推进新型工业化是党中央着眼实现第二个百年奋斗目标做出的战略部署。新型工业化之所以“新”，一个很重要的特征是底色必须“绿”，只有把绿色底色铺好，使绿色成为新型工业化的普遍形态，走绿色低碳循环可持续发展之路，才会成就高质量发展。因此，**工业绿色低碳发展是加快形成新质生产力、推进新型工业化、促进经济社会高质量发展的关键所在**。工业需要顺应发展阶段、发展条件和发展格局变化，以高端化、智能化、绿色化为方向，加快结构体系升级、技术路径创新、发展模式优化，补短板、锻长板，从过去的“高增

长、高污染、高消耗”转变为“高水平、高质量、高效益”发展模式，以高水平保护支撑高水平发展，为实现“两个一百年”宏伟目标提供现代工业支撑。

（二）双碳背景下工业绿色低碳发展科学内涵不断丰富

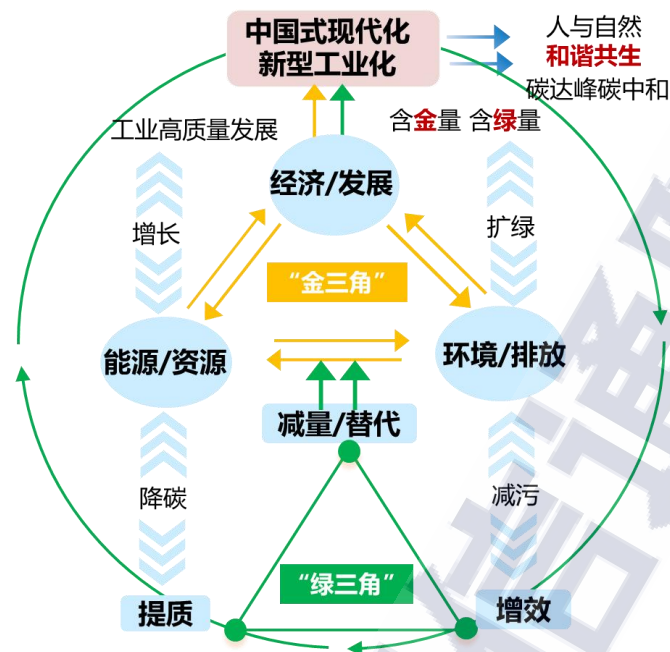
绿色是生命的象征、大自然的底色，良好生态环境是美好生活的基础、人民共同的期盼。因此“绿色”既是经济社会发展的方向和目标，也是状态、结果和评价的标准。“低碳”是降低碳排放，“发展”是效率、效益或竞争力的提高。从绿色与发展的辩证关系来看，“绿色”与“发展”不是对立而是统一的关系，二者不能割裂，是相互影响、相互作用、互为因果的“互动关系”，绿色与发展同等重要。但是落在“发展”上，不是不“发展”，而是要转变发展的方式，在“发展”中落实绿色低碳，在“发展”中解决生态环境问题，“发展”是解决生态环境的关键举措，以绿色低碳促“发展”，以产业的“含绿量”提升发展的“含金量”。

绿色低碳发展目前还没有统一明确的定义，其内涵并非一成不变，双碳目标下，“绿色低碳发展”的表述更契合新发展阶段的时代背景。工业绿色低碳发展的内涵是资源能源消耗低、环境污染和碳排放量少、科技含量高、经济效益好的新型工业化道路。其特征是低消耗、低能耗、低排放、高效率、高效益、经济与环境的协调。其本质是一种经济社会发展模式，是经济社会发展到一定阶段的必然选择。其核心目的是突破资源环境承载力的制约，谋求经济增长与资源环境的和谐统一，实现发展与环境双赢，人与自然和谐共生。

绿色发展、循环发展和低碳发展相辅相成、相互促进，构成一个有机整体。绿色是发展的全面要求和转型主线，循环是提高资源效率的有效途径，低碳是能源战略体系的有序调整。三者目标都是形成节约资源能源和保护生态环境的产业结构、生产方式和消费模式，促进生态文明建设。从内涵看，绿色发展更为宽泛，涵盖循环发展和低碳发展的核心内容，循环发展和低碳发展则是绿色发展的重要路径和形式，因此，可以用绿色发展来统一表述。绿色发展的内涵并非一成不变，碳达峰碳中和目标下，绿色低碳发展表述更加多样化，本研究报告重点聚焦低碳发展。

工业经济的大规模发展，必然以消耗大量能源资源为基础，也必然排放诸多污染物，以产生负面环境影响为代价，经济发展-能源资源-环境排放三者之间构成了工业发展的“金三角”。为了减少对环境的污染，需要减量替代能源资源，调整优化能源结构产业结构，进而提高效率、增加效益，这三者构成了经济发展的“绿三角”。

“金三角”和“绿三角”耦合形成的双三角，可以形象描绘工业绿色低碳发展的内在逻辑关系，而工业绿色低碳发展的最终目标是建设新型工业化和中国式现代化，形成新质生产力，实现碳达峰碳中和目标以及人与自然和谐共生（图1）。



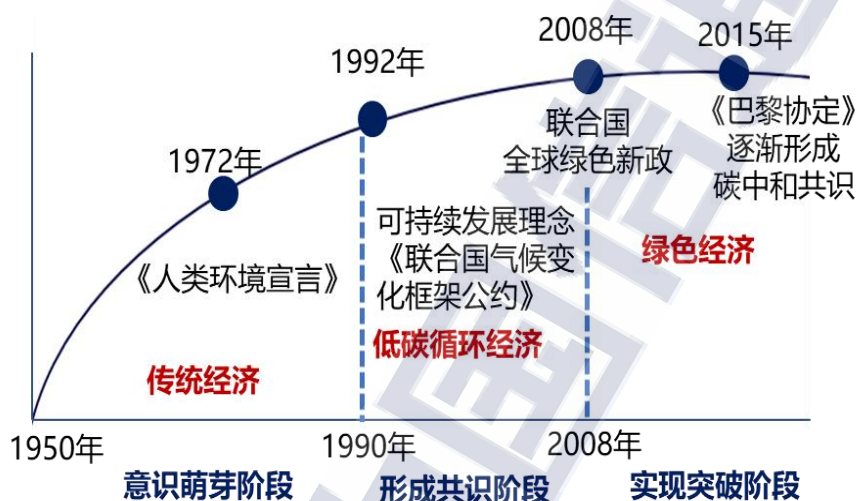
来源：中国信息通信研究院

图 1 工业绿色低碳发展内在逻辑：“双三角(金/绿)”耦合关系

（三）工业发展方向从重经济收益向绿色低碳不断演进

国际上，工业化国家也经历了发展与资源、环境、生态矛盾十分尖锐的阶段。上世纪五十年代至九十年代，人类社会处于传统经济发展的模式。1972年6月16日联合国《人类环境宣言》于斯德哥尔摩通过，标志着与环境和谐共生的观念开始在全球范围内萌芽。上世纪九十年代至二十世纪初，国际上逐渐形成了循环低碳的发展模式。1992年6月《联合国气候变化框架公约》的通过，不仅为国际社会合作应对气候变化奠定了坚实的法律基础，也标志着人类对应对全球气候变化、减少温室气体排放达成了全球共识，是全球气候治理的基石，全球气候治理时代正式到来。随着绿色发展理念逐渐深入，发达国家及不少发展中国家纷纷制定和推进以应对气候变

化向低碳经济转型为核心的绿色发展规划，试图通过绿色经济和绿色新政，在新一轮经济发展进程中促进经济转型，实现自身的可持续发展。在欧美等发达国家完成工业化后，旧经济模式已经没有足够的发展空间和竞争优势，世界各国都在寻求新的经济增长点，绿色经济正在成为发达国家参与国际竞争的新战略（图2）。



来源：中国信息通信研究院

图2 国际绿色发展理念发展历程

资源、环境、生态与发展如何平衡的问题在中国尤其尖锐，面临的资源环境形势比发达国家更为复杂和严峻。纵观历史，我国的绿色发展经历了一个由初级到高级、由简单到复杂的演进过程，从“经济增长”到“可持续发展”，从“行政手段”到“行政与市场化结合”，是在对传统发展模式总结和反思的基础上形成的，是以适应人与自然和谐共生为特征的发展模式（图3）。从污染物排放、环境质量改善和经济增长关系来看中国治污减排的进程，中国的2010-2020年大致相当于经济合作与发展组织国家（OECD）20世纪70年

代“环境十年”（在该阶段，治污减排进程和治理体系发生深刻变化），中国的污染物排放、碳排放、能源排放将渐次达峰，经济增长将与其先后脱钩。回顾我国绿色产业政策脉络，可大致分为四个阶段，政策基调从“经济发展为主”逐渐向“绿色低碳发展”过渡，具体措施从“纲领性为主”向“行政与市场双轮驱动”转变。

第一阶段：重发展轻环保（1978-2001年）。1992年我国引入可持续发展理念，并在“九五”计划和《2010年远景目标纲要》中将可持续发展战略列为国家基本战略，但是该阶段中国处于建设初期，主要任务是经济增长和产业发展，对环境的重视程度不足，产业政策以纲领型政策为主，缺乏精细化的政策指导。

第二阶段：政策萌芽阶段（2002-2011年）。2002年中共十六大提出科学发展观，经济与环境协调发展问题被提上议程，该阶段的绿色产业节能减排管理模式逐渐由事后治理转向事前监督，政策以纲领性和命令型政策为主。

第三阶段：政策发展阶段（2012-2019）。2012年党的十八大首次将“绿色发展、循环发展、低碳发展”作为生态文明建设的着力点，成为绿色化转变的开端。2016年“可持续发展理念”被列为全面建成小康社会五大发展理念之一，这意味着中国对环境保护的认识由“以解决经济发展的环境负外部性”的从属问题转变为“引领新的发展模式”的主动性战略。

第四阶段：向碳中和目标迈进（2020至今）。2020年双碳目标提出后，以降碳为重点战略方向，以政府与市场“双轮驱动”的方

式推动我国绿色发展，政策在金融和产业两端同时加码发力，顶层1+N政策体系基本构建。

	战略方向	具体措施
第一阶段： 重发展轻环保 (1978-2001)	“九五”计划将 可持续发展 战略列为国家基本战略	<ul style="list-style-type: none"> 80年代探索建立排污许可制度 制定能源利用监测规范性文件
第二阶段： 政策萌芽阶段 (2002-2011) 提出科学发展观	2002年十六大科学发展观。事后治理转向事前监督， 纲领性命令型政策 为主。2006年节能减排作为约束性指标首次写入“十一五”规划	<ul style="list-style-type: none"> 制定发布节能、环保、污染防治推广目录 2009年首批产业结构调整目录 制定能耗限额、污染物排放强制性国标 开展循环经济、低碳省区和城市试点
第三阶段： 政策发展阶段 (2012-2019) 提出生态文明	2012年十八大绿色发展、循环发展、低碳发展作为生态文明建设着力点。 行政手段与市场化手段结合	<ul style="list-style-type: none"> 工业节能监察管理制度基本建立 十三五工信部开始绿色制造体系建设 绿色产业目录、绿色技术推广淘汰目录 发布24个行业温室气体核算指南，开始碳排放监测报告核查制度（MRV）和地方碳交易试点
第四阶段： 向碳中和迈进 (2020-) 提出双碳目标	2020年双碳目标提出，迈入新征程，以 降碳为重点战略方向 ，减污降碳协同增效，推动能耗双控向碳排放双控转变	<ul style="list-style-type: none"> 发布工业、钢铁、石化等行业碳达峰实施方案 更新绿色技术目录、环保装备、能耗标杆水平和基准水平、产业结构调整指导目录 制定工业绿色低碳标准体系（已公示） 2021年开启全国碳交易 2023年重启CCER、发布最新CCER方法学 减污降碳协同城市\园区试点、碳达峰城市试点 加快建立产品碳足迹管理体系 绿证、绿电.....

来源：中国信息通信研究院

图3 中国绿色发展理念发展历程

（四）新发展阶段我国工业低碳发展“含绿量”不断提升

2020年10月习近平总书记在中共十九届五中全会第二次全体会议上的讲话指出，新发展阶段就是全面建设社会主义现代化国家、向第二个百年奋斗目标进军的阶段。在探索绿色低碳发展道路的进程中，中国在产业结构调整、能源结构优化、节能管理和循环经济发展、低碳发展试点示范、低碳社会建设等方面积极探索和实践，推动形成了绿色低碳的发展方式，促进了二氧化碳排放强度的持续降低、非化石能源消费比重的逐步提高。

顶层设计不断完善。从“九五”时期，中国开始关注可持续发

展，不断完善相关立法，包括《节约能源法》、《环境保护法》等。此后，相继出台了《中国应对气候变化的政策与行动》、《大气污染防治行动计划》、《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等行动计划，对工业体系发展做出了清洁绿色的要求。近年来，中共中央印发的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》、《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》，国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》、工信部等部门印发的《“十四五”工业绿色发展规划》、《工业领域碳达峰实施方案》《工业能效提升行动计划》、《工业水效提升行动计划》等政策均对工业领域绿色低碳发展提出新要求，指出工业领域要加快绿色低碳发展和高质量发展，构建工业绿色低碳发展与工业赋能绿色发展相互促进、深度融合的现代化产业格局，支撑碳达峰碳中和目标任务如期实现。

产业结构不断优化。我国实施了淘汰落后产能、推动传统产业改造升级、扶持战略性新兴产业发展等产业结构调整战略，促进了低碳经济发展以及绿色低碳产业体系的完善和发展。目前，我国已初步建立落后产能退出长效机制，钢铁行业提前完成1.5亿吨去产能目标，电解铝、水泥行业落后产能已基本退出。大力发展战略性新兴产业，以太阳能电池、锂电池、电动载人汽车为代表的“新三样”成为外贸增长新动能，今年上半年“新三样”合计出口增长61.6%^{2,3}。

碳减排取得巨大成就。2005年以来工业节能降碳政策措施有效

²工业和信息化部，国家发展改革委，生态环境部，工业领域碳达峰实施方案，2022。

³国家发展改革委发布碳达峰碳中和重大宣示三周年重要成果。

推动各行业碳强度的持续下降，形成了良好的政策环境，培养了工业企业节能降碳的良好意识，取得了显著降碳效果。从碳排放来看，随着煤炭开采业煤矸石的利用水平提升，煤炭开采业碳排放已经在2010-2015年达到峰值，发电供热和石化炼焦业碳排放仍在上升，其他行业碳排放水平则相对稳定。从碳排放强度来看，我国工业碳排放强度显著下降，意味着工业低碳转型已取得显著成效，但不同行业的碳排放强度存在明显差异。2020年，发电供热和石化炼焦行业的碳排放强度最高，金属冶炼、煤炭开采、非金属矿物制品业、化工行业碳排放强度均高于全国平均值0.9吨CO₂/万元，其余大部分行业则明显低于全国碳排放强度均值，发电供热行业碳排放强度波动态势明显，石化及炼焦行业碳排放强度下降呈现先缓后快的态势，化工、冶金、建材、造纸等行业碳排放强度总体呈稳步下降态势⁴。

能源资源利用效率显著提升。我国先后公布了煤炭、电力、钢铁、有色金属、石油石化、化工、建材等13个行业共260项重点节能技术；定期调整发布节能产品政府采购清单和环境标志产品政府采购清单，对清单产品实行强制采购和优先采购的支持政策。在能耗水耗方面，2022年规模以上工业单位增加值能耗比2012年累计下降幅度超过36%，钢铁、原铝、水泥熟料等单位产品能效处于世界先进水平。2022年工业用水量占全国用水总量比例从2015年的22%左右下降到16%。在资源综合利用方面，2022年大宗工业固废资源综合利用率超过52%，能源资源利用效率持续提升⁵。

绿色制造体系基本构建。我国积极推行绿色制造，推广全生命

⁴李继峰，常纪文，我国工业低碳转型的基础、路径与政策，城市与环境研究，2023(02)。

⁵工业和信息化部网站。

周期绿色发展理念，倡导绿色原材料采购，完善绿色工厂评价、节水节能规范等标准，推动建设统一的绿色产品标准、认证、标识体系。截至2023年3月底，研究制定468项节能与绿色发展行业标准，建设了七批共3657家绿色工厂、270家绿色工业园区、408家绿色供应链企业，推广近3万种绿色产品，绿色制造体系建设已成为绿色转型的重要支撑。

绿色供给能力显著增强。2022年，我国煤炭占能源消费总量比重由2005年的72.4%下降至56.2%，清洁能源消费比重达25.9%⁶，截至2023年10月底可再生能源发电总装机突破14亿千瓦，风、光、水、生物质发电装机容量稳居世界第一。百万千瓦水轮发电机组顺利投产发电，多晶硅、硅片、电池、组件产量全球占比均超过70%，新能源汽车产销量连续8年居全球第一，液化天然气（LNG）、甲醇等绿色动力船舶占国际市场份额半壁江山⁷。节能环保产业质量效益持续提升，绿色技术装备制造体系已经初步形成，包括节能、节水、环保、可再生能源等重点领域，绿色技术装备和产品供给能力显著增强，绿色装备制造成本持续下降。

数绿融合水平不断提高。数字技术与工业生产制造快速融合发展，5G、人工智能、大数据、工业互联网等新兴技术与绿色低碳产业深度融合，先进制造业和现代服务业融合发展步伐加快。2022年，高技术制造业、装备制造业增加值占规模以上工业增加值比重分别为15.5%、31.8%，分别比上年增长7.4和5.6个百分点⁸，重点领域

⁶ 国家统计局官网.

⁷ 国家能源局官网.

⁸ 国家统计局官网.

关键工序数控化率由2012年的24.6%提升到了2022年的58.6%，数字化研发设计工具普及率达到77%，“中国制造”逐步向“中国智造”转型升级⁹。

二、国际工业绿色转型为我提供经验和启示

通过对发达国家地区工业发展方式绿色转型实践和经验进行梳理，我们得到以下启示：**一是**加强立法和框架性政策引导，将低碳发展融入所有政策的制定与执行中，提出绿色低碳转型目标，逐步形成以节能环保和发展可再生能源为核心的发展模式；**二是**加强新能源和低碳技术研发，优先布局先进低碳技术，耦合二氧化碳捕集利用与封存技术（CCUS）实现碳减排，降低温室气体排放强度；**三是**加强绿色相关的财税金融支持，制定税收优惠、减排援助基金等一系列激励措施，大力推广减排技术，引导企业主动采取措施减少温室气体排放。

结合各个国家地区的能源资源禀赋、产业特点等，不同国家具体绿色发展策略有所不同，美国、欧盟和日本的具体经验如下：

（一）美国：捍卫制造业综合实力高地

美国工业绿色低碳发展的政策注重系统性、整体性、均衡性，在战略规划、研发投入等方面综合实力位居发达国家首位。但工业脱碳仍需要技术和资金的支撑，美国能源部认为尚未成熟的脱碳技术和庞大的资金需求是工业领域脱碳最大的阻碍，美国现有工业低碳发展政策主要包括低碳发展战略、清洁能源和加大绿色金融投入等。

⁹中国政府网官网。

在国家政策方面：一是加强顶层政策设计。2022 年美国白宫发布了《先进制造业国家战略》，提出了十一项具体目标，其中“实现清洁和可持续的制造以支持脱碳”，包括建议制造过程使用脱碳技术，使工业过程电气化，支持避免工业过程直接排放温室气体的新化学活动，捕集和封存工业二氧化碳，创造温室气体密集型工业产品的替代品。二是促进清洁能源发展。2020 年美国能源部发布《氢能计划发展规划》，提出了氢能研究、开发和示范总体战略框架。该规划设定了氢能全链条中重点发展的技术和经济指标，希望通过技术创新，提高技术稳定性和效率，降低成本，加快氢能技术或产品的商业化应用。未来 10 年（2020-2030 年）要达到的关键技术经济指标中提到工业和电力部门用氢价格降至 1 美元/千克。三是加大绿色金融投入。拜登政府通过《两党基础设施法案》和《通胀削减法案》计划投入 60 亿美元，开展“工业示范计划”，用于支持能源密集型行业的脱碳项目，减少碳排放。钢铁、铝、水泥和混凝土、化工等能源密集型行业的碳排放占了美国总碳排放近三分之一，在这些行业进行广泛示范和部署脱碳项目是实现拜登政府 2050 年净零排放的关键。

在行业技术方面：钢铁行业：美国钢铁协会目前正致力三项降低钢铁工业 CO₂ 排放的技术研发项目，一是用氢闪速熔炼生产生铁，通过氢作燃料替代炼铁生产过程中所用的煤和焦炭，目前该研究仍处于初步阶段；二是熔融氧化物电解工艺炼铁，该项技术不产生二氧化碳；三是新型悬浮炼铁技术、二氧化碳地质封存研究。美国充分发挥税收政策对低碳钢铁技术开发的促进作用，对钢铁企业减少

碳排放所投用的设备投资减少增值税，提高钢铁企业低碳投资项目的所得税抵免额度，取消高碳钢铁产品的出口退税，并降低低碳钢铁技术的关税水平，鼓励钢铁企业加快低碳技术的更新换代。

石化化工行业：美国化工行业低碳技术举措主要包括生物燃料及氢能技术、废弃化学品循环利用技术和 CCUS。同时，美国化工行业积极推进氢能技术和 CCUS 技术的耦合，对氢能和 CCUS 技术提供相关税收抵免，使得该领域的投资快速发展。美国在二氧化碳减排领域建立了完善的法律法规体系，突出体现为通过财税等经济刺激手段激励二氧化碳强化采油应用。美国占有全球 80% 的二氧化碳捕集能力，有 10 座大型二氧化碳捕集设施在运行，前三大工业领域是乙醇生产、天然气处理和合成氨生产。

建材行业：水泥行业脱碳解决方案在美国目前仍处于试点阶段，到 2050 年，美国水泥行业排放量需要减少 60%-70% 才可能踏上净零路径。对此，美国波特兰水泥协会发布了碳中和路线图，制定了到 2050 年美国整个水泥和混凝土产业链的净零计划，聚焦熟料生产、水泥制造和运输、混凝土生产、建筑环境建设以及使用混凝土作为碳汇捕集二氧化碳五个环节，提出可再生材料原材料/燃料替代、优化设计、新型低碳水泥混合物、碳捕集等低碳技术路径，确定了短期、中期和长期发展目标、时间表和技术路线，提供了激励行动的方向和激励措施建议。

（二）欧盟：引领工业部门数绿双转型

欧盟是低碳经济的倡导者和领导者，高度重视工业绿色低碳发展，在目标制定与顶层框架设计方面始终走在全球前沿，已经构建

了较完善的政策体系，配套部署了重点行业措施，布局了科技研发项目，采取了多样化的财政与金融保障措施，具有丰富的理论和实践经验。

在国家政策方面：一是持续推进数绿协同创新。2019年欧盟委员会发布了《欧洲绿色新政》，注重以技术和制度创新驱动绿色增长，提出在工业领域，充分挖掘数字转型的潜力，大力推动超级计算机、云技术、超快网络和人工智能解决方案的融合，提升理解和应对环境问题的能力；2020年欧盟出台了《欧洲新工业战略》，从新欧洲工业战略、适应可持续和数字发展的中小企业战略、服务企业和消费者的单一市场行动计划三大方面指导欧洲工业实现气候中立和数字领军的双重转型。二是培育壮大绿色低碳产业。欧盟为应对美国《通胀削减法案》于2023年2月出台了《绿色协议产业计划》，以吸引可再生能源产业进入欧盟，推进绿色低碳产业发展，巩固欧盟在气候变化中领导地位。该计划主要包含《净零工业法案》和《关键原材料法案》两个重要法案。《净零工业法案》旨在扩大清洁能源技术的制造规模，提升欧盟制造净零技术的竞争力，《关键原材料法案》旨在提升本土关键原材料的供应能力，同时设置了能源转型和数字化技术转型中重要的关键原材料和战略原材料清单。三是加快构建市场化机制。欧盟碳市场（EU-ETS）自2005年正式运行，是全球最先开展“碳排放限额与交易”机制的市场，在中国碳市场建立之前，EU-ETS曾经是全球最大的碳交易市场，极大地促进了欧盟工业体系的绿色低碳发展。2021年欧盟公布了“Fit for 55”一揽子气候计划，建立优化了碳排放交易体系、碳关税、重点行业减排目

标三大碳减排机制，并将产品范围从本土产品拓展至进口产品。为了加速欧盟碳减排防止碳泄漏，2023 年 2 月欧洲议会正式通过了《欧盟碳边境调节机制（CBAM）》，从 2027 年开始将对钢铁、铝、水泥、化肥和电力等重点行业征收碳关税，这也成为世界上第一个对其进口产品设定碳价格的贸易区。

在行业技术方面，钢铁行业：欧盟的钢铁生产技术主要为高炉碱性氧气炉技术和电弧炉技术。为了推动钢铁低碳转型，欧洲钢铁技术平台（ESTEP）早在 2004 年推出超低二氧化碳炼钢（ULCOS）低碳化项目，项目目标是至少实现一项碳排放量减半的突破性炼钢技术，该项目第一研发阶段（2004-2009）总投资 7500 万欧元，第二研发阶段（2009-2015 年）中的中试和示范阶段项目总投资达到 5-5.5 亿欧元。2020 年，欧钢联提出了欧盟钢铁行业实现低碳冶金的两大技术方向：碳直接避免和智能碳使用，并规划了短期、中期和长期的技术创新关键项目。

石化化工行业：欧盟石化化工行业低碳发展的举措包括使用高效率工艺、绿色能源、低碳蒸汽以及生物基原料等。同时，欧盟高度关注新兴低碳化技术的突破、现有石化化工技术的更新换代以及可替代石化原料与燃料的可再生能源与燃料，例如加紧开发质子交换膜电解水生产氢气技术，实现生产过程零排放。2023 年 1 月欧盟发布《欧盟化学工业转型路径》报告，从可持续竞争力、能源和原料等八个方面提出了原料替代、工艺优化和资源效率提升等加速欧盟化学工业绿色和数字化双重转型行动。

建材行业：欧洲水泥行业最主要的低碳技术是燃料替代技术，且技术水平处于世界领先地位，燃料替代率高达约 39%。欧洲水泥协会 2020

年发布了碳中和路线图，强调通过水泥和混凝土价值链实现欧洲水泥行业 2050 年的净零排放目标，该路线图着眼于熟料、水泥、混凝土、建筑和（再）碳化五个环节，从资源效率、能源效率、碳捕集利用、产品效率以及下游供应链等方面提出了低碳技术发展路径。

（三）日本：推进绿色经济与社会变革

日本较早开展应对气候变化立法，启动低碳发展战略，目前已经实现了碳达峰，当前日本工业低碳发展正在进入快速发展阶段，发展重点聚焦在 2050 年实现碳中和。

在国家政策方面：一是制定低碳发展战略，日本相继提出一系列政策，逐步形成体系完整的低碳发展战略。2020 年 12 月日本发布了《2050 年碳中和绿色增长战略》，明确了“2050 年日本实现净零排放”的碳中和目标，基于预算、税制、金融、监管、国际合作 5 个政策工具，将在海上风电、电动汽车、氢能等 14 个重点领域推进减排，政府将为此向企业提供必要的政策措施和目标。**二是促进循环经济**，日本政府相继颁布了《再生资源循环利用法》《容器包装循环利用法》《循环型社会形成基本法》等相关法律法规，提出“3R 政策”，即减少废弃物的产生、再利用、再资源化，同时开展零排放生态工业园区建设等工作，旨在将建设循环型社会上升为国家战略，着力推进循环经济，提高资源利用效率。2021 年日本经济产业省发布了《碳循环利用技术路线》的修订版，进一步明确将二氧化碳作为一种资源来利用，同时强调各种节能技术也是碳循环利用中的关键部分。**在技术创新方面：**2020 年日本政府发布《革新环境技术创

新战略》，作为新的应对气候变化技术战略，涉及能源、工业、交通、建筑和农林水产业等五大碳排放重点部门，共 16 大类 39 项重点技术，推动日本能源转型，实现脱碳目标，其中提到要以氢能技术创新为突破，构建氢能社会体系，氢能贯穿于交通、工业、发电各个行业，可为全球每年减少 60 亿吨二氧化碳排放。日本也是世界上第一个制定氢气战略的国家，并在多个领域拥有先进的技术。

在行业技术方面：钢铁行业：日本钢铁行业一直高度关注节能问题，在开发突破性节能技术方面，为加快推进炼铁新工艺和能源利用技术的研发应用，推出环境和谐型炼铁工艺技术开发项目（Course 50），以减少高炉排放的二氧化碳及从高炉废气中捕集、分离和还原二氧化碳的技术为主要研究方向。同时，行业企业大力研发环保型高附加值新产品，例如电动汽车轻量化的超高强度钢板、耐磨钢、热焊接极厚板、低温用高强度板等，通过提供高性能钢铁产品，帮助客户在使用最终产品时节省能源并减少二氧化碳排放。

石化化工行业：日本石化化工行业将燃料氨技术作为主要的行业脱碳方式，计划到 2030 年新建多个氨生产厂，扩大燃料氨的生产，为所需的燃料氨建立稳定的供应系统。此外，石脑油裂解装置原料的转化以及碳捕集利用封存技术也是化工行业推进碳中和的主要技术措施。例如三井化学作为第一家宣布碳中和目标的日本化工企业，与丰田通商达成协议，在位于大阪的蒸汽裂解装置加工使用由芬兰生物燃料生产商耐斯特提供的生物原料，通过该项目三井化学成为日本第一家使用生物原料的裂解公司。**建材行业：**日本建材行业低碳发展十分注重资源循环利用。在建筑垃圾回收利用方面，日本将

废弃混凝土视为“建筑副产品”，利用水泥回转窑处理各种废弃物生产水泥，其回收技术处于世界领先地位。日本处理废弃混凝土的主要原则为：一是尽可能不从施工现场排出废弃混凝土等建筑垃圾；二是废弃混凝土等建筑垃圾要尽可能重新利用；三是对于无法重新利用的废弃混凝土以无害化方式处理。在碳循环技术创新应用方面，日本研制开发了可吸收二氧化碳的建筑材料，通过利用从大气和工厂中回收的二氧化碳制成碳酸钙生产混凝土等建筑材料。

三、我国工业重点行业低碳发展应分业施策

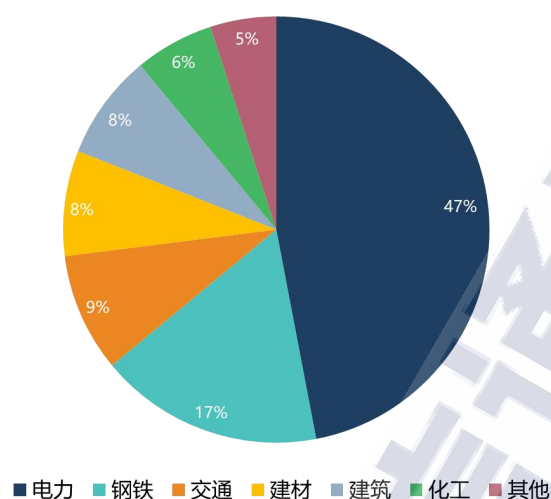
（一）钢铁行业

1. 我国钢铁行业碳排放的现状与挑战

（1）**钢铁行业碳排放的现状：**一直以来，中国都是全球最大的钢铁生产国和消费国。根据相关统计数据，2020 年，我国粗钢产量为 10.65 亿吨粗钢，占全球粗钢产量的 56.4%；钢材消费量为 9.95 亿吨，占全球钢材消费量的 56.2%¹⁰。就碳排放而言，2019 年，我国钢铁行业二氧化碳排放量为 15.74 亿吨，占全国总排放量的 17%，是仅次于电力部门的第二大排放源¹¹（图 4）。钢铁生产工艺流程中高炉-转炉长流程炼钢是主要的碳排放环节，占行业总碳排放的 74% 左右。

¹⁰ 国家统计局，中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报，2021。

¹¹ 中国节能协会冶金工业节能专业委员会，冶金工业规划研究院，中国钢铁工业节能低碳发展报告（2020），2020。



来源：落基山研究所

图 4 2019 年中国分行业碳排放结构

（2）钢铁行业低碳发展面临的挑战：一是中国钢铁冶炼用能主要以煤炭为主。我国钢铁冶炼中煤炭消费占比远高于欧美等发达国家，且钢铁工艺流程以“高炉—转炉”长流程炼钢为主，产量占到 90%左右。而以废钢为原料的“废钢—电炉”短流程的能耗仅为长流程的三分之一，但我国 2021 年短流程炼钢占比仅为 10%，远低于美国、韩国、日本等国家¹²。二是中国钢铁行业低碳转型的资产搁浅成本较大。目前，中国高炉设施投产后的平均运行时间约为 13 年，还未达到正常使用年限的三分之一¹³。与其他钢铁生产国相比，中国钢铁搁浅资产规模更大、成本更高。三是突破性低碳技术支撑不足。氢冶金、核能冶金、太阳能炼钢、电解炼铁等突破性工艺技术的自主研发和创新难度大、进度慢，绝大多数仍停留在设计研发阶段，

¹² 落基山研究所，碳中和目标下的中国钢铁零碳之路，2021。

¹³ 国际能源署，钢铁技术路线图：迈向可持续发展的钢铁技术，2020。

尚未形成可工业化、规模化应用的创新低碳技术。

2. 钢铁行业低碳发展路径与推进策略

钢铁行业低碳发展可从生产结构、能源消耗、原材料消耗、能源效率、低碳技术、管理等方面着手，全方位推进行业低碳高质量发展。

（1）结构低碳。一是压缩粗钢产量，严禁新增产能。严格落实产能置换，加大长流程减量置换的比例，完善产能置换政策要求；继续严格执行禁止新增钢铁产能相关规定，严肃查处违法违规生产行为。二是优化生产力布局。在京津冀、长三角等长流程工艺集中的生态环境重点地区合理布局发展短流程炼钢，切实改变“北钢南运”的现象。三是推广全生命周期绿色产品。以全生命周期为评判标准，开展全生命周期绿色评价和诊断工作，大力发展高强高韧、轻量化、长寿命、耐腐耐磨等钢材产品，实现产品绿色化发展。

（2）能源清洁。一是提高新能源及可再生能源利用。加快发展非化石能源，提高新能源和可再生能源的利用，积极推进清洁能源替代实现多能互补。二是加大氢燃料替代。推动将氢气作为高效还原剂，通过氢作为燃料替代炼铁生产过程中所需的煤和焦炭。三是燃料精细控制。采用先进数字技术，对生产工艺进行智能化改造，智能优化配煤配矿，提高炼铁炉料球团矿配比，通过精细化操作和管控减少燃料浪费。

（3）原料低碳。一是鼓励短流程电炉钢发展，加大废钢资源回用。加大废钢资源回收利用，鼓励先进电炉钢技术推广应用，提高

电炉短流程钢生产效率。**二是加强固废资源化利用。**以减量化、资源化和再利用为主要原则，降低固废产生量，加大固体废弃物资源综合利用规模，提升资源化利用水平。**三是推动副产煤气循环经济产业链。**鼓励实施钢化联产，打造钢铁、焦化间循环经济产业链，依托钢铁企业副产的焦炉煤气、转炉煤气、高炉煤气，生产高附加值化工产品。

（4）能效提升。**一是推进重点工序“极致能效”提升。**普及成熟可行节能降碳技术，采用先进节能降碳技术，推进节能技术工艺装备创新与改造升级。**二是提高余热余能自发电率。**重视钢铁能源转换功能，促进高能效转化工艺装备、管理技术创新开发，提高煤气发电、高炉煤气干式余压发电 TRT 干熄焦发电、烧结等余热发电等设施发电效率。**三是推进数字化、智能化技术应用。**进一步推广实施能源管控中心，开展碳排放信息管控平台建设，利用数字化、智能化技术实现生产装备智能化管控等。

（5）技术低碳。**一是氢能冶炼技术。**重点围绕以高炉富氢（或纯氢）冶炼和气基竖炉富氢（或纯氢）冶炼为主的技术路线，推动关键核心技术、工艺和装备取得重大突破。**二是氧气高炉及非高炉冶炼技术。**采用全氧鼓风、炉顶煤气循环利用、脱除二氧化碳的煤气提质与加热一体化技术，实现传统高炉减碳，发展直接还原、熔融还原非高炉炼铁技术，发挥非高炉炼铁与电炉短流程炼钢的协同减碳效应。**三是 CCS/CCUS 技术。**开展转炉喷吹二氧化碳炼钢、碳化法钢渣综合利用等 CCUS 技术示范性应用，加快实现 CCUS 规模化应用。

（6）管理绿色。一是**绿色供应链管理**。推动全方位供应链绿色管理，全面提升采购生产、物流等环节的绿色属性，将环境友好水平作为供应商评价审核的核心要素之一，推动数字化供应链转型，提升业务运作效率，优化运输路径里程、减少资源消耗。二是**绿色低碳规划**。推动企业制定符合自身的绿色低碳发展战略设定科学目标，提出碳中和愿景目标，将节能减排规划升级为双碳滚动规划。三是**碳资产管理**。依托物联网、工业互联网等数字技术、碳排放模型，结合资产投资算法模型，智能测算碳配额，实时分析配额盈缺，实现智能化碳配额管理、碳汇管理、碳价格预测、碳交易预测和对冲机制建立。

3.钢铁行业低碳发展技术需求与路线

中国钢铁工业存在着长流程占比高、能源结构高碳化等问题，低碳技术革新是实现钢铁行业低碳高质量发展的必然之路。钢铁行业应结合当前我国钢铁行业技术发展现状和发展需求，分阶段、有侧重地推进低碳技术发展，发展路径图如图5所示。

第一阶段：以现有成熟低碳技术推广应用为重点，并开展现有流程的前沿技术开发和应用，积极推进短流程低碳技术的研发，关注并跟踪氢冶金、CCS / CCUS等突破性技术。**第二阶段：在进一步优化原料结构、能源结构的基础上，以先进技术推进流程变革为重点，有序变革生产流程结构。****第三阶段：以绿电、绿氢占比大幅增加的能源结构变革为基础，以无碳冶金（氢冶金等）、CCS / CCUS 前沿技术研发广泛应用为重点**，构建钢铁-化工-氢能相融合的

一体化生产模式，实现钢铁流程深度脱碳。



来源：中国信息通信研究院

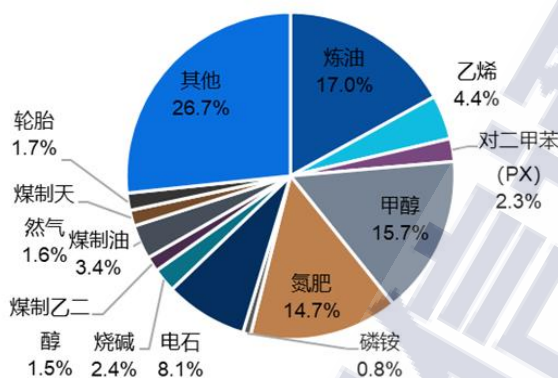
图 5 钢铁行业绿色低碳技术需求和路线图

（二）石化化工行业

1.我国石化化工行业碳排放的现状与挑战

（1）石化化工行业碳排放的现状：我国石化化工产业规模已达世界第一，在支撑电力、工业、交通、建筑等行业节能减排过程中发挥着物质基础和先导性作用，为社会低碳转型提供材料支撑，例如：锂电池材料、风电材料、光伏材料、汽车轻量化材料、绿色轮胎、建筑保温材料等。双碳目标下，石油在交通燃料中的需求增速将逐渐放缓，石油加工由“生产燃料为主”向“多产化工原料或材料”转型，有机化学品需求持续高速增长。2021年石化化工重点子行业碳排放量约为9.9亿吨，其中直接排放约6.9亿吨，间接排放约

3.0 亿吨，全行业排放约 13.5 亿吨（包括外购能源间接碳排放）¹⁴。行业内部能源消费集中度高，主要集中在包括能源生产加工和基本原材料制造的重点子行业，其碳排放占比如下图所示（图 6）。



来源：石油和化学工业规划院

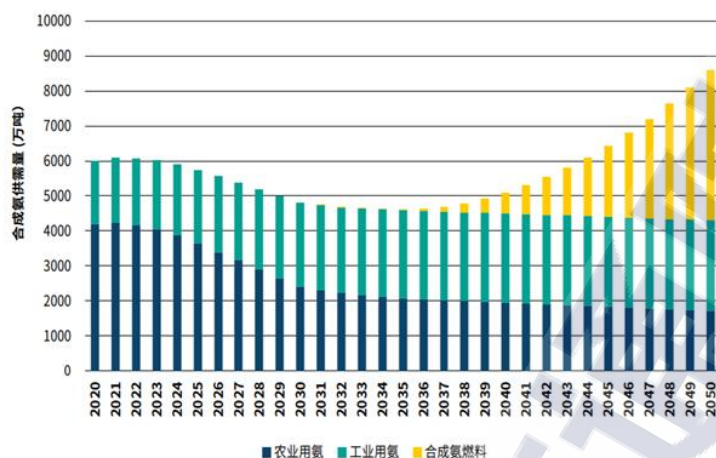
图 6 我国石化化工重点子行业碳排放占比图（2021）

（2）石化化工行业低碳发展面临的挑战：

一是我国石化化工行业需求量将持续上涨。石化化工行业是难减排行业中为数不多的整体需求量仍在增长的部门，石化化工行业低碳转型的一大挑战是相关产品需求仍有持续上涨趋势。根据相关研究预测¹⁵，未来合成氨消费量将先降后升，主要需求来源为农业、工业和船用燃料；甲醇消费量将先升后降，主要需求来源包括乙烯制取、甲醇燃料和传统下游（图 7 和图 8）。大宗产品领域产能过剩与部分产品短缺并存，产品结构和产能优化迫在眉睫。

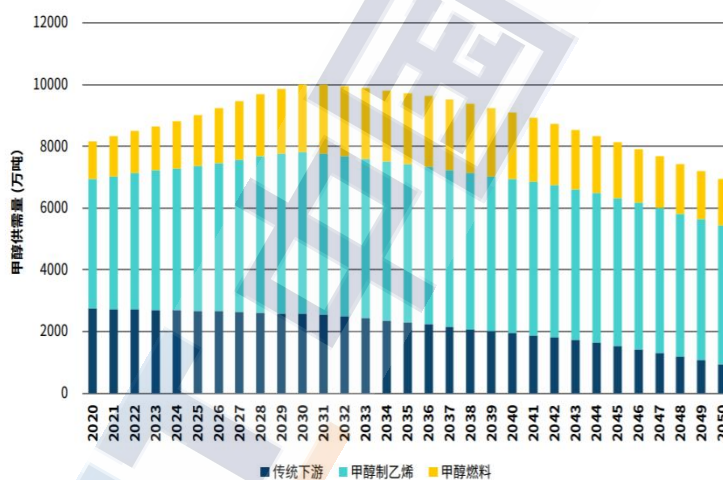
¹⁴ 数据来源：石油和化学工业规划院。

¹⁵ 落基山研究所，碳中和目标下的中国化工零碳之路，2021。



来源：落基山研究所

图 7 合成氨需求量预测



来源：落基山研究所

图 8 甲醇需求量预测

二是能效偏低，面临低碳技术突破和应用双重挑战。与发达国家相比，我国石化化工行业的能源消费以焦煤为主，煤和焦炭用量约占 50%以上，且能源利用效率较低，达到能效标杆水平的产能比例在 10%左右，低于能效基准水平的产能比例在 30%左右。目前，

美国的余热利用率为 60%，欧洲的余热利用率是 50%，而我国石化化工行业生产过程中余热利用率只有 30%¹⁶。石化化工行业现有产业技术基础，难以满足行业绿色低碳发展需求，高碳排放生产环节缺少显著降碳的技术手段。受复杂流程制约，低碳单元技术需要在总流程优化的基础上才能体现最大低碳价值，新技术与现有流程耦合难度大，多能耦合的智慧低碳能源系统在石化化工行业尚未应用。

2.石化化工行业低碳发展路径与推进策略

石化化工行业绿色低碳发展，需要从产业结构、能源和资源以及原料绿色化等方面着手：

（1）在产业结构方面：一是**淘汰落后产能**，淘汰小规模裂解装置，提升上下游一体化发展水平，控制碳排放强度较高的煤/甲醇制烯烃产能；二是**调整产品结构**，推广炼化一体化项目，提高石化化工产品比例，原油直接裂解制烯烃，省略了原料炼制石脑油过程；三是**适度利用进口资源**，适度保持一定量的基本有机原料及下游石化化工产品的进口，拓展石化化工原料供给渠道，构建国内基础稳固、国际多元稳定的供给体系。

（2）在能源方面：一是**提升能效**。首先是装置节能，优化锅炉运行，使用低碳燃料替代高碳燃料，从设备配置及选型、优化能量系统集成、优化控制系统等方面入手实现装置节能。其次是数字赋能，石化化工行业耗能设备多，生产具有连续性，过程复杂，智能化、精细化、数字化的作用格外凸显，通过技术改造、系统优化，

¹⁶ 石油和化学工业规划院。

提高数字化程度，促进节能降耗和碳减排。**二是提升电气化率。**采用电加热蒸汽裂解的方式，利用电加热代替化石燃料产生蒸汽，用于石脑油裂解、制乙烯等工艺，在使用可再生能源电力的情况下，有望实现减排 90%，促进工艺过程深度电气化；另一种提高电气化率的路径是采用电化学还原二氧化碳直接制乙烯，绿电条件下，该方法能减少 20%-30% 的乙烯生产过程碳排放¹⁷。**三是发展绿氢。**氢气是石化化工行业的重要原料，也是石化化工行业碳排放来源之一，绿氢是该行业实现脱碳的关键路径，当绿氢成为稳定足量的低价氢源时，绿氢将更好的促进石化化工行业脱碳。根据德勤的研究，低排放氢气制取成本未来有望降低，在系统成本方面比电气化更具优势。

（3）在原料绿色化（轻质原料替代）方面：一是推进蒸汽裂解原料轻质化：我国蒸汽裂解制乙烯工艺路线占 78.5%，裂解料中石脑油原料占比偏高，轻烃占比偏低，未来提高石油裂解料中轻质化原料的比重，可有效降低碳排放。**二是适度发展低碳原料，增加天然气作为石化化工原料使用规模。**推进天然气制氢替代煤制氢，石化化工行业煤炭原料主要用于制氢，2021 年煤制氢碳排放约 1800 万吨，如果用天然气制氢代替煤制氢，碳排放可下降约 900 万吨¹⁷。**三是促进生物基材料发展：**利用可再生生物质，包括农作物、树木和其他植物及其残体和内含物为原料，通过生物、化学以及物理等手段制造新型材料，能够有效减少对石油的消耗，同时这类新型材料的可降解性优于石油基产品，有利于减少塑料废弃物污染。

¹⁷ 北京大学能源研究院，中国石化行业碳达峰碳减排路径研究报告，2022.

（4）在资源循环利用方面：开展塑料循环经济，加强塑料的化学回收。利用炼化、煤化工装置所排二氧化碳纯度高、捕集成本低等特点，开展二氧化碳规模化捕集、封存、驱油和制化学品等，开展二氧化碳与副产氢气、富氢物料融合技术研究。推动石化化工行业与电力、轻工、建材、化纤等相关行业开展多行业交叉融合，提高资源转化效率，实现协同减碳。

3.石化化工行业低碳发展技术需求与路线

综合来看，中国石化化工行业应多措并举、全面发力开展低碳工艺技术变革，促进行业尽快减排、尽早达峰。分阶段低碳技术革新时间表和路径图如图9所示。

第一阶段：2023-2030年达峰阶段，以现有成熟低碳技术推广应用为重点，同时开展前瞻低碳技术的集中攻关。在这一阶段，随着汽柴油消费的稳步下降，集中攻关原油催化裂解多产化学品技术，投入原油制化学品项目的研发。**第二阶段：2030-2040年快速减排阶段，**低碳技术变革以发展绿氢、深度电气化技术为重点，推进行业快速降碳。在这一阶段，电动汽车和氢燃料电池汽车快速发展，原油加工量逐步降低，石化化工产品产量先升后降。**第三阶段：2040-2060年碳中和阶段，**这一阶段各类化石燃料和化石能源制氢的绿色替代比例将达到较高水平。在这一阶段，汽柴油消费稳步下降，煤油消费先稳后降，非石脑油路线制乙烯占比达到35-40%¹⁸，电加热蒸汽裂解等工艺过程深度电气化技术开始普及推广。

¹⁸ 北京大学能源研究院，中国石化行业碳达峰碳减排路径研究报告，2022.



来源：中国信息通信研究院

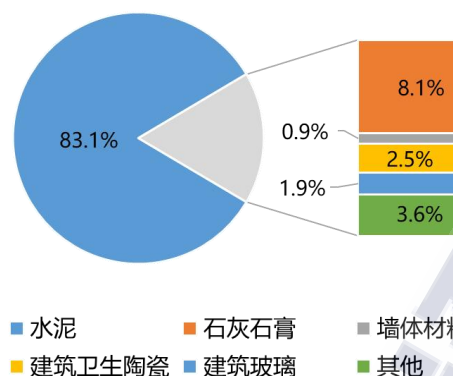
图9 石化工业绿色低碳技术需求和路线图

（三）建材行业

1.我国建材行业碳排放的现状与挑战

（1）建材行业碳排放的现状：建材行业是我国国民经济的基础产业和支柱产业之一，也是碳排放量较大的行业之一。2020年我国建筑材料二氧化碳排放量约14.8亿吨（不含用电间接排放），约占全国排放总量13.2%，占工业部门年排放量17%¹⁹。建材行业碳排放主要来源是水泥行业（图10），2020年建材行业中水泥碳排放量约12.3亿吨，占我国建材行业总碳排放的83%，其中燃料燃烧占比为30%，石灰石原料分解占比为60%，用电间接排放占比为10%¹⁹。因此，水泥行业低碳发展是建材行业碳减排的重点和难点。

¹⁹ 中国建筑材料联合会，中国建筑材料工业碳排放报告（2020年度），2021.



来源：中国建筑材料联合会

图 10 建材行业碳排放结构

（2）建材行业低碳发展面临的挑战：一是熟料产能过剩局面仍未改变，技术装备水平短期内不具备跨越式发展可能。2022 年，我国熟料产能利用率 61%，创近年来新低，其中华东、中南、西南地区产能利用率在 80%左右，而西北、华北、东北不足 50%，建材行业产能过剩局面依然没有改变²⁰。此外，中国水泥行业生产线近 100%采用新型干法水泥生产技术和装备，在规模、技术装备水平上已达国际先进水平，短期内再次实现跨越式发展的可能性不大。二是建材行业能耗高于国外先进水平，节能降碳改造难度大。我国的主要建材产品水泥、玻璃、建筑卫生陶瓷的能耗都比国外同类产品的能耗高 10%-50%²¹。传统建材在生产过程中不仅消耗大量的天然资源和能源，还向大气中排放大量的有害气体（CO₂、SO₂、NO_x等），向地域环境排放大量固体废物，向水域环境排放大量污水。某些建筑装饰、装修材料在使用过程中释放出对人体健康有害的挥发

²⁰ 中国建筑材料科学研究总院有限公司，中国水泥行业碳中和路径研究，2023。

²¹ 同继锋等，绿色建材，化学工业出版社，2015。

物。废旧建筑物被拆除后，被废弃的建筑材料通常不再利用，而成为又一环境污染源。

2. 建材行业低碳发展路径与推进策略

建材行业低碳发展，主要依靠原料、燃料的低碳替代以及绿色电力的使用，需要原料低碳、燃料减碳、工艺过程节能等环节的技术创新支撑。

(1) 强化源头管控。一是**低碳水泥设计与研发**。设计研发非硅酸盐矿物为主导矿相的新型熟料体系，降低熟料生产过程中石灰石消耗量；改变水泥矿物组成，采用低钙水泥基材料代替高钙水泥基材料，降低熟料中碳酸钙的占比。二是**逐步减少碳酸盐用量**。加快水泥行业非碳酸盐原料替代，在保障水泥产品质量的前提下，提高磷石膏、氟石膏、锰渣、赤泥、钢渣等含钙资源替代石灰石比重，全面降低水泥生产工艺过程的二氧化碳排放。

(2) 调整用能结构。一是**开发替代燃料**。利用生物质燃料等可燃废弃物替代燃煤，开发替代燃料高热值、低成本、标准化预处理；完善农林废弃物规模化回收等上游产业链配套，形成供给充足稳定的衍生燃料制造新业态，提升水泥等行业燃煤替代率。二是**清洁绿色能源加快应用**。逐步减少建材行业燃煤加热、烘干炉（窑）、燃料类煤气发生炉等燃煤使用，加大天然气和电等使用比例；采用分布式光伏等可再生能源，降低外购电力消耗，实现能耗与碳排放的降低。三是**提高能源利用效率水平**。加强计量和能源数据的在线监控，建立能源管控中心，及时根据生产变化合理调整能源的使用和分配，

挖掘开拓节能潜力，不断提高工艺控制水平，节约能耗物耗。

（3）加快科技创新。一是研发突破重大关键低碳技术。突破全氧、富氧、电熔等工业窑炉节能降耗技术，探索开展负排放应用可行性研究，加大低温余热高效利用技术研发推广力度，加快气凝胶材料研发和推广应用。二是推广应用节能降碳技术装备。玻璃行业推广浮法玻璃一窑多线等技术，陶瓷行业推广干法制粉工艺及装备，岩棉行业推广电熔生产工艺及技术装备，石灰行业推广双膛立窑、预热器等节能技术装备。三是数字化赋能行业节能减排。通过数据采集分析、窑炉优化控制等提升能源资源综合利用效率，促进全链条生产工序清洁化和低碳化。

（4）实施绿色管理。一是全生命周期绿色管理。加强全生命周期绿色管理，推行产品绿色设计，建设绿色工厂，协同控制污染物和碳排放，构建绿色制造体系。二是构建绿色建材产品管理体系，加大绿色建材应用。提高建材产品深加工比例和产品附加值，加快向轻型化、集约化、制品化、高端化转型，加快发展生物质建材。三是完善绿色制造管理体系。完善绿色低碳发展政策体系，打造绿色公共服务平台，健全绿色制造标准体系，贯通绿色供应链管理。

（5）调整产业结构。一是低效产能有序退出。针对水泥、平板玻璃、建筑陶瓷等主要碳排放行业，加强总量控制，严控新增产能，有序引导低效产能退出。二是推进产业链价值链高端化。提高建材产品深加工比例和产品附加值，推进产业链、价值链向高附加值、高质高端迈进，推动建材产业向轻型化、终端化、制品化转型。三是协同处置固废。水泥窑协同处置生活垃圾，推进燃料原料替代，

加大使用矿物掺合料，在提高混凝土性能的同时，减少对增加熟料水泥产量的需求。

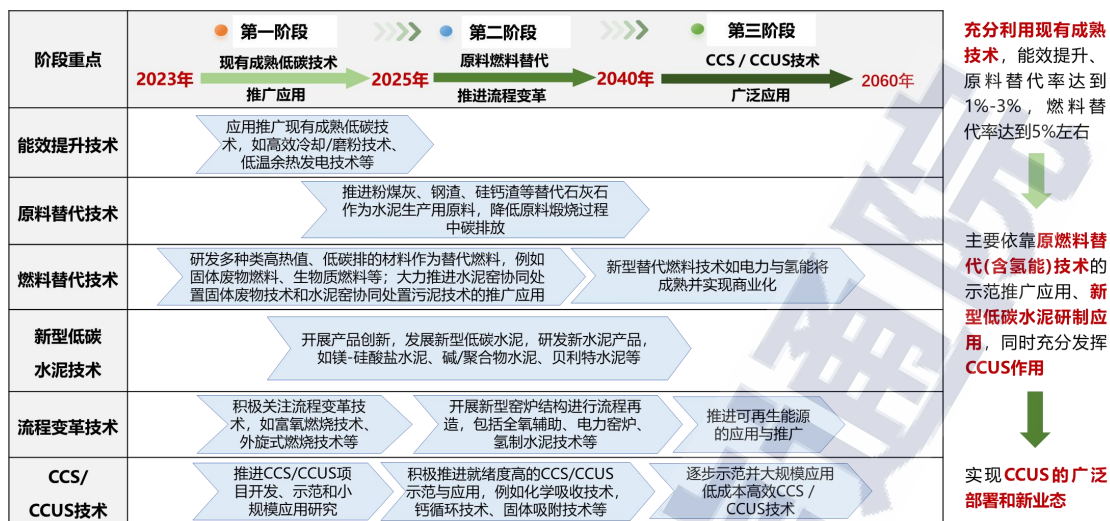
3. 建材行业低碳发展技术需求与路线

在碳中和愿景下建材行业低碳技术发展需要结合我国国情及行业发展，基于行业及技术发展现状，有序推进建材行业低碳技术革新，低碳发展技术需求和路线如图 11 所示。

第一阶段：2025 年之前，建材行业需充分利用现有成熟技术，能效提升、原料替代率达到 1%-3%，燃料替代率达到 5%左右²²。积极推进生料粉磨能效提升、熟料烧成能效提升、水泥粉磨能效提升等能效提升技术的研发，实现极致能效提升和低效高排放产能退出。

第二阶段：到 2040 年，在能效提升技术实现较好的节能降碳效果，以及原燃料替代技术研发基础上，主要依靠原燃料替代(含氢能)技术的示范推广应用、新型低碳水泥研制应用，同时充分发挥 CCUS 作用(包含二氧化碳建材化利用)。**第三阶段：**到 2060 年，在能效提升技术、替代燃料技术、替代原料技术、新型低碳水泥技术研究的基础上，实现 CCUS 的广泛部署和区域新业态。

²² 中国建材集团有限公司，建材行业碳减排技术路径研究，2021.



来源：中国信息通信研究院

图 11 建材行业绿色低碳技术需求和路线图

(四) 时间表和技术路线图

1. 工业绿色低碳发展技术体系

工业领域的绿色低碳技术可分为四类（图 12）：源头供给端的零碳技术、工业消费端的减碳技术、末端治理的负碳技术以及管理端的管碳技术。另外，数字技术能够与各类零碳、减碳、负碳、管碳技术相融合促进节能减排，也应属于绿色低碳技术的范畴。工业绿色低碳技术应从源头供给端、工业消费端、末端以及管理端四端发力，重点部署可再生能源、资源开采等共性基础与行业关键技术，优先布局 CCUS 等前瞻性技术。



来源：中国信息通信研究院

图 12 工业领域绿色低碳技术体系图

重点行业绿色低碳关键技术包括但不限于²³：**钢铁行业**：全废钢电炉流程集成优化技术、富氢或纯氢气体冶炼技术、钢化一体化联产技术、高品质生态钢铁材料制备技术。**水泥行业**：低钙高胶凝性水泥熟料技术、水泥窑燃料替代技术、少熟料水泥生产技术及水泥窑富氧燃烧关键技术等。**化工行业**：可再生能源规模化制氢技术、原油炼制短流程技术、多能耦合过程技术、绿色生物化工技术以及智能化低碳升级改造技术。**有色行业**：新型连续阳极电解槽、惰性阳极铝电解新技术、输出端节能等余热利用技术，金属和合金再生料高效提纯及保级利用技术，连续铜冶炼技术，生物冶金和湿法冶金新流程技术。**资源循环利用与再制造**：废旧物资高质循环利用、含碳固废高值材料化与低碳能源化利用、多源废物协同处理与生产

²³ 科技部，国家发展改革委，工业和信息化部等，科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022-2030年），2022.

生活系统循环链接、重型装备智能再制造等技术。

2. 工业碳减排技术应用挑战

绿色能源的不稳定性与工业连续生产之间的矛盾。风电、光伏等可再生能源具有三个重要的自然属性：间歇性、波动性和季节性，这与工业企业连续生产用电、用氢等需求之间的矛盾还需要研究解决，现有电网交易机制下如何保障绿电制绿氢也有待进一步探索。

替代原料供应有限，难以支撑行业深度脱碳。随着工业深度脱碳，工业废渣等替代原料的可用量将成为挑战。废钢资源产出量相对有限，近中期我国废钢资源的产出仍存在一定的不确定性，废钢资源限制不利于废钢使用成本的下降，电炉短流程替代高炉的占比或不及预期。

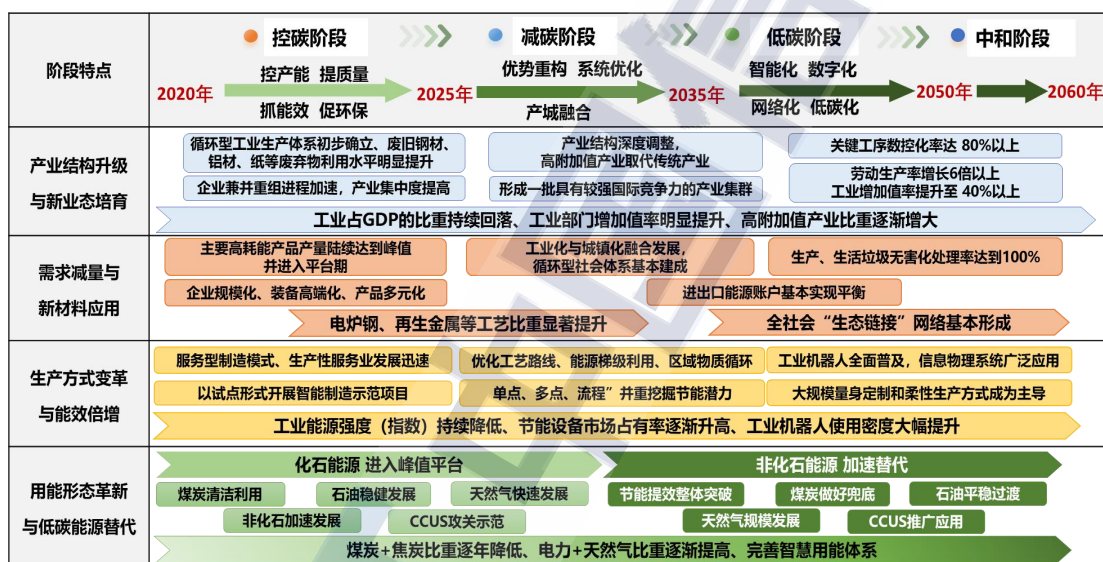
低碳技术成本高，技术研发动力不足。CCUS 技术通常二氧化碳浓度越高，捕集能耗和成本越低，在石化化工领域的捕集成本相对较低，为 105~250 元/吨二氧化碳。钢铁、水泥的捕集成本较高，捕集成本分别为 230~380 元/吨、180~730 元/吨二氧化碳。氢冶金等低碳技术成本高，全氢气炼铁的燃料成本约 1400 元/吨，传统高炉的燃料成本在 954-972 元/吨²⁴。

3. 工业绿色低碳发展时间表路线图

总体来看，重点工业领域减碳路径主要从五大方面着手，分别为结构调整、能效提升、需求减量、低碳能源、技术创新。基于五大方面，提出具体的行业发展指标、明确行业关键技术，细化行业

²⁴ 张贤，李阳，马乔，刘玲娜，我国碳捕集利用与封存技术发展研究，中国工程科学，2021,23,6.

减碳路径。基于重点行业的绿色低碳发展路径，工业的绿色低碳发展可分为控碳阶段、减碳阶段、低碳阶段和中和阶段。在各阶段，产业结构、工业需求量、生产方式、用能形态等方面具有不同的阶段特点（图13）。在控碳阶段，重点关注控产能、提质量、抓能效、促环保；在减碳阶段，重点关注优势重构、系统优化和产城融合；在低碳阶段，重点关注智能化、数字化、网络化、低碳化；从而达到碳中和效果，到达中和阶段。



来源：中国信息通信研究院

图13 工业绿色低碳发展时间表、路线图

四、政策建议

我国绿色低碳发展产业政策基调经历了从重经济发展到重绿色低碳发展的历程，具体措施从行政手段为主发展为行政与市场相结合。但政策机制支撑保障尚需完善，例如顶层设计有待进一步健全，技术、标准和监管等支撑要素有待进一步强化、市场化推进机制不

完善，资源环境要素价格机制作用发挥不够，财税金融支持有待加强、绿色改造融资难。双碳背景下，需要从政府和企业、行业和区域两个维度，处理好“内和外”、“新和旧”、“堵和疏”三个关系，构建工业绿色低碳发展的责任体系、政策体系、市场体系和科技体系四个体系，具体建议如下：

（一）强化减碳责任，推动工业绿色低碳发展上下联动

政府侧，健全法律法规，强化规划引领。构建促进工业绿色低碳发展的专门法律法规，制定出台工业节能监察管理办法、机电产品再制造管理办法、新能源汽车动力电池回收利用管理办法等部门规章，促进绿色低碳转型的规范化、制度化和程序化。深入落实《“十四五”工业绿色发展规划》等政策文件，将其目标、任务等融入国民经济中长期规划及其他各类规划，加强各类规划衔接协调。不断完善工业绿色低碳发展政策环境，引导全社会共同发力促进工业节能增效。从改造升级传统产业、巩固提升优势产业、培育壮大新兴产业、前瞻布局未来产业四个方面，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，深度调整优化产业结构。

区域侧，落实目标任务，推动差异化发展。各地区要发挥各自优势，因地制宜，突出特色，构建差异化绿色低碳发展格局，系统落实工业以及钢铁、石化化工、建材、有色等各子领域碳达峰系列行动计划和实施方案，并加快制定具体工作方案、奖补措施等。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，构建绿色低碳先进制造业产业集群。

企业侧，调动主观能动性，承担主体责任。加快培育行业龙头企业和专精特新中小企业，推动产品升级、服务升级、消费升级。央企国企、行业龙头企业等加强引领带动，做好示范表率，聚焦产业链上下游、供应链前末端、大中小企业融通协同减碳。重视中小企业低碳发展，鼓励中小企业紧跟龙头企业的步伐，从识别需求、转型实践、深度应用等方面进一步拓展中小企业绿色发展的路径，丰富中小企业低碳转型的相关经验。引导原材料、零部件、整机企业形成合力，化解上下游企业的减碳重点和减碳期望方面的矛盾，构建良性循环，实现合作共赢。

（二）强化政策引导，统筹工业重点领域绿色低碳发展

强化目标约束，持续推动重点领域节能诊断监察。充分调动行业力量，围绕钢铁、有色、建材等重点领域，开展重点企业和重点用能设备的节能监察。有条件的地方构建节能诊断平台，完善线上数据统计、节能趋势分析等服务。各行业和企业结合诊断结果开展针对性低碳改造，地方优先支持相关企业申报节能改造专项资金。

打造先进典型，强化工业绿色制造最佳实践供给。持续完善绿色制造和服务体系，动态梯级遴选绿色工厂、绿色低碳工业园区、绿色低碳供应链、绿色设计示范企业等，为各类主体提供可复制、可推广的经验做法，有效引导工厂、园区等加速绿色低碳改造，不

断打造绿色增长新引擎。加大绿色制造整体解决方案供给和推广，培育一批优质、高效、专业的绿色制造服务企业，从规划设计、诊断咨询、系统集成、设施建设、运营管理等方面为工业企业提供“设计+制造+服务”的系统解决方案，形成绿色制造和服务融合发展的产业生态。探索绿色制造市场化促进机制，将绿色优势转化为绿色效益，激发转型内生动力。

完善碳排放管理机制，为碳排放“双控”提供制度支撑。加快形成不同行业组织层面和产品层面科学合理的碳排放核算和统计方法，科学制定工业企业碳配额分配方案，出台更严格的碳排放控制目标，逐步将更多重点行业纳入全国碳市场。按照建立全国统一大市场要求，逐步缩小不同地区和行业企业间的用能水平差距；完善碳市场竞争和监管制度，增加对企业的经济补贴和税收优惠，促进交易活跃度。出台更详细的碳交易规则并加强执法力度，建立跨部门协同监管机制。

（三）强化科技创新，增强工业绿色低碳发展技术支撑

强化绿色关键技术研发，增强绿色低碳创新动力。发挥举国体制优势，超前布局氢冶金、高效储能、氢能、碳捕集利用封存等领域前沿技术和颠覆性技术，加强基础研究。鼓励企业依托重大专项、研发技术等部署一批低碳、零碳、负碳核心关键技术。推动钢铁、石化化工、有色等重点工业领域加快数字化转型，利用工业互联网、区块链、人工智能等数字技术实现绿色研发、低碳生产、能源资源优化和碳管理。各行业持续完善国家重点低碳技术目录，加快低碳

技术推广应用。

完善绿色低碳标准体系，发挥标准引领示范作用。各行业要加快推进能耗标准、碳排放碳足迹标准、节能诊断技术规范、绿色低碳评价等重点标准的制修订。风电、光伏领域要加快填补发电效率标准、老旧设备淘汰等标准空白，为新型产品设备更新改造提供技术依据。要充分利用各种媒体、平台和绿色化主题会议论坛，开展全方位、多层次的标准普及和宣传，提升企业学标对标意识和能力。

加大财税金融支持力度，强化政府加大低碳技术投资。要统筹利用绿色工业发展基金、节能减碳和环境治理专项等财政资金，支持工业绿色低碳发展。深化落实现行节能节水专用产品设备和项目企业所得税、固定资产加速折旧等优惠政策。推动银行类金融机构加强大数据、区块链、云计算、人工智能等科技在绿色金融领域的创新应用，以便为绿色金融产品创新研发、承保理赔、风险服务等提供更高质量、更全面的数据支持。

（四）强化需求牵引，扩大工业绿色低碳发展市场空间

完善绿色政府采购，强化绿色工业品政府引导。推动完善绿色采购标准，不断扩大政府采购绿色产品和服务、创新产品和服务及民办绿色产品和服务的范围。结合产业发展需求探索对钢铁、水泥、有色、建材等部分领域需求较大的国有企业纳入政府采购试点。

开展绿色供应链管理，刺激行业绿色低碳行为。要加快制定完善重点产品碳足迹标准，降低供应链的碳足迹。进一步完善绿色供应链管理体系，增加节能降碳、数字化赋能等内容，推动企业开展

绿色设计、实施绿色采购、开发绿色工艺、做好绿色回收等，实现全链条全流程绿色化。重点行业“链主”企业发布绿色低碳计划，可以通过订单要求、供应商筛选等途径倒逼上游企业开展绿色管理。

积极倡导绿色消费，倒逼工业企业绿色生产。通过网络、电视等方式，开展绿色价值观宣传教育，引导绿色消费行为，提高大众绿色消费意识。可采取发放绿色消费券等方式推动绿色节能商品销售使用。利用大数据、区块链等技术完善绿色产品溯源，实现绿色产品一码辨别、查询和维权等。

（五）强化国际合作，积极参与全球工业绿色低碳治理

推动国际绿色金融合作。国家层面进一步扩大金融开放，加快相关制度规则与国际对接，推动与其他国家双边绿色金融、项目合作，吸纳境外资本参与我国和“一带一路”绿色低碳融资。有序引导我国绿色发展基金、银行、投资机构等对外绿色投资。

促进国际绿色产业合作。光伏组件、风电装备、数字技术赋能绿色化等优势领域的企业，要加速推动“中国工业绿色低碳方案”输出，政策上在财税、信贷、通关、质检、出入境等方面给予一定支持。塑造面向碳中和的全球绿色合作新机制，促进中国工业绿色发展成果和经验的全球共享。

支持国际绿色工业贸易。推动研究机构、行业协会、龙头企业等开展绿色产品、碳足迹等领域标准、认证等国际互认合作。搭建绿色贸易合作平台，依托多边、双边工作组、论坛、进出口博览会等，加强中国工业脱碳技术、产品、服务的国际交流，加强对绿色

低碳产品出口的信贷、投资、关税支持。联合政府和市场力量，强化绿色低碳产品主要出口目的地的政策咨询、市场预测、供需对接等出口服务。

CAICT 中国信通院

中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-68094556

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn

