

北京大学能源研究院气候变化与能源转型项目

中国石化行业 碳达峰碳减排路径 研究报告

THE ROADMAP TO DECARBONIZE THE PETROCHEMICAL INDUSTRY IN CHINA



中国石油消费总量控制和政策研究项目 (油控研究项目)

中国是世界第二大石油消费国和第一大石油进口国。石油是中国社会经济发展的重要动力，但石油的生产和消费对生态环境造成了严重破坏；同时，石油对外依存度上升也威胁着中国的能源供应安全。为应对气候变化和减少环境污染，“中国石油消费总量控制和政策研究”项目（简称油控研究项目）于2018年1月正式启动。油控研究项目在自然资源保护协会、能源基金会，以及国内外政府研究智库、科研院所和行业协会等二十余家有影响力的单位的合作与共同努力下，旨在促进石油资源安全、高效、绿色、低碳的可持续开发和利用，助力中国跨越“石油时代”，早日进入新能源时代，为保障能源安全、节约资源、保护环境和公众健康以及应对气候变化等多重目标做出贡献。



北京大学能源研究院
INSTITUTE OF ENERGY

北京大学能源研究院是北京大学下属独立科研实体机构。研究院以国家能源发展战略需求为导向，立足能源领域全局及国际前沿，利用北京大学学科门类齐全的优势，聚焦制约我国能源行业发展的重大战略和科技问题，按照“需求导向、学科引领、软硬结合、交叉创新、突出重点、形成特色”的宗旨，推动能源科技进展，促进能源清洁转型，开展专业及公众教育，致力于打造国际水平的能源智库和能源科技研发推广平台。

气候变化与能源转型项目 (CCETP)

北京大学能源研究院于2021年3月启动了气候变化与能源转型项目，旨在助力中国应对气候变化和推动能源转型，实现2030年前碳达峰和2060年前碳中和的目标。该项目通过科学研究，设立有雄心的目标，制定清晰的路线图和有效的行动计划，为政府决策提供建议和支持。

该项目积极推动能源安全、高效、绿色和低碳发展，加速化石能源消费的减量化直至退出。该项目具体的研究领域涵盖宏观的能源与环境、经济和社会的协调综合发展；化石能源消费总量控制；能源开发利用技术创新；电力部门向可再生能源为主体的系统转型；推动电气化；高耗能部门的低碳绿色发展；可持续交通模式；区域、省、市碳中和模式的示范推广；散煤和塑料污染治理；碳中和与碳汇；碳市场；社会公正转型等。

本报告是油控研究项目的子课题之一，报告内容为课题组独立观点，不代表其他方的任何观点或立场。

油控研究项目系列报告

- 《中国石化行业碳达峰碳减排路径研究报告》
- 《中国塑料行业绿色低碳发展研究报告》
- 《中国可持续航空燃料发展研究报告》
- 《“十四五”公路交通领域石油消费达峰研究》
- 《“十四五”城市公共领域电动汽车运营评价与经验分享》
- 《“十四五”石化行业高质量发展研究》
- 《“十四五”财税手段支持油控路径的规划研究》
- 《“十四五”绿色金融支持油控路径的政策研究》
- 《中国石油消费总量控制对经济的影响分析》
- 《中国塑料的环境足迹评估》
- 《中国农村地区电动汽车出行研究(2.0版)》
- 《中国汽车全面电动化时间表的综合评估及推进建议(2.0版)》
- 《中国传统燃油汽车退出进度研究与环境效益评估》
- 《中国城市公共领域燃油汽车退出时间表与路径研究》
- 《中国重型货运部门减油路径评估》
- 《中国石油消费总量达峰与控制方案研究》
- 《中国石油消费情景研究(2015-2050)》
- 《国际石油消费趋势与政策回顾》
- 《中国石油消费总量控制的财税政策研究》
- 《中国石油消费总量控制体制机制改革研究》
- 《油控情景下杭州市碳减排路径研究》
- 《中国石油真实成本研究》
- 《石油开采利用的水资源外部成本研究》
- 《中国石油消费总量控制的健康效应分析》
- 《中国传统燃油汽车退出时间表研究》

CCETP 其他相关报告

- 《新能源为主体的新型电力系统的内涵与展望》
- 《中国典型省份煤电转型优化潜力研究》
- 《电力部门碳排放达峰路径与政策》
- 《中国散煤综合治理研究报告 2021》
- 《“十四五”推动能源转型实现碳排放达峰》

中国石化行业碳达峰 碳减排路径 研究报告

**The Roadmap to Decarbonize
the Petrochemical Industry
In China**

作者

油控研究项目课题组

2022年11月

致谢

石化行业是重要的高耗能和高碳排放行业，其未来发展将很大程度上影响中国整体的碳达峰碳中和进程。为助力中国双碳目标的实现，我们组织此次研究工作，意在摸清行业的碳排放现状，探索行业低碳绿色发展路径。在调研和报告撰写过程中，我们有幸获得众多来自政府主管部门、产业界和研究机构专家的协助，受益于他们所提供的信息和专业的意见。我们非常感谢他们的大力支持，尤其感谢白荣春、戴彦德、李永亮、田涛、王敏，Tom Sanzillo 等专家（以上中文姓名按拼音首字母顺序排列）。同时，感谢彭雨豪、赵若婷和张喆在资料整理方面的协助。

如果您对报告有何意见建议，请联系：contact@ccetp.cn

目录

前言	viii
执行摘要	ix
第1章 碳减排背景下的中国石化行业	1
1.1 重要的高能耗和高碳排放行业	2
1.2 石化行业可在能源转型中发挥重要的节点作用	2
1.3 石化行业将发生结构性变化	3
第2章 中国石化行业碳排放现状	4
2.1 行业发展规模	5
2.2 碳排放现状	8
第3章 基准情景下的碳排放预计	24
第4章 中国石化行业碳减排路径分析	29
4.1 产业结构调整	30
4.2 节能降耗及深度电气化	32
4.3 轻质原料替代	34
4.4 发展绿氢	37
4.5 CCUS与化工行业碳利用	38
4.6 主要路径碳减排潜力综合评估	40
第5章 中国石化行业碳达峰碳减排路线图与效益评估	42
第6章 政策建议	45
附录	47

图目录



图2-1: 2021年中国石油加工流向图.....	6
图2-2: 全球“三烯三苯”产能分布.....	7
图2-3: 2021年中国石化行业碳排放量结构分布.....	9
图2-4: 炼油过程碳排放结构.....	13
图2-5: 石油路线蒸汽裂解制乙烯生产碳排放结构.....	14
图2-6: 对二甲苯 (PX) 生产碳排放结构.....	17
图2-7: 聚乙烯生产碳排放结构.....	18
图2-8: 聚丙烯生产碳排放结构.....	19
图2-9: PTA生产碳排放结构.....	20
图2-10: 乙二醇生产碳排放结构.....	21
图2-11: 聚酯生产碳排放结构.....	23
图3-1: 基准情景下中国石化行业碳排放预测.....	28
图4-1: 中国炼油产能.....	30
图4-2: CCUS技术流程及分类示意图.....	39
图4-3: 碳减排情景与基准情景的碳排放比较.....	40
图4-4: 中国石化行业主要碳减排路径减排潜力.....	41
图5-1: 采取碳减排路径后取得的节油效益.....	44

表目录

////////////////////////////////////

表2-1: 2021年中国石化行业碳排放量	8
表2-2: 2021年中国石化行业重点子行业碳排放量	9
表2-3: 2021年中国石化行业重点子行业碳排放结构	10
表2-4: 中国炼油行业供需平衡现状	11
表2-5: 中国近年来成品油供需平衡情况	12
表2-6: 中国近年来乙烯供需平衡现状 (石油原料乙烯)	13
表2-7: 中国近年来丙烯供需平衡	15
表2-8: 中国近年来芳烃供需平衡情况	15
表2-9: 中国近年来聚乙烯供需平衡情况	17
表2-10: 中国近年来聚丙烯供需平衡情况	19
表2-11: 中国近年来PTA供需平衡情况	20
表2-12: 中国近年来乙二醇供需平衡情况	21
表2-13: 中国近年来聚酯类产品供需平衡情况	22
表3-1: 基准情景特点	25
表3-2: 基准情景下中国石化产品产量情况	26
表3-3: 基准下中国石化行业碳排放预测	27
表4-1: 汽驱和电驱能耗及碳排放对比	33
表4-2: 中国部分乙烷制乙烯项目	35
表4-3: 中国不同原料制氢排放二氧化碳情况	37
表4-4: 中国石化行业主要路径碳减排潜力汇总表	41
表5-1: 中国石化行业碳减排时间表	43
附录表: 常见石化燃料特性参数推荐值	49

前言

石化行业是重要的高能耗和高碳排放行业，也是国民经济不可或缺的重要行业。2021年中国仅石油基石化产品的碳排放就占全社会碳排放的4%左右。石化行业产品涉及燃料和材料两大领域，为社会提供从燃油、“三烯三苯”到合成树脂、合成纤维、合成橡胶等各种能源及化工产品。中国石化产品的人均消费仍然显著低于发达国家，石化行业还有较大增长空间，这意味着其低碳发展的程度将在很大程度上影响中国整体的碳达峰碳中和进程。研究石化行业的碳达峰碳减排，提高加工效率，促使石化行业节约资源能源，促进行业高端化和低碳化发展，对行业减少资源能源消耗，降低环境污染有重要意义，对保障中国能源安全有重要意义，对中国“双碳”目标的实现非常重要。

本报告通过深入研究中国石化行业碳排放现状、预测基准情景下的碳排放情况、分析碳达峰碳减排路径、评估主要路径碳减排潜力，制定中国石化行业碳达峰碳减排路线图及计算减油效益，并给出了相关政策建议。本报告的分析表明，通过产业结构调整、节能降耗、深度电气化、轻质原料替代、发展绿氢以及CCUS等各种路径，与基准情景相比，中国石化行业将有望更早实现碳达峰、更少排放二氧化碳、更少消费原油。为了促进这些路径的实现，需要在控制产能、制定标准、推广技术和资金支持等方面采取切实措施。



执行摘要

1. 碳减排背景下的中国石化行业

本报告所指石化行业为以石油为原料进行化学加工的产业。石化行业与国民经济发展、人民生活和国防军工密切相关，提供包括基础化学原料（三烯三苯）、三大合成材料（合成树脂、合成纤维、合成橡胶）及其他重要化工产品在内的多种产品。本研究不包括以非石油基原料生产有机原料（三烯三苯）的行业，如煤炭或甲醇制烯烃等行业。

石化行业是重要的高能耗和高碳排放行业，是典型的原材料加工行业，也是国民经济的重要支柱产业。有研究表明2019年中国石化行业总能耗约为1.7亿吨标煤，本研究推算2021年中国石化行业总能耗约为1.95亿吨标煤，总二氧化碳排放量约4.45亿吨，占中国二氧化碳排放总量的4%左右。2021年石化行业加工了7.03亿吨石油，其中5.4亿吨来自于进口。2021年中国包括石化化工行业全行业营业收入和利润占全国工业的比重分别为11.3%和13.3%。

石化行业可在中国能源转型中发挥重要的“节点”作用。石化行业作为高能耗行业，不但目前耗电量显著，而且还具备进一步提高用电比例的潜力，其将成为消纳可再生能源电力的重要载体。石化行业是氢气最大的生产商，也是氢气最大的下游用户，石化行业将有可能成为绿氢的重要使用者。2021年石化行业所有产品的含碳量约为5.7亿吨（折20.8亿

吨CO₂）。由于产品含碳的特性，使得石化行业也具备很大的固碳潜力。

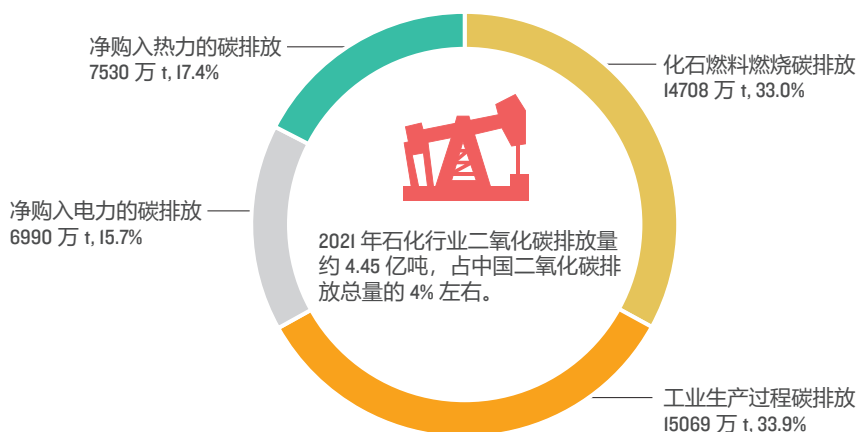
石化行业将发生结构性变化。石化行业的主要产品可以分为油品和化工产品两大类。从油品来看，社会对汽油和柴油的需求量已经达到平台期，油品消费增长潜力有限。从化工产品来看，我国基本化工原料的对外依存度仍然较高，石化产业基本原料的不足仍然是影响我国石化行业竞争力的重要因素之一。基于需求侧油品过剩、化工品不足的现状，减少油品产量、增加化工品比例的结构性调整将是石化行业长期的课题。

2. 中国石化行业碳排放现状

2021年，中国原油加工量突破7亿吨，同比增长4.3%；成品油产量（汽油、煤油、柴油合计，下同）3.57亿吨，同比增长7.9%。2021年，石油路线乙烯产量2825.7万吨，同比增长18.3%；合成材料总产量增长6.9%。

2021年，在中国石化行业碳排放量4.45亿吨中，化石燃料燃烧碳排放为1.47亿吨，工业生产过程碳排放为1.51亿吨，净购入电力的碳排放0.70亿吨，净购入热力的碳排放0.77亿吨。按照占比来分析，中国石化行业碳排放中燃料及动力（电、蒸汽）等排放占66.1%，占据主要部分，工业生产产生的碳排放占33.9%。

图1：中国石化行业2021年碳排放量及结构分布

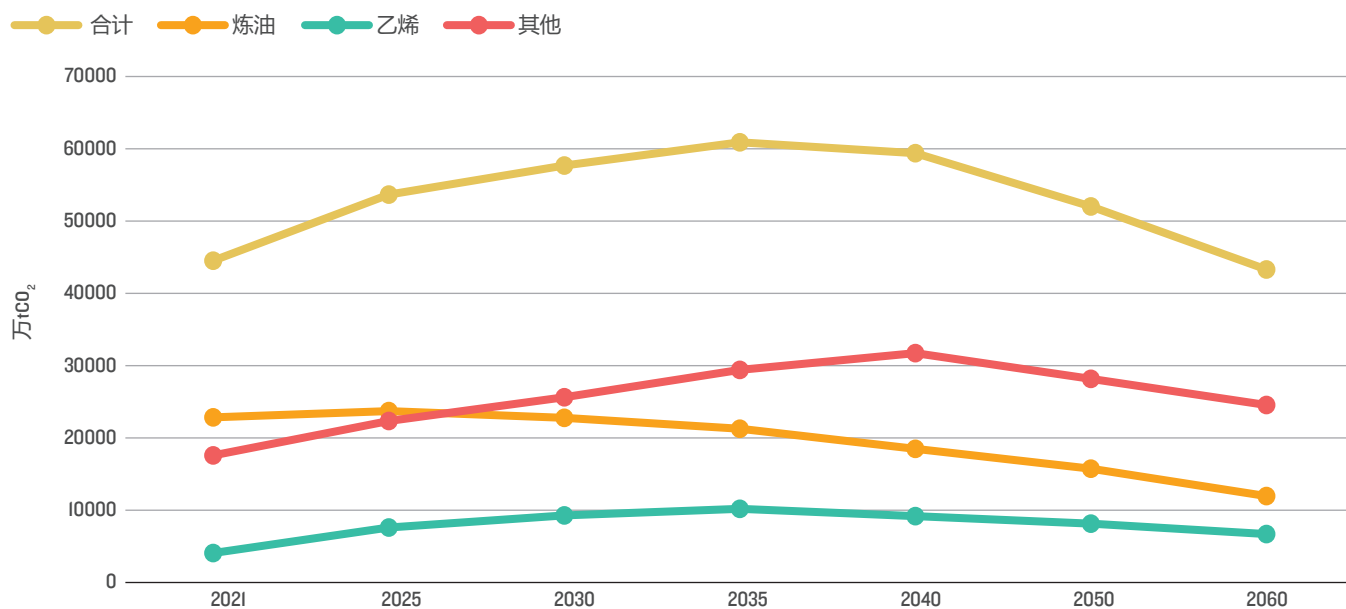


石化行业产品众多，其中最重要的产业链条为炼油 - 成品油、乙烯丙烯 - 合成树脂、芳烃 - 合成纤维等三大链条。炼油 - 成品油链条的重点子行业是炼油，乙烯丙烯 - 合成树脂链条的重点子行业是乙烯、聚乙烯、聚丙烯，芳烃 - 合成纤维链条的重点子行业是对二甲苯、PTA、乙二醇、聚酯。2021 年炼油、乙烯、聚乙烯、聚丙烯、对二甲苯、PTA、乙二醇、聚酯等八大重点子行业的碳排放量占全行业的碳排放量比例约为 76.6%。其中，炼油排放量最大，占总排放量的 51.3%，乙烯、聚乙烯、聚丙烯排放量占比分别为 9.2%、1.6% 和 1.4%，对二甲苯、PTA、乙二醇、聚酯排放量占比分别为 4.4%、2.2%、3.0% 和 3.5%。

3. 基准情景下中国石化行业碳排放预计

根据石化行业目前的发展趋势、碳排放现状、国家已经出台的涉及石化行业的相关节能降碳规划、规范、指南和发展目标，以及行业已经开始采取的降碳行动，本研究对基准情景下石化行业碳排放做了整体评估。预计全行业将于 2035 年实现碳排放达峰，峰值在 6 亿吨左右。

图2: 基准情景下中国石化行业碳排放预测



4. 中国石化行业碳达峰碳减排路径分析

从宏观角度分析，一方面石化行业目前存在炼油产能过剩、成品油大量出口、化工品仍然不足的结构矛盾，需要通过产业结构调整解决；另一方面，石化行业是高能耗、高碳排放行业，在不影响产业安全的情况下适度进口中间基础原料产品，保持一定的对外依存度，对全社会的节能减碳和“双碳”目标实现均较为有利。

从石化行业总体碳排放特征来看，化石燃料燃烧、工业生产过程排放、净购入电力和热力排放均对碳排放有较大贡献，可以分别施策、定向减碳。通过采用包括绿氢、天然气、乙烷、丙烷等在内的低碳原料可以减少工业生产过程中的排放，通过采用低碳燃料可以减少化石燃料燃烧碳排放，采用深度电气化可以减少净购入电力和热力合计的碳排放。通过 CCUS 可以减少化石燃料燃烧和工业生产过程排放等直接排放的 CO₂。通过采取各种节能降耗技术及采用数字化可以取得整体减碳的效

果。结合以上分析，中国石化行业碳达峰碳减排路径可从产业结构调整、轻质原料替代、节能降耗、发展绿氢、深度电气化、CCUS 等多方面入手。

4.1 产业结构调整

通过淘汰落后产能、推进产品结构性调整、适度利用进口资源等产业结构调整措施，到 2025 年原油加工量达到峰值 7.2 亿吨 / 年之后呈下降趋势，到 2060 年原油加工量降低至 2.8 亿吨 / 年，乙烯产量为 4500 万吨 / 年，对二甲苯产量为 2200 万吨 / 年，分别比基准情景下的 2060 年相应产量降低 2 亿吨 / 年、1500 万吨 / 年和 800 万吨 / 年，按照 2060 年基准情景下单位产品碳排放计算，共减少碳排放约 7400 万吨 / 年。

通过加大淘汰落后产能措施，2025 年前退出 8000 万吨 / 年炼油产能，通过整合现有产能、等量替换来建设更高水平的炼化一体化产能 1 亿吨 / 年炼油产能，到 2025 年中国净增炼油产能约 0.2 亿吨，达到 9.3 亿吨 / 年左右。其中千万吨级炼油企业能力将超过 5.8 亿吨，占总炼油产能比例达到 62%。到 2030 年通过进一步整合 500 万吨以下炼厂，炼油能力下降至 9 亿吨 / 年，千万吨级炼油企业能力超过 80%。

推进产品结构性调整，降低燃料油品比例，提高化工产品比例，化工轻油平均产率到 2025 年提高到 25%，到 2030 年进一步提高到 42%，到 2060 年达到约 60% 左右。

适度利用进口资源，乙烯当量自给率在 2025 年突破 70%，但到 2030 年再逐渐下降至 70%，并在以后长期保持在 70% 左右，即 2035 年乙烯消费达到 1 亿吨峰值时国内乙烯产量达到 7000 万吨，其中石油路线乙烯产量 6500 万吨。

4.2 节能降耗及深度电气化

在广泛应用石化行业绿色工艺、节能降碳技术、数字化技术的基础上，加大节能降耗，能耗及碳减排措施加大力度，进一步推广节能降碳技术应用深度，增强数字化技术。到 2060 年，与基准情景相比，全行业单位产品能耗总体水平下降 8% 左右，降低碳排放约 3500 万吨 CO₂。

石化行业是能源和电力消耗大户，直接消耗石油、天然气和煤炭等一次能源和电力、热力等二次能源。通常大型石化企业、基地或园区都通过自备热电装置满足供热需求和部分电力需求。随着新能源的增加，通过提高电气化程度，将促进石化行业的低碳发展，并且有利于石化行业利用可再生能源。通过在公用工程和工艺过程中加强电气化深度并利用可再生能源，如气驱改电驱、电加热蒸汽裂解、电化学还原二氧化碳制乙烯制合成气等措施，与基准情景相比，平均降低碳排放约 4%，年二氧化碳排放降低约 1800 万吨。

4.3 轻质原料替代

通过蒸汽裂解原料轻质化、采用天然气 / 丙烷 / 乙烷 / 甲醇等、促进生物基材料使用等措施。到 2060 年与基准情景相比，轻质原料生产乙烯能降低 1300 万吨左右的碳排放。

4.4 发展绿氢

氢气是石化行业的重要原料，制氢也是石化行业二氧化碳排放的来源之一。绿氢可以在绿电无法发挥作用的领域实现互补，促进以氢为原料的行业深度脱碳。面向未来，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行业脱碳。每千克绿电制氢所产生的二氧化碳排放量 ($\leq 4.9\text{kg/kg}$ ，参考团体标准《T/CAB0078-2020 低碳氢、清洁氢与可再生能源氢的标准与评价》) 比煤化工制氢二氧化碳排放量 (22kg/kg) 至少降低了四倍之多。如果按照到 2025 年石化行业绿氢应用达到 10 万吨 / 年，到 2030 年达到 30 万吨 / 年和到 2060 年达到超过 300 万吨 / 年的路线，与“基准情景”下以天然气制氢为主相比，到 2060 年减排二氧化碳约 4200 万吨 / 年。

4.5 CCUS 与化工行业碳利用

碳捕捉、封存和利用 (CCUS) 是石化行业实现碳中和的重要路径，成本的大幅度下降是普及 CCUS 的关键。工艺过程中产生的碳排放相对集中，更利于 CCUS 的应用。在已有的制氢设施配套 CCS 系统，可避免闲置资产处置和提高经济效益。本报告分析通过采用 CCUS 手段，到 2060 年与基准情景相比能降低约 3000 万吨左右的碳排放。

5. 中国石化行业碳达峰碳减排路线图与效益评估

综合来看，中国石化行业应采用多措并举、全面发力的路径促进行业尽快减排、尽早达峰。如下表所示，在产业结构调整方面降低油品消费、稳定乙烯当量自给率；在轻质原料替代方面，不断提高非石脑油路线乙烯产量；在节能降耗方面，促进行业重点产品单位能耗在 2030 年整体达到目前的标杆值或

者先进值，之后继续下降；在发展绿氢方面，不断提高绿氢应用规模；在深度电气化方面，首先提高动设备电气化程度，同时逐步深化工艺装置电气化程度；在 CCUS 方面，稳步提高捕集利用二氧化碳规模。

表1: 中国石化行业碳减排路径实施时间表

	2021-2030	2030-2040	2040-2050	2050-2060
产业结构调整	<ul style="list-style-type: none"> 汽柴油消费稳步下降； 煤油消费持续增加；受航空需求拉动到 2040 年前一直增加； 乙烯当量自给率上升到 70%； 	<ul style="list-style-type: none"> 汽柴油消费稳步下降； 煤油消费持续增加； 乙烯当量自给率保持在 70%； 	<ul style="list-style-type: none"> 汽柴油消费稳步下降； 煤油消费基本平稳； 乙烯当量自给率保持在 70%； 	<ul style="list-style-type: none"> 汽柴油消费稳步下降； 煤油消费开始下降； 乙烯当量自给率保持在 70%；
轻质原料替代	<ul style="list-style-type: none"> 非石脑油路线乙烯达到 25% 	<ul style="list-style-type: none"> 非石脑油路线乙烯达到 30% 	<ul style="list-style-type: none"> 非石脑油路线乙烯达到 35% 	<ul style="list-style-type: none"> 非石脑油路线乙烯达到 40%
节能降耗	<ul style="list-style-type: none"> 100% 的产能达到目前的能耗标杆值或者先进值要求 	<ul style="list-style-type: none"> 重点产品单位能耗比 2030 年下降 4% 	<ul style="list-style-type: none"> 重点产品单位能耗比 2040 年下降 4% 	<ul style="list-style-type: none"> 重点产品单位能耗比 2050 年下降 4%
发展绿氢	<ul style="list-style-type: none"> 绿氢使用达到 30 万吨 / 年 	<ul style="list-style-type: none"> 绿氢使用达到 50 万吨 / 年 	<ul style="list-style-type: none"> 绿氢使用达到 100 万吨 / 年 	<ul style="list-style-type: none"> 绿氢使用达到超过 >300 万吨 / 年
深度电气化	<ul style="list-style-type: none"> 动设备电气化率达到 80%；电加热蒸汽裂解等工艺过程深度电气化技术开始示范。 	<ul style="list-style-type: none"> 动设备电气化率达到 100%；电加热蒸汽裂解等工艺过程深度电气化技术开始应用 	<ul style="list-style-type: none"> 动设备电气化率达到 100%；电加热蒸汽裂解等工艺过程深度电气化技术开始推广 	<ul style="list-style-type: none"> 动设备电气化率达到 100%；电加热蒸汽裂解等工艺过程深度电气化技术占比达到三分之一
CCUS	<ul style="list-style-type: none"> 捕集利用 500 万吨 CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> 捕集利用 1000 万吨 CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> 捕集利用 2000 万吨 CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> 年均捕集利用 3000 万吨 CO₂

通过上述各路径的分析，与基准情景相比，中国石化行业将于 2025 年达峰，到 2060 年中国石化行业二氧化碳排放量可从 4.33 亿吨降低到 2.21 亿吨。碳减排幅度大约为 50%，其

中产业结构调整、绿氢的应用和节能降耗将会是最大的减排贡献路径。

图 3: 2021-2060 年碳减排情景与基准情景的碳排放比较

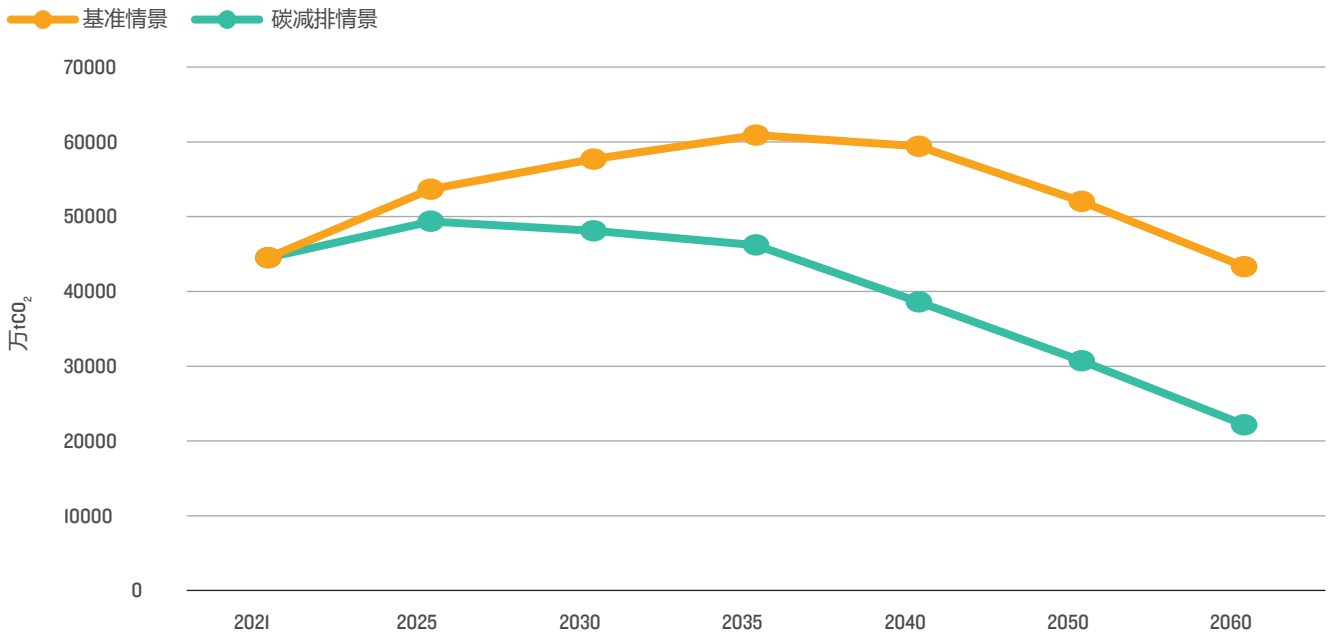
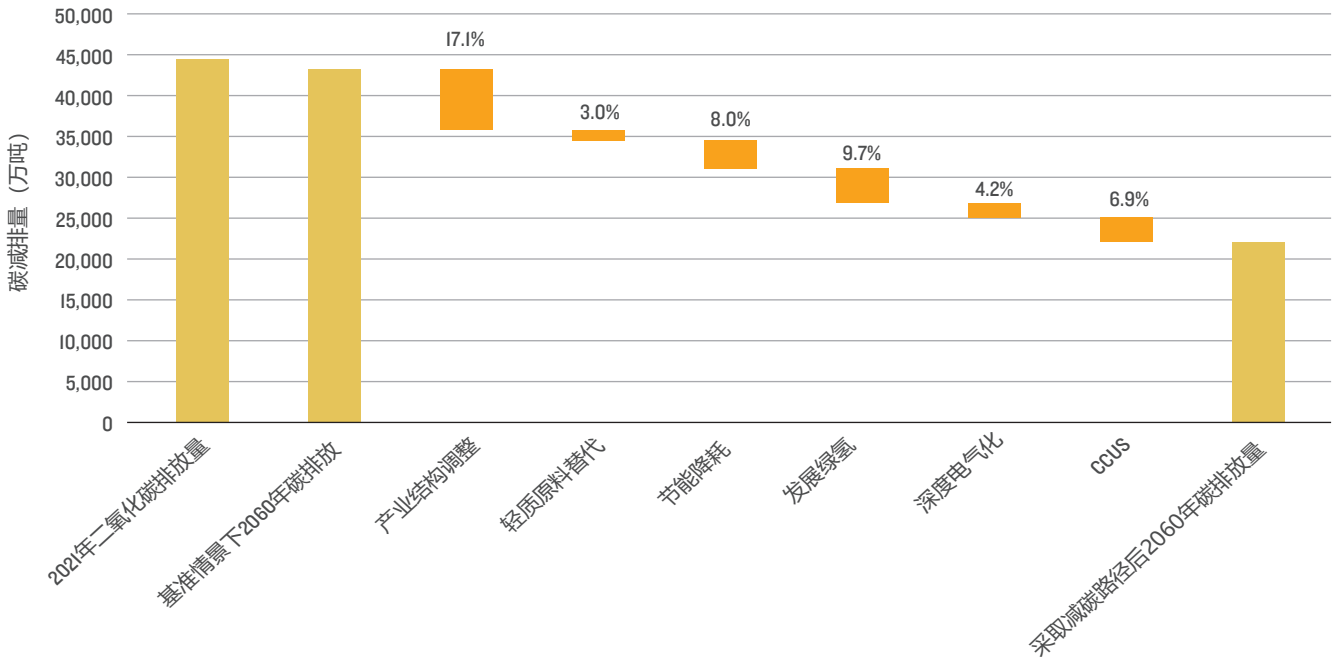


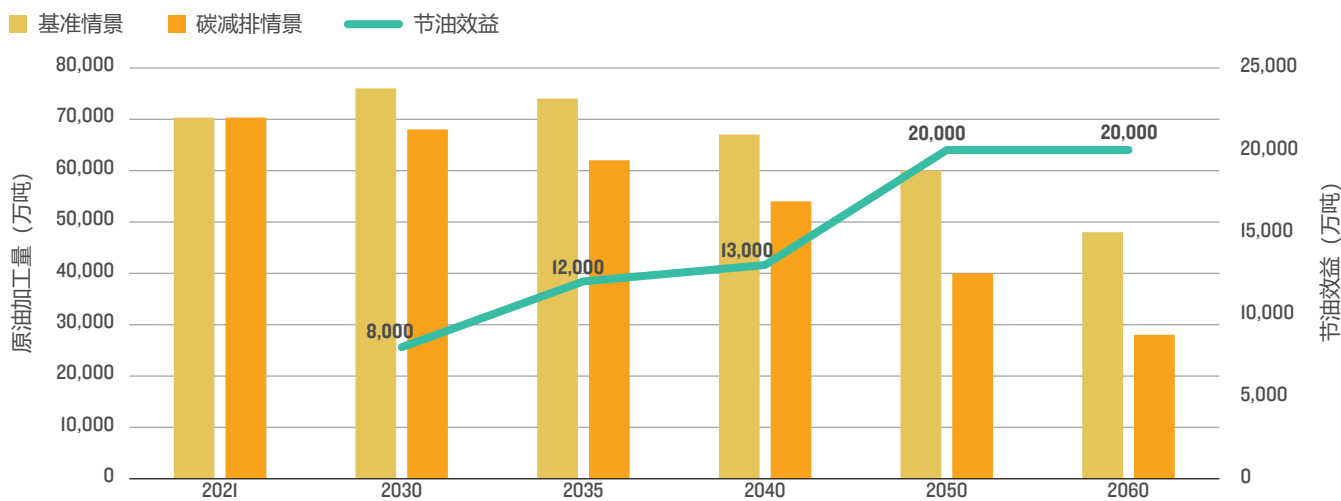
图 4: 中国石化行业主要路径碳减排潜力



减排路线图的实施不但能取得减少碳排放的直接效益，也会控制和降低石油消费。在采取碳减排路径后，与基准情景相比，石油消费量显著下降，到 2060 年石油消费量仅为 2.8 亿

吨左右，按中国石油自产量 2 亿吨为基准，石油对外依存度将从现在的 70% 下降到 30% 左右。

图5: 中国石化行业采取碳减排路径后取得的节油效益



6. 政策建议

1) 控制产能

严格控制炼油产能，淘汰落后产能，推进炼油产业结构调整，按照《石化产业规划布局方案》促进炼油和石化行业大型化、一体化发展。到2025年控制炼油产能在9.3亿吨/年以内，之后炼油产能只减不增。对东部地区及环渤海地区500万吨/年及以下炼厂淘汰或者进行产能等量减量置换。在全国范围内推进炼油产能指标交易。控制自备热电建设，新建石化项目不再建设自备煤电厂。

2) 制定标准

针对低碳发展导向，完善重点产品能耗限额标准，编制重点石化产品碳排放限额标准。在绿色制造体系的基础上，建立完善低碳评价体系，建立碳回收再利用产品的认证、绿色低碳技术评估等服务体系和平台。

3) 推广技术

及时更新《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南》，推广应用成熟节能降碳技术。鼓励先进技术研发，在炼油和乙烯行业重点支持推动渣油浆态床加氢等劣质重油原料加工、先进分离、组分炼油及分子炼油、低成本增产烯烃和芳烃、

原油直接裂解、电裂解炉、合成气一步法制烯烃、电化学还原二氧化碳制乙烯技术开发应用。鼓励现有装置进行电气化改造，提高电气化程度，加强装备电气化与绿色能源、绿色氢能耦合利用技术应用。适应石化行业高要求，进一步提高电力技术成熟度，电气化设备安全可靠。在芳烃行业重点加强国产模拟移动床吸附分离成套（SorPX）技术，以及吸附塔格栅、模拟移动床控制系统、大型化二甲苯塔及二甲苯重沸炉等技术装置的开发应用，提高运行效率，降低装置能耗和排放。

4) 资金支持

加快推进碳交易体系建设，推动石化行业在2023-2024年能纳入碳交易市场。完善有利于绿色低碳发展的财税、价格、金融、土地、政府采购等政策。积极发展绿色金融，配套专项基金、低碳转型资金、低碳信贷等相关政策对应用绿色低碳技术进行扶持，推动绿色低碳技术创新，突破和推广应用低碳前沿技术，降低企业减碳成本，特别是推动绿电和绿氢的成本降低，提高行业利用可再生能源比例。

1

碳减排背景下的中国 石化行业

1.1 重要的高能耗和高碳排放行业

石化行业¹是能源消费大户，其能耗和碳排放总量占全国总量比例较高。有研究表明 2019 年中国石化行业总能耗约为 1.7 亿吨标煤²，本研究推算 2021 年中国石化行业总能耗约为 1.95 亿吨标煤，总二氧化碳排放量约 4.45 亿吨，占中国二氧化碳排放总量的 4% 左右。如果将范围扩展到整个石化化工行业（包括国民经济分类中代码 25 石油、煤炭及其他燃料加工业中的“2511 原油加工及石油制品制造”、“2522 煤制合成气生产”和“2523 煤制液体燃料生产”，代码 26 化学原料和化学制品制造业），石化化工行业碳排放占到全国的 13%。

石化行业也是典型的原材料加工行业，与钢铁、有色、建材等行业类似，其产业链源头是资源和能源。石化行业的主要原料是石油，2021 年石化行业加工了 7.03 亿吨石油。中国消费的石油几乎全部作为石化行业的原料。由于石油资源禀赋不足，中国已经多年是世界最大石油进口国，2021 年中国进口了 5.4 亿吨的石油，石油进口依存度为 72%。

同时，石化行业是国民经济的重要支柱行业，2021 年中国包括石化行业在内的石化化工行业全行业实现营业收入 14.45 万亿元，比历史上最好的年份超出 4000 亿元，实现利润总额 1.16 万亿元，比上年增长了 127%，营业收入和利润占全国工业的比重分别为 11.3% 和 13.3%³。

随着我们工业化进程已经逐渐进入后期，钢铁、水泥、有色等高耗能、高排放行业的发展规模已经进入平台期并逐步下降，其碳排放也将随之减少。相比之下，石化行业发展规模预计在未来 10 多年仍将持续增长，这意味着其低碳发展的程度将在很大程度上影响中国整体的碳达峰碳中和进程。

研究石化行业的碳达峰碳减排，提高加工效率，促使石化行业节约资源能源，促进行业高端化和低碳化发展，对行业减少资源能源消耗，降低环境污染有重要意义，对保障中国能源安全有重要意义，对中国“双碳”目标的实现非常重要。

1.2 石化行业可在能源转型中发挥重要的节点作用

当前世界和中国的能源转型正在进行，可再生能源的发展日新月异，在供给侧可再生能源发电占比不断提高，在需求侧全社会电气化程度不断加深。石化行业作为高能耗行业，不但存量耗电量显著，而且还具备进一步提高用电比例的潜力，其将成为消纳可再生能源电力的重要载体。

石化行业是氢气最大的生产商，也是氢气最大的下游用户。石化行业所需氢气目前仍然依靠天然气制氢及煤制氢等化石能源制氢，在制氢过程中有大量二氧化碳排放。随着以可再生能源发电制取绿氢产业的发展，石化行业将有可能成为绿氢的重要使用者。

石化行业产品中油品以及有机合成材料均为含碳产品。2021 年石化行业所有产品的含碳量约为 5.7 亿吨（折 20.8 亿吨 CO₂）。由于产品含碳的特性，使得石化行业也具备很大的固碳潜力。传统能源的使用中排放的二氧化碳或温室气体将有可能通过化工的过程进行捕集而转变为油品或者化工原料，起到捕碳减碳的作用。

1 本报告所指石化行业为以石油为原料进行化学加工的产业。石化行业与国民经济发展、人民生活和国防军工密切相关，提供包括基础化学原料、三大合成材料（合成树脂、合成纤维、合成橡胶）及其他重要化工产品在内的多种产品。本研究不包括以非石油基原料生产有机原料（三烯三苯）的行业，如煤炭或甲醇制烯烃等行业。

2 刘红光等。《我国石化产业碳达峰、碳中和实现路径研究》[J]，当代石油石化，2022 年，第 30 卷第 2 期。

3 数据来自于 2021 年度中国石油和化学工业经济运行新闻发布会。

1.3 石化行业将发生结构性变化

石化行业的主要产品可以区分为油品和化工产品两大类。油品包括汽油、柴油、煤油等作为燃料使用的产品，化工产品包括以“三烯三苯”为代表的基本有机原料及下游合成材料等产品。

从油品来看，随着全社会电气化程度加深，交通领域电气化的快速转型，“公转铁”（减少公路运输、增加铁路运输）运输结构调整的持续推进，社会对汽油和柴油的需求量已经达到平台期。2021年成品油（汽油、柴油和煤油）总体表观消费量仅比2016年增长了1.8%，其中汽油和柴油消费量增长更微，合计仅比2016年增长了1.2%。由于需求侧疲软导致炼油产能过剩，成品油大量出口。2021年我国出口成品油4033万吨，占成品油产量的11.3%。

从化工产品来看，随着需求的增加，虽然化工产品产能在持续扩大，但是我国基本化工原料的对外依存度仍然较高。以最重要的基本有机原料乙烯为例，2021年我国乙烯的当量消费量为5800万吨，自给率约为64%。当年直接进口乙烯207万吨，乙烯下游最大宗的两大类产品聚乙烯和乙二醇进口量分别达1459万吨和843万吨，相当于又进口了2130万吨乙烯。石化产业基本原料的不足仍然是影响我国石化行业竞争力的重要因素之一。

基于需求侧油品过剩、化工品不足的现状，减少油品产量、增加化工品比例的“降油增化”结构性调整将是石化行业长期的课题。

2

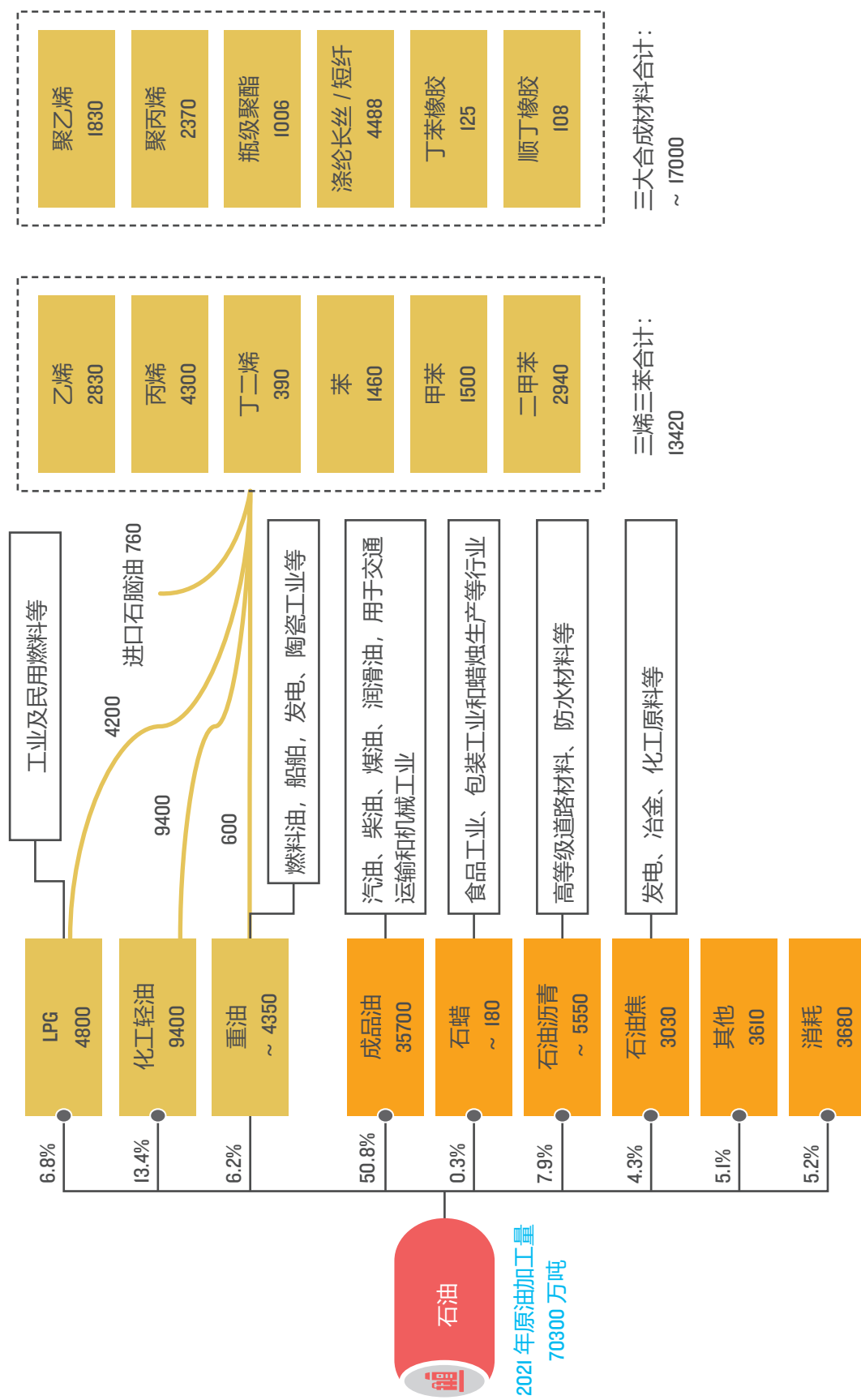
中国石化行业碳排放现状

2.1 行业发展规模

本课题研究的边界是从炼油开始到合成材料及有机化工原料为止的石化行业，按照国民经济分类，主要包括“2511 原油加工及石油制品制造”、“2614 有机化学原料制造”、“265 合成材料制造”等主要细分行业。按照石化行业产业链，合成树脂（塑料）、合成橡胶和合成纤维等三大合成材料是石化下

游的最主导和最重要产品。以“三烯三苯”为代表的有机原料是石化行业主要的中间产品，用作生产合成材料等的原料。炼油是有机原料的上游，提供生产“三烯三苯”的原料。人们对三大合成材料及其他石化产品的需求最终将传导到初始原料石油的消费上面，如图 2.1 所示。

图 2-1: 2021 年中国石油加工流向图



单位: 万吨

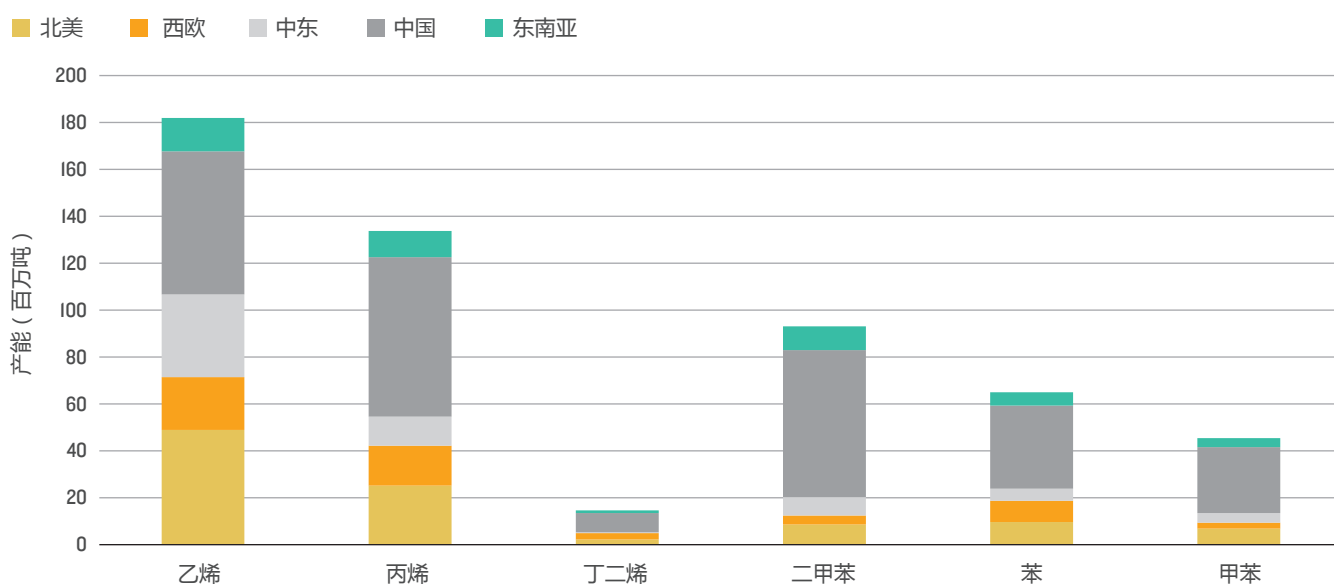
2021年，中国原油加工量突破7亿吨，同比增长4.3%；成品油产量（汽油、煤油、柴油合计，下同）3.57亿吨，同比增长7.9%。2021年，石油路线乙烯产量2825.7万吨，同比增长18.3%；合成材料总产量增长6.9%⁴。

从上世纪80年代开始，石化产业的生产主力逐步迁移至亚洲、中东和非洲。中国已经成为世界上最大的化学品制造国，在2019年全球份额达到39%。依据现在趋势，预测全球化工生产到2030年将增长30%，2050年将增长60%，塑料制品在5年之内将会增长30%⁵。根据IEA在2018年的测算，全球石化基础材料占石油消费的12%左右⁶，二氧化碳排放量约占据全球排放的6.3%⁷。随着对燃料需求的减少，石化产品在石油消费占比会进一步提高。炼化一体化装置已经成为一个全

球的趋势，预计到2030年会达到全球规模的三分之一，2050年会达到一半。未来美国、中国和中东将会是最大的石化产品生产国⁶。

2021年，全球七大基础石化产品（“三烯三苯”和甲醇）的产能为7.38亿吨，中国占45%，北美占15%，中东占12%。自2000年来，因全球人口增长，经济发展，生活和城市化水平提高，全球石化产业的年平均增长率为4.1%。2021年，全球基础石化产品的产量大约为5.42亿吨。新冠疫情导致全球GDP下降了3.7%。乙烯，丙烯和对二甲苯的市场有增无减，主要因为线上购物，居家办公，医疗器械的需求增长。另一方面，像甲醇，芳烃等石化产品的市场大幅萎缩，因为这些产品和染料和建筑材料息息相关⁸。

图2-2: 全球“三烯三苯”产能分布



数据来源: IHS Markit, Petrochemical Industry Overview, 2021

全球石化行业需求结构发生变化，交通燃料对石油的需求逐渐减少，石化产品将会在未来成为石油消费最大的驱动力。IEA预计可以减少温室气体排放的轻质原料，比如乙烷，

液化石油气和石脑油预计在2019-2026年间平均每天增长430千桶，其中2/3将用于石化产品，主要需求来自于中国和美国⁹。

4 数据来自于2021年度中国石油和化学工业经济运行新闻发布会。

5 Joel Tickner, et al. Transitioning the Chemical Industry: The Case for Addressing the Climate, Toxics, and Plastics Crises[R], 2021

6 IEA, The Future of Petrochemicals[R], 2018

7 WRI, 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors[EB/OL], 2020. <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>

8 IHS Markit, Petrochemical Industry Overview[R], 2021

9 IEA, Oil 2021 Analysis and forecast to 2026[R], 2021

2.2 碳排放现状

2.2.1 总体情况

如前所述本研究的范围为从炼油开始到合成材料及有机化工原料为止的石化行业，行业碳排放现状是此过程中产生的直接和间接碳排放。由于石化行业产品众多，工艺复杂，因此本研究按照重点产业链条及重点产品进行梳理，通过研究重点产

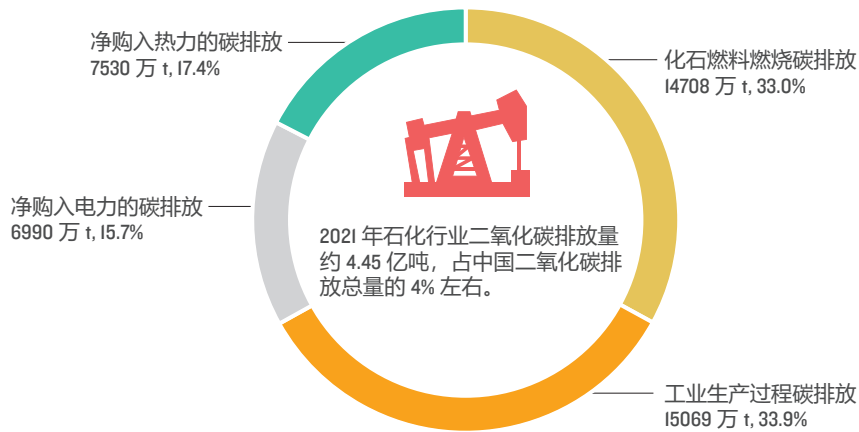
品排放特征，再进行合理外推，计算全行业总体碳排放情况。经研究 2021 年，在中国石化行业碳排放量 4.45 亿吨中，化石燃料燃烧产生碳排放为 1.47 亿吨，工业生产过程碳排放为 1.51 亿吨，净购入电力的碳排放 0.70 亿吨，净购入热力的碳排放 0.77 亿吨。按照占比来分析，中国石化行业碳排放中燃料及动力（电、蒸汽）等排放占 66.1%，占据主要部分，工业生产产生的碳排放占 33.9%。

表 2-1: 2021 年中国石化行业碳排放量

序号	源类别			单位	碳排放量, 万 tCO ₂	占比
1	化石燃料燃烧碳排放			万 t	14708	33.0%
2	工业生产过程碳排放	碳输入		万 t	223258	
		碳输出	产品 (主产品、副产品)	万 t	207981	
			三废固定 (渣、尘、污泥)	万 t	208	
	工业生产过程碳排放	输入 - 输出		万 t	15069	33.9%
3	CO ₂ 回收利用量			万 t	0	
4		净购入电力的碳排放		万 t	6990	15.7%
5		净购入热力的碳排放		万 t	7739	17.4%
6		温室气体排放总量 1+2-3+4+5		万 t	44506	

* 备注: 中国石化行业目前整体还未有大规模 CCUS 项目投产, 但 2022 年取得一定进展, 中国石化齐鲁石化 - 胜利油田百万吨级 CCUS 项目于 2022 年 8 月投运。

图 2-3: 2021 年中国石化行业碳排放量结构分布



石化行业产品众多, 其中最重要的产业链条为炼油 - 成品油、乙烯丙烯 - 合成树脂、芳烃 - 合成纤维等三大链条。炼油 - 成品油链条的重点子行业是炼油, 乙烯丙烯 - 合成树脂链条的重点子行业是乙烯、聚乙烯、聚丙烯, 芳烃 - 合成纤维链条的重点子行业是对二甲苯、PTA、乙二醇、聚酯。2021 年炼油、乙烯、聚乙烯、聚丙烯、对二甲苯、PTA、乙二醇、聚

酯等八大重点子行业的碳排放量占全行业的碳排放量比例约为 76.6%。其中, 炼油排放量最大, 占总排放量的 51.3%, 乙烯、聚乙烯、聚丙烯排放量占比分别为 9.2%、1.6% 和 1.4%, 对二甲苯、PTA、乙二醇、聚酯排放量占比分别为 4.4%、2.2%、3.0% 和 3.5% (见表 2.2)。

表 2-2: 2021 年中国石化行业重点子行业碳排放量

序号	重点子行业	产量 (万 t)	吨产品碳排放量 (tCO ₂)	总排碳量 (万 tCO ₂)	占比
1	炼油	70300	0.325	22848	51.3%
2	乙烯	2830	1.440	4075	9.2%
3	对二甲苯	2132	0.91	1954	4.4%
4	聚乙烯	1832	0.39	709	1.6%
5	聚丙烯	2374	0.26	638	1.4%
6	PTA (精对苯二甲酸)	5283	0.18	967	2.2%
7	乙二醇	822	1.65	1352	3.0%
8	聚酯	5664	0.27	1547	3.5%
	小计			34089	76.6%
	其他			10417	23.4%
	合计			44506	100.0%

备注: “吨产品碳排放量”系参考《GB/T 32151.10-2015 温室气体排放核算与报告要求 第 10 部分: 化工生产企业》, 在考虑目前行业的典型工艺的基础上, 根据消耗指标计算得出。

从不同产品的碳排放特征来看，化石燃料燃烧和工业生产过程中的碳排放基本只涉及炼油、乙烯和对二甲苯，其他产品的碳排放基本都来自于净购入的电力和热力（见表 2.3）。因此，从碳减排角度来说，减少炼油、乙烯和对二甲苯生产环节的燃

料燃烧和工艺工程中的碳排放是关键；对于其他产品的生产，则更多需用清洁电力和热力替代当前以煤炭为主体的供电和供热系统。

表 2-3：2021 年中国石化行业重点子行业碳排放结构

序号	重点子行业	化石燃料燃烧碳排放占比，%	工业生产过程碳排放占比，%	净购入电力的碳排放占比，%	净购入热力的碳排放占比，%
1	炼油	27	50	12	11
2	乙烯	83	1	4	12
3	对二甲苯	86	0	14	0
4	聚乙烯	0	0	84	16
5	聚丙烯	0	0	87	13
6	PTA（精对苯二甲酸）	0	0	14	86
7	乙二醇	0	0	40	60
8	聚酯	0	0	27	73

从全球来看，化工行业是继钢铁和水泥行业的第三大碳排放工业，其脱碳成本高，碳排放源分散，产品的全生命周期涉及范围一、二和三的碳排放。原材料，工艺技术，不同产品的产能分配，当地分销需求以及设备的老化程度，都会影响温室

气体的排放总量和强度。据彭博新能源的一项研究，目前石化行业占全球碳排放的 2% 左右¹⁰。根据 WRI 和中国石油大学的测算，中国石化化工碳排放大概占全国碳排放的 14.7%（包含煤化工），占全球碳排放的 3.3%¹¹。

10 Alexander H.Tullo, Decarbonizing petrochemicals will cost nearly \$800 billion[J/OL], c&en CHEMICAL & ENGINEERING NEWS, 2022, Vol100, Issue 19, <https://cen.acs.org/business/Decarbonizing-petrochemicals-cost-nearly-800/100/i19>

11 Ivy Yin, China's carbon market may cover refining and petrochemical sector by 2022-2023[EB/OL], 2021, <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/111121-chinas-carbon-market-may-cover-refining-and-petrochemical-sector-by-2022-2023>

2.2.2 炼油

炼油产品种类多，用途广，其中需求量较大的产品主要有九种，分别为汽油、煤油、柴油、液化气、化工轻油、燃料油、

沥青、石油焦、润滑油等，约占中国原油消费比重的 92% 以上。当前，成品油（汽煤柴）仍是原油的主要消费产品，2021 年占原油总加工量的 50.8%。

表 2-4: 中国炼油行业供需平衡现状

年份	原油产量	表观消费量	炼油能力	原油加工量	产能利用率 (%)	成品油（汽煤柴）产量	成品油产率 (%)
2017	19151	60396	80000	56777	71.0	34792	61.3
2018	18911	62245	82500	60357	73.2	36034	59.7
2019	19101	66060	88461	65198	73.7	36032	55.3
2020	19492	70228	88665	67441	76.1	33126	49.1
2021	19898	70961	90600	70300	77.6	35738	50.8

单位: 万t, 万t/a

数据来源: 国家统计局、海关统计、油控研究系列报告、专家访谈。

整体来说，炼油行业呈现以下特征：

- 国内原油产量基本保持稳定，维持在 1.9 亿吨左右。
- 产能逐年提升，2021 年已经突破 9 亿吨；但产能利用率偏低，2021 年仅 77.6%，低于全球平均水平（79.4%）。
- 炼油产品以成品油为主，但成品油产率整体在逐年下降。由于国内成品油需求增长有限，成品油出口量在过去 5 年均维持在较高水平，出口量占产量的比例平均达到 13%，随着下游交通领域的电动化发展趋势加快，对成品油需求预计在未来几年将进一步呈下降态势。这一趋势传导到上游的炼油行业，将进一步促进“降油增化”¹²。

¹² 降油增化即减少成品油产率及产量，增加化工轻油产率。

表2-5: 中国近年来成品油供需平衡情况

年份	油品	产量	进口量	出口量	表观消费量
2017	成品油合计	34792	452	4100	31144
	汽油	12845	2	1055	11791
	柴油	17717	75	1726	16066
	煤油	4231	376	1319	3288
2018	成品油合计	36034	528	4608	31954
	汽油	13888	45	1288	12645
	柴油	17376	71	1853	15594
	煤油	4770	413	1467	3716
2019	成品油合计	36032	519	5538	31013
	汽油	14121	33	1637	12517
	柴油	16638	119	2139	14618
	煤油	5273	367	1761	3878
2020	成品油合计	33126	437	4574	28989
	汽油	13172	48	1600	11620
	柴油	15905	123	1977	14052
	煤油	4049	266	998	3317
2021	成品油合计	35738	269	4033	31974
	汽油	15457	36	1456	14038
	柴油	16337	76	1720	14693
	煤油	3944	157	857	3244

单位: 万吨

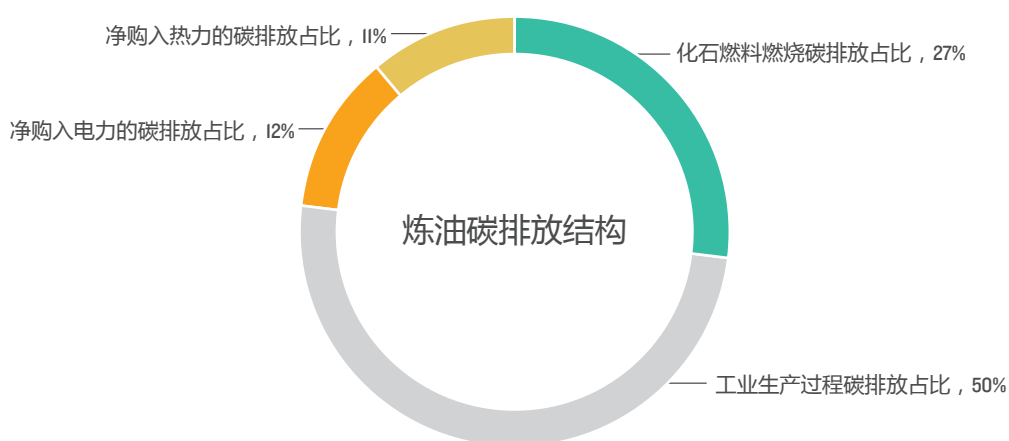
数据来源: 国家统计局、海关统计、油控研究系列报告、专家访谈。

随着炼油行业主要产品由交通燃料向化工用油方向转变，炼油产品不断轻质化，原油加工深度更高，生产过程更加清洁化，延迟焦化和催化裂化产能将增长缓慢，而生产高质量油品和化工原料的加氢装置能力占比将不断提高。

当前中国炼油过程单位平均能耗约为 0.1 吨标煤 /t 原油，碳排放系数平均为 0.325 tCO₂/t 原油¹³，年排碳合计约 22848

万 tCO₂。其中，生产过程排碳主要来自催化裂化催化剂烧焦、连续重整催化剂烧焦、制氢等工艺过程，排碳量约占总排碳量的 50%；燃料燃烧和火炬燃烧所引起的排碳量约占总排碳量的 27%；净购入的电力和热力导致的间接排碳量约占总排碳量的 23%。炼油过程碳排放结构如图 2.4 所示。

图 2-4: 炼油过程碳排放结构



2.2.3 乙烯

目前中国是全球最大的乙烯当量消费国和仅次于美国的第二大乙烯生产国，且仍处于快速发展阶段，“十三五”期间国

内乙烯产能、产量、当量消费量年均增速分别高达 10.0%、9.7% 和 9.4%。中国近年来石油路线乙烯供需平衡现状如表 2.6 所示。

表 2-6: 中国近年来乙烯供需平衡现状 (石油原料乙烯)

年份	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
2017	1822	216	1	2037
2018	1841	258	0	2099
2019	2052	251	1	2302

¹³ 此处及以下子行业碳排放计算方式是按照《GB/T 32151.10-2015 温室气体排放核算与报告要求第 10 部分：化工生产企业》计算得来。

年份	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
2020	2160	198	9	2348
2021	2826	207	19	3013

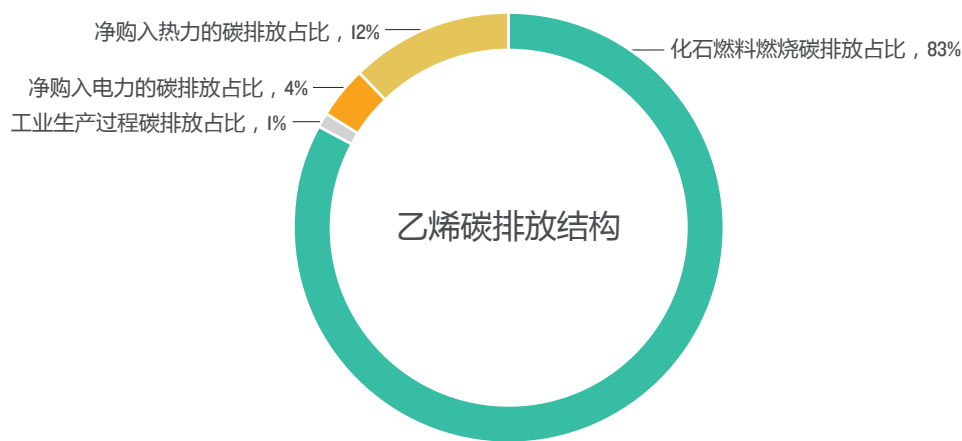
单位: 万t

数据来源: 国家统计局、海关统计、油控研究系列报告、专家访谈。

中国乙烯消费结构大体与世界相同, 聚乙烯 (含 EVA 树脂) 是最大的下游消费领域, 占比 63%; 其次是环氧乙烷 / 乙二醇, 占比 22%。由于国内聚酯产业规模很大, 使得乙烯消费结构中环氧乙烷 / 乙二醇所占比例远高于世界平均水平。此外, 由于中国的资源禀赋, 现有 PVC 产业以依托煤炭资源的电石法为主, 消耗乙烯比例较小。

石油原料蒸汽裂解路线制乙烯吨乙烯排放二氧化碳 1.44 吨, 整体碳排放量约 4075 万吨。蒸汽裂解路线碳排放主要来自裂解炉用燃料燃烧排碳, 占到总排放的 83% 左右。其次是蒸汽消耗折排碳, 占 12% 左右。再次是电力消耗折排碳, 占 4% 左右。此外还有少量清焦尾气等排碳, 占 1% 左右。

图 2-5: 石油路线蒸汽裂解制乙烯生产碳排放结构



2.2.4 丙烯

丙烯的主要用途为生产聚丙烯、环氧丙烷、苯酚丙酮、丁辛醇等系列化工产品, 是重要的基本有机化工原料之一。2021 年中国近年来丙烯供需平衡如表 2.7 所示。中国丙烯的来源中有炼厂催化裂化 FCC、裂解乙烯副产、甲醇制烯烃和丙烷脱氢

等。其中炼厂催化 FCC 制丙烯的能耗及碳排放计入炼油能耗及碳排放, 蒸汽裂解乙烯副产丙烯能耗及碳排放计入乙烯能耗及碳排放。甲醇制烯烃不属于传统石油路线加工。

表 2-7: 中国近年来丙烯供需平衡

年份	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
2017	2836	310	0	3146
2018	3035	286	0	3321
2019	3312	313	1	3628
2020	3610	251	1	3859
2021	4297	249	9	4538

数据来源: 国家统计局、海关统计、油控研究系列报告、专家访谈。

2.2.5 芳烃

芳烃主要包括苯、甲苯、二甲苯、对二甲苯等主要产品。中国近年来苯、甲苯、二甲苯、对二甲苯的供需情况如表 2.8 所示。

表 2-8: 中国近年来芳烃供需平衡情况

年份	产品	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
2017	苯	900	250	4	1147
	甲苯	712	51	0	763
	二甲苯	1290	78	0	1368
	对二甲苯	944	1444	3	2380
2018	苯	987	257	4	1240

年份	产品	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
	甲苯	777	33	2	808
	二甲苯	1352	68	1	1418
	对二甲苯	1023	1590	0	2594
2019	苯	1110	194	4	1300
	甲苯	1036	33	4	1066
	二甲苯	2014	96	1	2109
	对二甲苯	1465	1497	0	2954
2020	苯	1272	210	0	1481
	甲苯	1289	45	8	1327
	二甲苯	2573	124	0	2697
	对二甲苯	1963	1386	0	3349
2021	苯	1460	296	1	1755
	甲苯	1514	21	10	1525
	二甲苯	2943	109	0	3052
	对二甲苯	2132	1365	0	3497

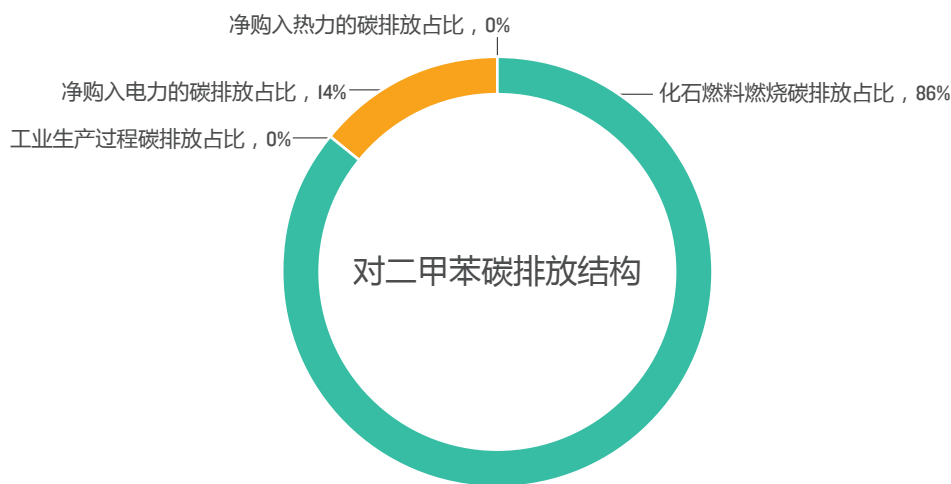
数据来源：国家统计局、海关统计、油控研究系列报告、专家访谈。

按照《GB 30251-2013 炼油单位产品能源消耗限额》，苯、甲苯、二甲苯加工能耗计入炼油综合能耗，因此芳烃生产中增加的能耗及碳排放主要来自于对二甲苯 (PX) 生产。

对二甲苯 (PX) 是二甲苯的最主要加工产品，也是芳烃下游的最大宗品种，其能耗占芳烃下游加工的主要部分。目前

吨对二甲苯 (PX) 单位能耗为 0.32 吨标煤，排放二氧化碳 0.91 吨。2021 年对二甲苯 (PX) 生产共排放 1949 万吨二氧化碳。对二甲苯 (PX) 生产碳排放结构情况如图 2.6 所示。

图 2-6: 对二甲苯 (PX) 生产碳排放结构



2.2.6 聚乙烯

聚乙烯是乙烯下游最大宗加工产品，是世界产量和消费量最大的通用塑料产品之一。聚乙烯具有优良的力学性能、电绝缘性、耐化学腐蚀性、耐低温性和优良的加工性能。

聚乙烯通常分为低密度聚乙烯 (LDPE)、线性低密度聚乙烯 (LLDPE) 和高密度聚乙烯 (HDPE)。LDPE 主要用于薄膜、

注塑制品等；LLDPE 主要用于薄膜制品等；HDPE 主要用于吹塑制品、注塑制品、薄膜片材、管材制品等。聚乙烯制品广泛应用于工业、农业、汽车、通讯以及日常生活等领域。中国近年来聚乙烯供需平衡情况如表 2.9 所示。

表 2-9: 中国近年来聚乙烯供需平衡情况

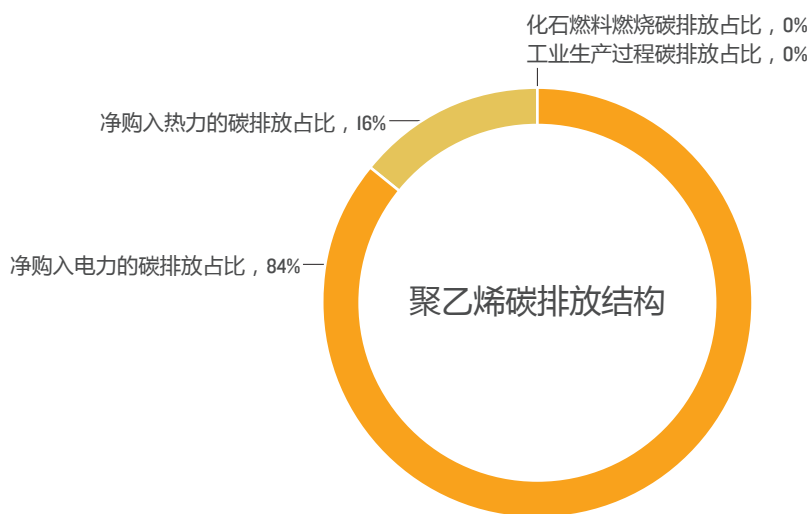
年份	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
2017	1554	1179	25	2708
2018	1583	1402	23	2963

年份	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
2019	1794	1667	28	3432
2020	2032	1853	25	3860
2021	2290	1459	51	3698

数据来源：国家统计局、海关统计、油控研究系列报告、专家访谈。

中国聚乙烯产品单位能耗约为 0.2 吨标煤 / 吨产品，二氧化碳排放约为 0.39 吨 / 吨产品，2021 年石油路线聚乙烯产量约为 1832 万吨，排放二氧化碳总量约为 709 万吨。聚乙烯生产碳排放结构情况如图 2.7 所示。

图 2-7: 聚乙烯生产碳排放结构



2.2.7 聚丙烯

聚丙烯是丙烯下游最大宗加工产品，是世界五大通用热塑性合成树脂之一，是主要的通用塑料产品之一。聚丙烯可生产编织、注塑、薄膜、纤维等制品，广泛应用于汽车、电器、日

用品、家具和包装等领域。中国近年来聚丙烯供需平衡情况如表 2.10 所示。

表 2-10: 中国近年来聚丙烯供需平衡情况

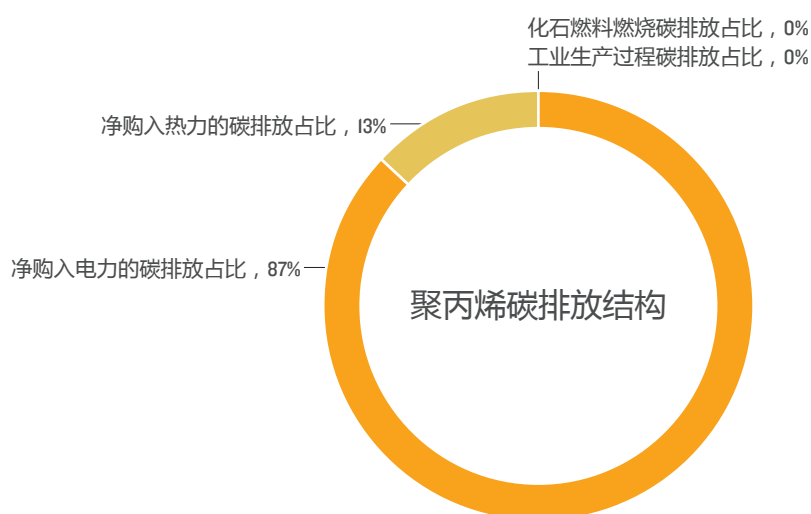
年份	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
2017	1979	318	30	2267
2018	2092	328	31	2389
2019	2235	349	34	2550
2020	2554	453	36	2971
2021	2860	318	127	3050

数据来源: 国家统计局、海关统计、油控研究系列报告、专家访谈。

中国聚丙烯产品单位能耗约为 0.13 吨标煤 / 吨产品, 二氧化碳排放约为 0.26 吨 / 吨产品, 2021 年石油路线聚丙烯产

量约为 2374 万吨, 排放二氧化碳总量约为 614 万吨。聚丙烯生产碳排放结构情况如图 2.8 所示。

图 2-8: 聚丙烯生产碳排放结构



2.2.8 精对苯二甲酸 (PTA)

精对苯二甲酸 (PTA) 是合成纤维生产最大宗的原料, 也是对二甲苯最主要的下游加工产品。中国近年来 PTA 供需平衡情况如表 2.11 所示。

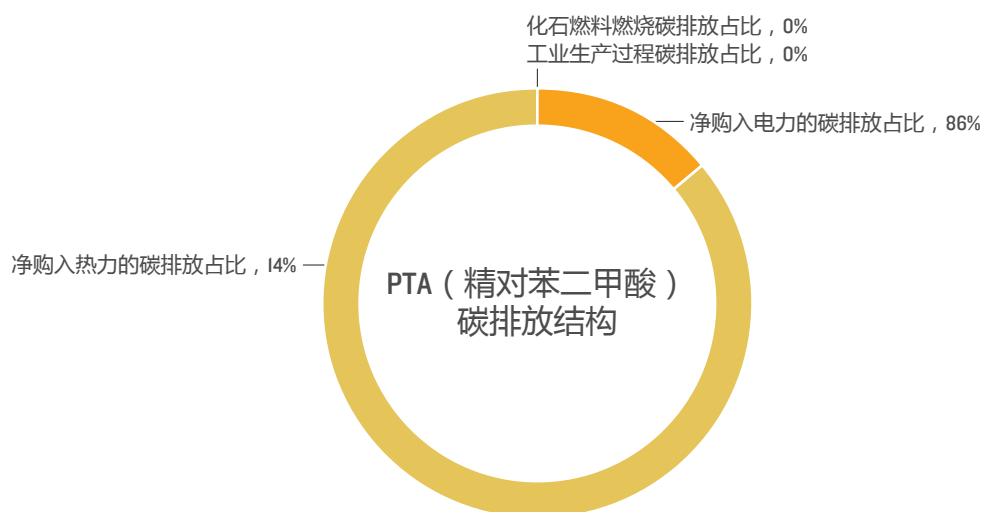
表 2-11: 中国近年来 PTA 供需平衡情况

年份	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
2017	3568	54	52	3569
2018	4074	77	84	4047
2019	4475	102	69	4491
2020	4950	62	85	4915
2021	5283	8	258	5029

数据来源: 国家统计局、海关统计、油控研究系列报告、专家访谈。

中国 PTA 产品单位能耗约为 0.09 吨标煤 / 吨产品, 二氧化碳排放约为 0.18 吨 / 吨产品, 2021 年 PTA 产品排放二氧化碳总量约为 967 万吨。PTA 生产碳排放结构情况如图 2.9 所示。

图 2-9: PTA 生产碳排放结构



2.2.9 乙二醇

乙二醇是合成纤维生产的主要原料之一，也是乙烯除聚乙烯外的最大下游加工产品。中国近年来乙二醇供需平衡情况如表 2.12 所示。

表 2-12: 中国近年来乙二醇供需平衡情况

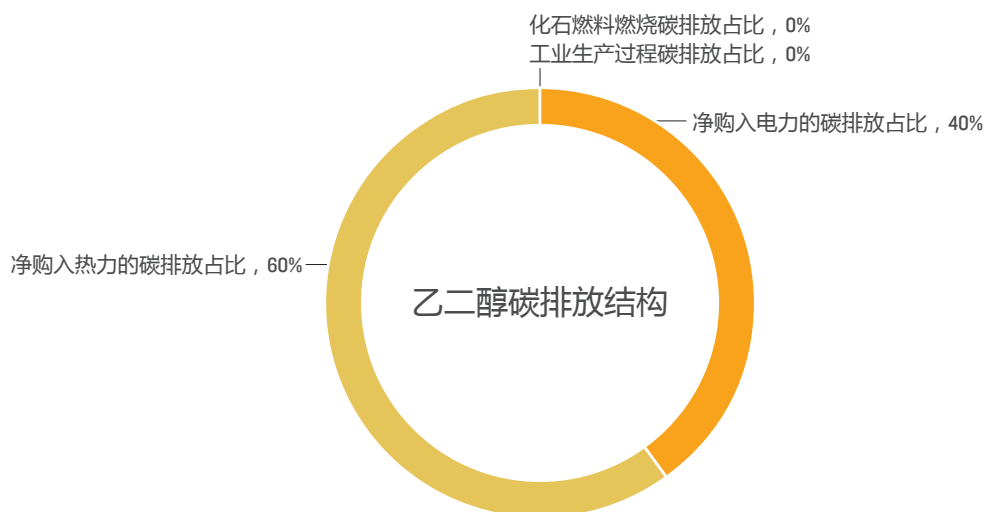
年份	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
2017	572	875	2	1442
2018	669	980	0	1559
2019	747	995	1	1712
2020	881	1055	6	1929
2021	1222	843	12	2052

数据来源：国家统计局、海关统计、油控研究系列报告、专家访谈。

中国石油路线乙二醇产品单位能耗约为 0.68 吨标煤 / 吨产品，二氧化碳排放约为 1.65 吨 / 吨产品，2021 年石油路线

乙二醇产量约为 822 万吨，排放二氧化碳总量约为 1360 万吨。乙二醇生产碳排放结构情况如图 2.10 所示。

图 2-10: 乙二醇生产碳排放结构



2.2.10 聚酯 (PET)

聚酯 (PET) 的主要品种包括聚酯瓶片及涤纶长丝、短纤、工业丝等, 其供需平衡情况如表 2.13 所示。

表 2-13: 中国近年来聚酯类产品供需平衡情况

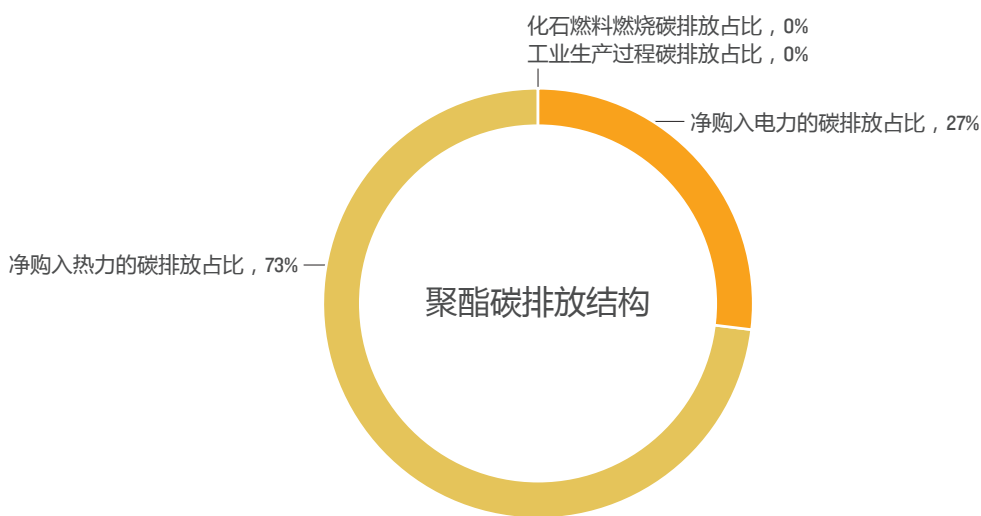
年份	产品	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
2017	聚酯瓶片	696	4	216	485
	涤纶长丝	2599	14	207	2405
	涤纶短纤	500	16	101	449
	涤纶工业丝	169	2	46	125
2018	聚酯瓶片	779	6	275	507
	涤纶长丝	2904	13	231	2686
	涤纶短纤	550	19	103	482
	涤纶工业丝	173	2	45	130
2019	聚酯瓶片	872	5	290	575
	涤纶长丝	3142	11	272	2874
	涤纶短纤	630	22	98	555
	涤纶工业丝	179	1	44	136
2020	聚酯瓶片	942	6	234	715
	涤纶长丝	3408	9	274	3098

年份	产品	产量 (万 t)	进口量 (万 t)	出口量 (万 t)	表观消费量 (万 t)
	涤纶短纤	702	19	80	652
	涤纶工业丝	184	2	43	143
2021	聚酯瓶片	1006	6	318	702
	涤纶长丝	3767	12	305	3404
	涤纶短纤	721	16	93	658
	涤纶工业丝	237	5	56	185

数据来源：国家统计局、海关统计、油控研究系列报告、专家访谈。

中国聚酯产品能耗约为 0.1 吨标煤 / 吨产品，二氧化碳排放约为 0.27 吨 / 吨产品，2021 聚酯产品排放二氧化碳总量约为 1547 万吨。聚酯生产碳排放结构情况如图 2.10 所示。

图 2-11: 聚酯生产碳排放结构



3

基准情景下的碳排放预计

根据石化行业目前的发展趋势、碳排放现状、国家已经出台的涉及石化行业的相关节能降碳规划、规范、指南和发展目标，以及行业已经开始采取的降碳行动，本研究对基准情景下

石化行业碳排放做了整体评估。预计全行业将于 2035 年实现碳排放达峰，峰值在 6 亿吨左右。

此情况下的碳排放评估，基于如表 3.1 所示的假设：

表 3-1: 基准情景特点

	2025	2030	2035	2040	2050	2060	
油品需求	汽柴油消费开始进入下降通道						
	煤油消费受航空需求拉动到 2040 年前一直增长。				煤油消费进入下降通道		
化工消费	到 2035 年乙烯消费量达到 1 亿吨的峰值，人均消费量从目前的 42kg/ 人左右增加到 2035 年 71kg/ 人左右，位于欧洲乙烯人均消费峰值（约 56kg/ 人）和美国（约 90kg/ 人）之间。			随着可降解塑料、塑料再生的发展以及进口下游产品，乙烯当量消费量开始呈现下降趋势，到 2060 年人均乙烯消费量约 60kg/ 人左右，总乙烯消费量达到 7200 万吨左右。			
	石化行业主要立足国内，2030 年乙烯当量自给率超过 90%，2030 年以后芳烃当量自给率超过 90%，PX 产量超过 3600 万吨。其他下游产品自给率平均超过 90%。		乙烯消费达到峰值，乙烯产量 9000 万吨，其中石油路线乙烯产量 8000 万吨，其他 1000 万吨来自甲醇制烯烃及其他非石油基原料。芳烃和下游产品平均自给率达到 95% 以上。		乙烯当量自给率维持 90%，芳烃和其他下游产品自给率维持 100%。		
政策要求	产业政策、能耗标准及碳减排措施按照目前政策要求。						
单位产品碳排放强度	比 2021 年下降 4% 左右，30% 的产能能耗达到目前的标杆值水平。	比 2021 年下降 8% 左右，50% 的产能能耗达到目前的标杆值水平。	比 2030 年下降 4% 左右。		比 2035 年下降 4% 左右。	比 2040 年下降 4% 左右。	比 2050 年下降 4% 左右。

此情景下中国重点石化产品产量如表 3.2 所示。

表 3-2: 基准情景下中国石化产品产量情况

序号	重点子行业	2021	2025	2030	2035	2040	2050	2060
1	炼油 (加工量)	70300	76000	76000	74000	67000	60000	48000
1.1	汽油	15457	14000	11000	9500	6500	6000	3000
1.2	柴油	16337	14500	13000	12000	8500	7000	6000
1.3	煤油	3944	5000	6000	7000	7500	6500	6000
1.4	化工轻油	11000	17291	21636	23551	22895	21882	21187
2	乙烯	2830	5501	7000	8000	7500	7000	6000
3	对二甲苯	2132	3252	3656	4031	4434	3700	3000
4	聚乙烯	1832	2620	3222	3770	3959	4000	3167
5	聚丙烯	2374	3395	4175	5136	5906	5600	4725
6	PTA (精对 苯二甲酸)	5283	5811	6102	6407	6727	6000	5382
7	乙二醇	822	904	949	997	1047	940	837
8	聚酯	5664	6230	6542	6869	7212	6500	5770

单位: 万吨

备注: 表中产量不包括利用甲醇等非石油基原料生产的产品

石化行业及重点子行业碳排放预测如表3.3和图3.1所示。
在基准情景下，中国石化行业二氧化碳排放于2035年左右达

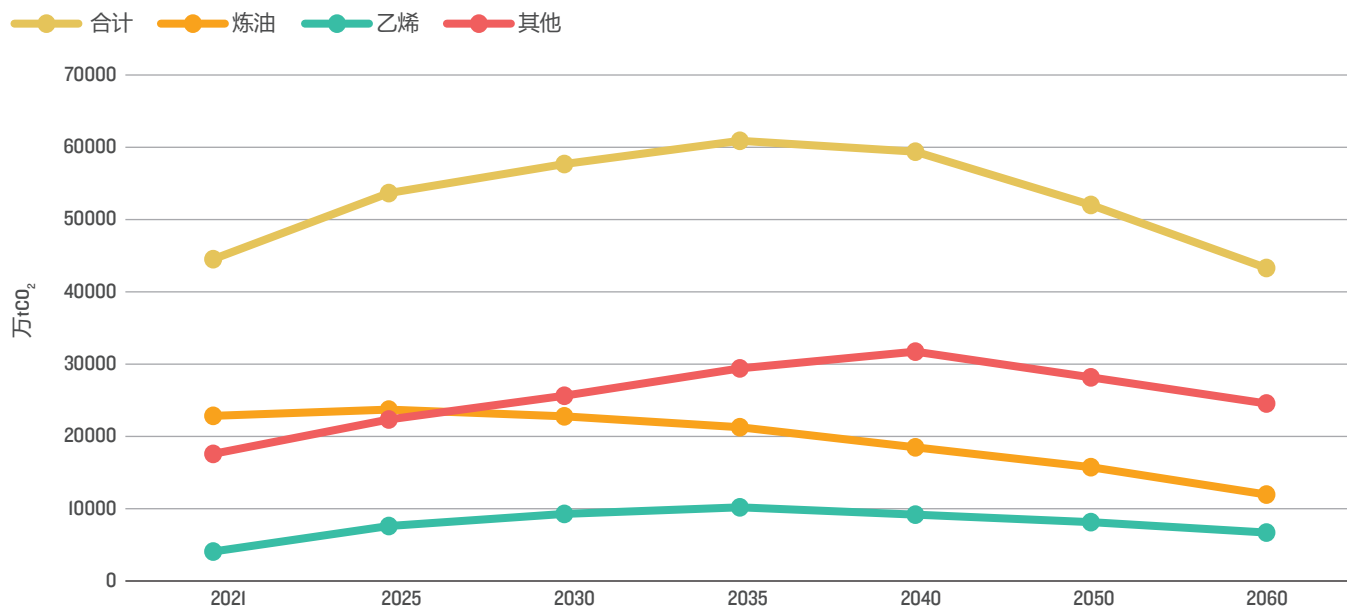
峰，届时碳排放为6.09亿吨，到2060年石化行业碳排放为4.33亿吨。

表3-3: 基准下中国石化行业碳排放预测

重点子行业	2021	2025	2030	2035	2040	2050	2060
炼油	22848	23712	22764	21278	18495	15734	11958
乙烯	4075	7605	9290	10192	9173	8133	6693
对二甲苯	1954	2861	3087	3268	3451	2764	2152
聚乙烯	709	974	1150	1292	1302	1263	960
聚丙烯	638	875	1033	1220	1347	1226	993
PTA(精对苯二甲酸)	967	1021	1029	1037	1045	895	771
乙二醇	1352	1428	1440	1451	1463	1261	1078
聚酯	1547	1633	1647	1660	1673	1447	1233
除炼油乙烯外其他行业	17583	22334	25636	29428	31732	28163	24563
合计	44506	53651	57689	60898	59399	52030	43303

单位: 万tCO₂

图 3-1: 基准情景下中国石化行业碳排放预测



4

中国石化行业碳减排 路径分析

在上一章基准情景分析的基础上，本章重点分析石化行业碳达峰碳减排的主要路径及碳减排贡献潜力。

从宏观角度分析，一方面石化行业目前存在炼油产能过剩、成品油大量出口、化工品仍然不足的结构矛盾，需要通过产业结构调整解决；另一方面，石化行业是高能耗、高碳排放行业，在不影响产业安全的情况下适度进口中间基础原料产品，保持一定的对外依存度，对全社会的节能减碳和“双碳”目标实现均较为有利。

从石化行业总体碳排放特征来看，化石燃料燃烧、工业生产过程排放、净购入电力和热力排放均对碳排放有一定贡献，可以分别施策、定向减碳。通过采用包括绿氢、天然气、乙烷、丙烷等在内的低碳原料可以减少工业生产过程中的排放，通过采用低碳燃料可以减少化石燃料燃烧碳排放，采用深度电气化可以减少净购入电力和热力合计的碳排放。通过CCUS可以减少化石燃料燃烧和工业生产过程排放等直接排放的CO₂。通过采取各种节能降耗技术及采用数字化可以取得整体减碳的效果。结合以上分析，中国石化行业碳达峰碳减排路径可从产业结构调整、轻质原料替代、节能降耗、发展绿氢、深度电气化、CCUS等多方面入手。

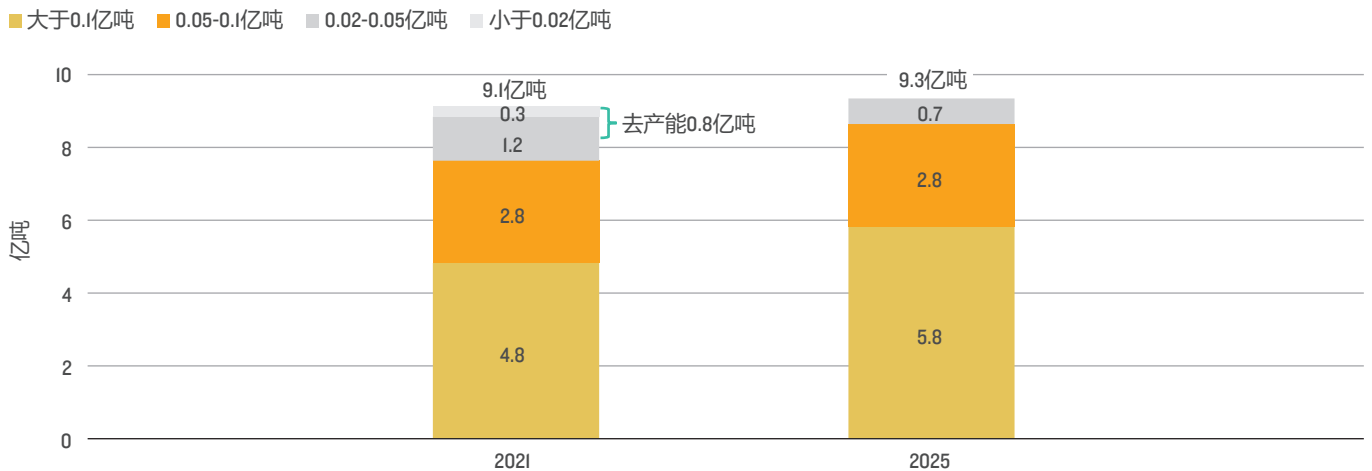
4.1 产业结构调整

通过产业结构调整，到2025年原油加工量达到峰值7.2亿吨/年，之后呈下降趋势，到2060年原油加工量降低至2.8亿吨/年，乙烯产量为4500万吨/年，对二甲苯产量为2200万吨/年，分别比基准情景下的2060年相应产量降低2亿吨/年、1500万吨/年和800万吨/年，按照2060年基准情景下单位产品碳排放计算，共减少碳排放约7400万吨/年。

4.1.1 淘汰落后产能

目前中国炼油能力约9.1亿吨，其中1000万吨/年及以上的炼油产能达4.8亿吨/年，500万吨/年-1000万吨/年（含500万吨/年）炼油产能达2.8亿吨/年，在200-500万吨/年之间的炼油能力约1.2亿吨/年，200万吨/年及以下的炼油能力约0.3亿吨/年（图4.1）。在200万吨/年及以下炼油产能中，山东、河北和辽宁是分布的重点，产能分别为790万吨/年、670万吨/年和590万吨/年，占比分别为26.3%、22.3%和19.7%，合计为68.3%。

图4-1: 中国炼油产能



炼油装置能耗和碳排放跟规模有直接的关系。200-500万吨/年炼油企业加工能耗平均约在90kgOE/t左右，500万吨/年炼油企业的加工能耗约为80kgOE/t，1000万吨/年炼油企业的加工能耗则可下降至约55kgOE/t。因此淘汰落后炼油产能、调整炼油产能规模结构将起到重要的节能降碳效果。

按照国家产业政策，200万吨/年及以下常减压装置（一次原油加工能力）属于淘汰类（除个别西部地区装置），未来应坚决贯彻产业政策，淘汰此类产能，在2025年退出3000万吨/年炼油产能。产能在200万吨/年和500万吨/年的炼油企业中，将不符合环保、安全、开工率低的5000万吨/年产能退出。到2025年前中国至少退出8000万吨/年炼油产能将退出，主要包括山东、辽宁、河北等地区的小型炼油企业，另外还有山东约2500万吨/年产能置换为新建2000万吨/年炼化一体化装置（裕龙岛石化产业园）。

根据目前在建、拟建、规划大型炼化项目情况，预计到2025年前新建炼油产能约1亿吨（不含裕龙岛石化产业园项目），均为新建千万吨级以上炼油装置或者在原有千万吨级炼油装置基础上扩建。到2025年中国净增炼油产能约0.2亿吨，达到9.3亿吨/年左右。其中千万吨级炼油企业能力将超过5.8亿吨，占总炼油产能比例达到62%。到2030年通过进一步整合500万吨以下炼厂，炼油能力下降至9亿吨/年，千万吨级炼油企业能力超过80%。

4.1.2 推进产品结构性调整

中国石化行业长期存在“油”、“化”比例失调问题，即由于国内炼化一体化程度差、油品占总产品比例高，加之炼油产能过剩，导致成品油过剩大量出口，而生产化工产品所需的原料油品及基本化工原料大量进口。2019年中国成品油净出口达到峰值5019万吨，同期主要用于化工的石脑油净进口702万吨。虽然近两年随着产品结构的调整成品油净出口已呈现下降趋势，但是2021年中国成品油净出口量仍然达到3764万吨左右，同期石脑油净进口761万吨，乙烯净进口188万吨，合成树脂净进口2181万吨，乙二醇净进口。目前中国化工轻工油产量约为11000万吨，占原油加工量比例为15.6%。

中国炼油产能结构性调整、提高化工品比例的潜力很大。目前新建的恒力石化、浙江石化等炼化一体化项目化工产品比例都大大提高。恒力石化项目一期主体工程主要包括2000万吨/年常减压蒸馏、煤油加氢精制200万吨/年、柴油加氢裂化600万吨/年、蜡油加氢裂化760万吨/年、渣油加氢裂化640万吨/年、溶剂脱沥青135万吨/年等；产品包括450万吨/年PX、100万吨/年纯苯和150万吨/年乙烯，年产超过900万吨基本石化原料，基本石化原料收率约为50%。浙江石化完全建成后原油加工能力为4000万吨/年，主要产品为800万吨/年PX、200万吨/年纯苯、280万吨/年乙烯、60万吨/年丙烷脱氢。项目一期主体工程主要包括2000万吨/年常减压蒸馏、300万吨/年轻烃回收、300万吨/年延迟焦化、500万吨/年渣油加氢脱硫、380万吨/年蜡油加氢裂化、800万吨/年柴油加氢裂化、420万吨/年重油催化裂化和200万吨/年催化汽油加氢等，年产约900万吨石化产品，基本石化原料收率约为45%。在推动降油增化时可充分根据原油特点发展原油直接制烯烃技术。原油直接裂解制烯烃的技术主要特点在于省略了原料炼制生产石脑油的过程，大大简化了工艺流程。

4.1.3 适度利用进口资源

从需求侧来看，油品方面，汽柴油消费稳步下降，煤油消费受航空需求拉动到2040年前一直增加；化工品方面，在保障产业安全的情况下，适度保持一定量基本有机原料及下游石化产品进口。与基准情景相比，可适度降低乙烯当量自给率，石化行业以国内供应为主，国外供应为辅。在碳减排情景下，乙烯当量自给率将在2025年突破70%，2030年又下降至70%左右，并在以后长期保持在70%左右，即2035年乙烯消费达到1亿吨峰值时国内乙烯产量达到7000万吨，其中石油路线乙烯产量6500万吨，其他500万吨来自甲醇制烯烃及其他非石油基原料。2030年以后芳烃当量自给率超过80%，PX产量达到3300万吨。其他重点石化产品自给率在70%-80%左右。

4.2 节能降耗及深度电气化

在广泛应用石化行业绿色工艺、节能降碳技术、数字化技术的基础上，加大节能降耗，能耗及碳减排措施加大力度，进一步推广节能降碳技术应用深度，增强数字化技术。到2060年，与基准情景相比，全行业单位产品能耗总体水平下降8%左右，降低碳排放约3500万吨CO₂。

石化行业是能源和电力消耗大户，直接消耗石油、天然气和煤炭等一次能源和电力、热力等二次能源。通常大型石化企业、基地或园区都通过自备热电装置满足供热需求和部分电力需求。随着新能源的增加，通过提高电气化程度，将促进石化行业的低碳发展，并且有利于石化行业利用可再生电力。通过深度电气化与可再生电力利用，与基准情景相比，平均降低碳排放约4%，年二氧化碳排放降低约1800万吨。

4.2.1 节能降耗

石化行业耗能设备众多，包括精馏塔、换热器、加热炉、压缩机、物料泵等各式各样设备。通过进行技术改造、系统优化、加强数字化程度，可以做到节能降耗，起到碳减排作用。

目前全国炼油平均综合能耗约为65kgoe/t，主营企业炼油综合能耗相对较低，平均约60kgoe/t。部分优质企业达到世界先进能耗水平，如镇海炼化、茂名石化、上海石化等炼油（单位）综合能耗在48-52kgoe/t左右，但仍有许多炼油企业能耗在70kgoe/t甚至90kgoe/t以上，节能减排存在较大潜力。根据国家标准《炼油单位产品能源消耗限额》（GB 30251-2013），其中新建炼油企业炼油（单位）综合能耗准入值的要求为63kgoe/t。预计到2025年和2035年随着炼化一体化发展，落后产能淘汰，地方和民营炼油厂产能将逐渐集中为大型装置，将有力促进炼油综合能耗的下降。

在数字化智能化方面，全球石化行业也加快了数字化转型升级的步伐。石化流程型行业以石油为主要原料，以连续性生

产为特征，生产油品及各类石化产品。由于石化行业生产过程的高度复杂性，智能化、精细化、数字化的作用格外凸显。中国石化行业在数字化和智能化方面的重点是：大力推进石化智能工厂建设；推进工程设计数字化和供应链管理智能化；推进生产运行智能化，重点打造数字化生产环境、生产集成管控体系、全流程模拟和一体化优化体系、智能安全环保管理体系等；推进知识管理和经营决策智能化，加强企业数据仓库和知识库的建设。实践表明，通过数字化智能化管理，石化工厂至少能取得1-2%的节能降耗效果。如镇海炼化在其2000万吨/年炼油装置上实施能源平衡与优化调度系统，通过技改实现年节能1万吨标煤。

4.2.2 深度电气化

当前石化行业使用大量化石燃料用于加热或生产蒸汽。一是在工艺过程中需要用到热量与蒸汽，如乙烯裂解炉需要燃烧燃料进行加热，需要蒸汽参与裂解反应。二是大型动设备需要蒸汽驱动，如乙烯裂解气压缩机大多采用蒸汽驱动。化石燃料在直接燃烧加热过程中会排放大量二氧化碳。石化行业使用的蒸汽多数也来自于燃烧化石能源的锅炉，同样是碳排放的主要来源之一。随着大型火电装置发电效率的提高和可再生能源比例的迅速增加，提高石化行业用电比例，将能够提高整体用能效率，促进节能降碳。

4.2.2.1 公用工程深度电气化

热力供应是石化行业公用工程的重要部分，石化行业热力需求的主力是各种蒸汽透平机械，这部分蒸汽需求通常通过自备或者园区火力热电厂提供。通过推动电气化，这部分需求完全可以通过电驱代替。采用电驱在节能减排方面效果显著。表4.1为以空分装置为例，分别计算汽驱和电驱的能耗及碳排放进行对比。相比采用燃煤锅炉汽驱模式，在电力以等量值计算的情况下，能耗下降了72.4%，在电力以等价值计算的情况下，能耗下降了30.4%，二氧化碳排放量下降了49.6%。

表 4-1: 汽驱和电驱能耗及碳排放对比

序号	项目	汽驱	电驱	备注
1	空分规模 (氧气产量), Nm ³ /h	63000	63000	
2	耗高压蒸汽量 (9.8MPa), t/h	145		
3	耗电量, kW	1000	43000	
4	能耗, tce/h	19.2	5.3	电按当量值, 1.229tce/ 万 kWh
		19.4	13.5	电按等价值, 3.143tce/ 万 kWh, 参照《GBT 50441-2016 石油化工设计能耗计算标准》
5	二氧化碳排放量, t/h	50.4	25.4	二氧化碳排放量计算按照《GB/T 32151.10-2015 温室气体排放核算与报告要求第 10 部分: 化工生产企业》

4.2.2.2 工艺过程深度电气化

- 电加热蒸汽裂解

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过程, 在使用可再生资源电力的情况下能够起到显著减排效果。2021 年内巴斯夫、沙特基础工业与林德公司签署了一项联合协议, 计划共同开发并推广蒸汽裂解装置电加热解决方案。在乙烯生产蒸汽裂解装置起着至关重要的作用, 将碳氢化合物分解成烯烃和芳烃需要消耗大量的能量。通常情况下, 相关裂解反应通常需要在炉内温度达到约 850 摄氏度才会发生。从前文乙烯碳排放分析可知, 蒸汽裂解路线碳排放主要来自裂解炉用燃料燃烧排碳, 占到总排放的 83% 左右。其次是蒸汽消耗折排碳, 占 12% 左右。再次是电力消耗折排碳, 占 4% 左右。其中燃料燃烧和蒸汽消耗目前主要是通过燃烧化石燃料来完成升温, 如果这部分能量可以通过电加热实现代替, 同时电力来自绿电, 则这项具有颠覆性的革新技术有望实现高达 90% 的减排比例。

- 电化学还原二氧化碳制乙烯

在乙烯工业中另一种减少二氧化碳排放的方式是通过二氧化碳直接制乙烯。在电化学还原二氧化碳中, 氢离子由阳极的水分子产生, 二氧化碳则在阴极处被还原, 碳离子和氢离子结合生成乙烯。商业系统中每生产 1kg 乙烯需要 15~30 千瓦的电力。在全面部署并使用可再生能源条件下, 该系统能够将乙烯生产过程中碳强度降低 20%~30%。

- 二氧化碳电化学制合成气

二氧化碳电化学制合成气是指利用电化学反应在催化剂作用下将二氧化碳和水变成一氧化碳和氢气的过程, 该过程能够将二氧化碳变为在化工行业中很有价值的合成气, 合成气进一步可用于生产甲醇等一系列化工产品。

4.3 轻质原料替代

通过轻质原料替代，到 2060 年与基准情景相比，轻质原料生产乙烯能降低 1300 万吨左右的碳排放。

4.3.1 蒸汽裂解原料轻质化

目前中国乙烯原料结构为蒸汽裂解路线 78.5%，甲醇制烯烃（含煤制甲醇和外购甲醇）占 19.8%，催化裂解制烯烃占 1.7%。蒸汽裂解是乙烯最主要的工艺路线，其原料包括石脑油、轻柴油、抽余油、加氢尾油及轻烃（乙烷、丙烷等）。国内乙烯裂解料中石脑油等液体原料占比偏高、轻烃占比偏低，以液体为主的原料结构导致中国蒸汽裂解制乙烯成本缺乏国际竞争力。例如，石脑油裂解制烯烃的能耗约为 570kgoe/吨，而乙烷裂解制乙烯的能耗只有 400kgoe/吨。因此，进一步优化原料结构，深入挖掘一体化增效潜力，提高乙烯裂解料中轻质化原料和低品位原料如炼厂轻烃、油田轻烃、凝析油、拔头油等的比重，仍是蒸汽裂解制乙烯企业降低烯烃生产成本的重要任务。以镇海炼化为例，虽然受产量、价格、质量等各个因素的制约，但是其已逐步增加轻质原料的进口量作为自产原料的补充。2022 年 1 月份，120 万吨/年乙烯工程投产，其中计划外购丙烷 35 万吨/年作为乙烯原料，也将外购天然气作为动力中心燃料。

预计将来中国轻烃路线烯烃将进一步提高。预计到 2025 年中国轻烃路线（包括乙烷、丙烷等）乙烯产能将由目前的 21.7% 增加到 23%，到 2030 年进一步增加到 30%，到 2060 年达到 40% 左右。

4.3.2 适度发展低碳原料

4.3.2.1 适度增加天然气作为化工原料使用规模

受限于中国资源禀赋特点，煤炭在中国石化行业占比较高。随着自产天然气的开发和进口天然气的增加，以及交通及其他

领域电气化的发展，适度调整天然气消费结构，提高天然气在中国石化行业原料中的消费比例，对中国石化行业从源头上进行节能减碳有重要意义。

推进天然气制氢替代煤制氢。在石化行业中煤炭原料主要用于制氢，2021 年石化行业制氢用煤至少为 840 万吨，排放二氧化碳约 1800 万吨，如利用天然气制氢替代煤制氢，碳排放可下降约 900 万吨。

甲烷二氧化碳干重整。利用甲烷和二氧化碳为原料生产一氧化碳和氢气，实现天然气的原料化利用和二氧化碳的资源化利用。合成气与富氢原料（焦炉气、可再生能源制氢）结合可进一步生产化学品。

发展合成气一步法制烯烃。合成气一步法制烯烃技术是指利用合成气在催化剂作用下生产烯烃。相对于目前由合成气制甲醇、甲醇制烯烃的两步法工艺，直接法省去了甲醇合成这一中间过程，具有流程短、能效高、投资和运行费用较低等显著优势，并能够进一步促进天然气在石化行业中的原料化利用。合成气直接制烯烃或基于费托合成反应（Fischer-Tropsch to Olefins, FTO）或依靠具有双功能的氧化物-分子筛催化剂。

4.3.2.2 促进丙烷、乙烷、甲醇等轻质原料使用

促进丙烷脱氢制丙烯发展。2013 年天津渤化 60 万吨/丙烷制丙烯投产，是中国首套丙烷制丙烯装置。之后中国丙烷制丙烯产业快速发展，至今已经形成产业化，目前建成产能已经达到约 618 万吨/年，在建及规划丙烷制丙烯项目产能据不完全统计约 165 万吨/年。考虑到在建及规划项目产能、原料供应以及丙烯市场增长放缓因素，预计丙烷制丙烯开工率会有所下降，到 2025 年新增进口丙烷制丙烯产量达到 200 万吨，之后增速将有所放缓。

中国目前主要乙烷制乙烯项目如表 4.2 所示：

表 4-2: 中国部分乙烷制乙烯项目

序号	公司	所在地	产能, 万吨 / 年	投产时间	状态
1	新浦化学	江苏泰兴	65	2019 年	已投产, 进口原料
2	华泰盛富聚合材料	浙江宁波	40	2021 年	已投产, 进口原料
3	中国石油	新疆巴州	60	2021 年	已投产, 国内原料
4	中国石油	陕西榆林	80	2021 年	已投产, 国内原料
5	卫星石化	江苏连云港	125	2021 年	已投产, 进口原料
			125	2022 年	在建, 进口原料
6	南山集团	山东龙口	2×100		前期工作, 进口原料
7	阳煤集团	山东青岛	150		前期工作, 进口原料
8	鲁清石化	山东寿光	75		前期工作, 进口原料
9	汇昆新材料	辽宁大连	2×100		前期工作, 进口原料
10	聚能重工集团	辽宁锦州	2×100		前期工作, 进口原料
11	同益实业	辽宁大连	100		前期工作, 进口原料
12	天津渤化	天津南港	100		前期工作, 进口原料
13	东华能源	河北曹妃甸	2×100		前期工作, 进口原料
14	广西投资集团	广西钦州	60		前期工作, 进口原料
15	缘泰石油	福建福清	2×100		前期工作, 进口原料
	合计		1980		

煤制烯烃 / 甲醇制烯烃已经成为中国烯烃产品的重要工艺路线之一。2020 年煤制烯烃 / 甲醇制烯烃产能为 1411 万吨 / 年, 其中乙烯产能约 687 万吨 / 年, 产能占乙烯总产能的比例约为 25%。与国内主要采用煤作为原料生产甲醇不同, 国外甲醇生产绝大多数采用天然气作为原料, 全球天然气路线的甲醇产能约占总产能的 60% (不包括一体化煤制烯烃项目中中间产品甲醇产能)。2021 年我国进口甲醇达到 1120 万吨, 占国内总消费量 8846 万吨的比例为 12.7%。2021 年阿联酋、阿曼、新西兰、沙特和特立尼达和多巴哥是我国甲醇的前 5 大来源国, 合计进口量达到 948 万吨, 占总进口量的比例为 84.7%。近 10 年间我国甲醇进口量不断增长, 2021 年进口量是 2011 年进口量的 2 倍。

虽然甲醇制烯烃工艺吨乙烯碳排放为 2.73 吨 CO₂, 高于蒸汽裂解路线吨乙烯碳排放 (1.44 吨 CO₂), 但是考虑到蒸汽裂解路线吨乙烯需要乙烯料 (石脑油及其他原料) 约 3.3 吨, 按照炼油单位加工量碳排放 0.325 吨 CO₂ 计算, 考虑到炼油能耗后蒸汽裂解路线吨乙烯碳排放就达到了 2.51 吨 CO₂, 与甲醇制烯烃路线吨乙烯碳排放差别不大。而且炼油装置在生产石脑油等乙烯料的同时又伴随着更多的汽油、柴油等产品产生, 考虑到生产成品油的能耗, 蒸汽裂解路线乙烯单位产品碳排放就会高于甲醇制烯烃路线乙烯单位产品碳排放。因此利用进口甲醇制烯烃将能促进石化行业节能降碳, 同时还起到降低石油消费、促进石化行业原料多元化和产业安全的作用。

4.3.3 促进生物基材料发展

石化行业需求侧替代发展的核心是使用非石油基材料替代石油基材料, 其中的重点是发展生物基材料。生物基材料是指利用可再生生物质, 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的新型材料。

生物基材料不但可以减少对石油的消耗, 而且其可降解性大大优于一般的石油基产品, 有利于减少塑料废弃物污染, 对环境保护有重要意义。中国生物产业“十三五”发展规划中指出要“建立有机酸、化工醇、烯烃、烷烃、芳烃、有机胺等基

础化工产品的生物制造路线, 取得对石油路线的竞争优势, 实现规模化生物法生产与应用; 推进化工聚合材料单体多元醇、羟基羧酸、烯酸等的生物制造和聚合改性技术等的发展与应用, 推动生物基聚酯、生物基聚氨酯、生物尼龙、生物橡胶、微生物多糖、海洋生物材料等规模化生产和示范应用, 实现生物基材料产业的链条式、集聚化、规模化发展; 大幅度提升氨基酸、维生素等大宗发酵产品的产业自主创新能力和国际竞争水平, 实现产业的良性和高端化发展。”

目前生物基材料包括聚二元酸二元醇酯、聚乳酸 (PLA)、聚羟基脂肪酸酯 (PHA、PHBV) 以及天然高分子淀粉与其共混物 (淀粉 /PVA、淀粉 /PBS、淀粉 /PLA) 等。其中聚二元酸二元醇酯包括聚丁二酸丁二酯 (PBS)、聚丁二酸 - 己二酸丁二酯 (PBSA)、聚对苯二甲酸 - 己二酸丁二酯 (PBAT) 等产品。

聚乳酸 (PLA) 是比较典型的生物基材料, 其原料乳酸通过淀粉发酵制备得到, 目前市场工艺和技术已经非常成熟。聚乳酸可在自然环境或堆肥条件下完全降解, 对环境无毒无害, 随着生产成本的降低以及性能的提高, 可以逐渐在包装领域取代传统的聚乙烯 (PE) 聚苯乙烯 (PS) 等材料, 降低石油消耗和环境污染。根据中国生物基材料的发展情况, 中国生物及材料有望实现较快增长, 所替代的石油消费量也随之较快增加, 从而起到一定的减排效果。

全球范围内, 发展低碳能源产品已经是当前多数国际石油公司的重要发展战略, 一方面关停小规模、设备老旧的传统炼油厂, 另一方面转向生物燃料, 比如可持续航空燃料油。生产生物质燃料的优点在于可以利用已有炼化装置。通过改造现有的炼厂, 可生产氢化生物柴油 (HVO), 与普通柴油相比, 可再生柴油的温室气体排放可减 50% 以上, 同时减少了资本成本、建设时间和风险, 案例包括埃尼公司的 Venice 炼厂和道达尔能源公司的 LaMède 炼厂等。可再生柴油业务在美国正蓬勃发展。截至 2021 年 1 月 1 日, 美国有 75 个生物柴油生产设施, 年总生产能力约为 24 亿加仑¹⁴。欧美炼油厂还使用现有资产共同处理原油和生物油, 即联合处理装置。生物质可在不同装置点插入, 被制成生物燃料。联合处理使可再生燃料生产与现有炼厂基础设施能够简单而高效地整合, 并为炼油厂提供所需的灵活性。

14 EIA, Biodiesel is the second-most used and produced biofuel in the United States[EB/OL].2022. <https://www.eia.gov/energyexplained/biofuels/biodiesel-rd-other-use-supply.php>

4.4 发展绿氢

氢气是石化行业的重要原料，也是石化行业二氧化碳排放的来源之一。绿氢可以在绿电无法发挥作用的领域实现互补，

促进以氢为原料的行业深度脱碳。面向未来，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行业脱碳。不同原料制氢排放二氧化碳情况如表 4.3 所示。

表 4-3: 中国不同原料制氢排放二氧化碳情况

序号	制氢方法	特点	制氢能力占比	备注
1	煤制氢	以煤为原料，碳排放高，(22kgCO ₂ /kgH ₂)	65.3%	绿氢替代有潜力
2	焦炭和兰炭副产氢	副产氢，碳排放低，属于清洁氢 (≤4.9kgCO ₂ /kgH ₂)	19.3%	
3	天然气制氢	以天然气为原料，碳排放较低，属于低碳氢 (≤14.51kgCO ₂ /kgH ₂)	9.7%	绿氢替代有潜力
4	氯碱及其他副产氢	副产氢，碳排放低，属于清洁氢 (≤4.9kgCO ₂ /kgH ₂)	3.3%	无
5	甲醇制氢	以甲醇为原料，碳排放高 (14.9kgCO ₂ /kgH ₂)	1.8%	绿氢替代有潜力
6	其他 (电解水制氢)	如果采用网电，碳排放最高 (28.5kgCO ₂ /kgH ₂)	0.5%	绿氢替代有潜力

备注：副产氢受上游装置制约必须产生，因而无法也没有必要用绿氢代替。

每千克绿电制氢所产生的二氧化碳排放量 (≤ 4.9 千克 / 千克，参考团体标准《T/CAB0078-2020 低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价》) 比煤化工制氢二氧化碳排放量 (22 千克 / 千克) 至少降低了 17.1 千克。从上表来看煤制氢由于其产能占比较大、单位产品碳排放量高的特点，应成为绿氢所替代的首要方向。目前石化行业煤制氢规模超过 100 万吨 / 年，如果都采用绿氢，最大可减排 2200 万吨二氧化碳。

全球石化巨头都在积极部署绿氢项目，2021 年，壳牌启动了欧洲最大的质子交换膜 (PEM) 电解槽项目，设施位于科隆附近的壳牌公司莱茵兰 (Rheinland) 能源和化学园区，可年产 1300 吨“绿氢”，利用可再生能源产生的电力生产氢气

有助于显著减少莱茵兰炼厂的二氧化碳排放¹⁵。BP 和丹麦可再生能源集团沃旭能源公司 (Orsted) 合作，将在 BP 的林根 (Lingen) 炼油厂共同开发一个 50 兆瓦的可再生氢项目，利用北海的风能，通过电解水来生产绿氢，每年可产生 9000 吨氢气¹⁶。

通过推进使用绿氢，到 2025 年石化行业绿氢应用达到 10 万吨 / 年，到 2030 年达到 30 万吨 / 年，到 2060 年达到超过 300 万吨 / 年，与“基准情景”下以天然气制氢为主相比，年减排二氧化碳量约 4200 万吨 / 年。

¹⁵ SHELL, Shell starts up Europe's largest PEM green hydrogen electrolyser [EB/OL], <https://www.shell.com/media/news-and-media-releases/2021/shell-starts-up-europes-largest-pem-green-hydrogen-electrolyser.html>

¹⁶ bp, bp plans major green hydrogen project in Teesside [EB],2021

4.5 CCUS 与化工行业碳利用

碳捕捉、封存和利用 (CCUS) 是石化产品实现碳中和的重要路径, 成本的大幅度下降是普及 CCUS 的关键。工艺过程中产生的碳排放相对集中, 更利于 CCUS 的应用。在已有的制氢设施配套 CCS 系统, 可避免闲置资产处置和提高经济效益。有研究预测到 2050 年, CCS 是潜在的最便宜的实现石化行业零排放的手段, 大概能减少高附加值化学品生产中 40% 的二氧化碳的排放量¹⁷。据 IEA 的分析, 如果没有 CCS 的参与, 实现巴黎协定目标的花费将会上涨 40%。欧洲炼化环保机构 Concave 预测, 如果炼化行业部署足够的 CCS 设施, 2050 年炼化行业的碳排放将会降低 70%, 反之只有 50%¹⁸。本报告预

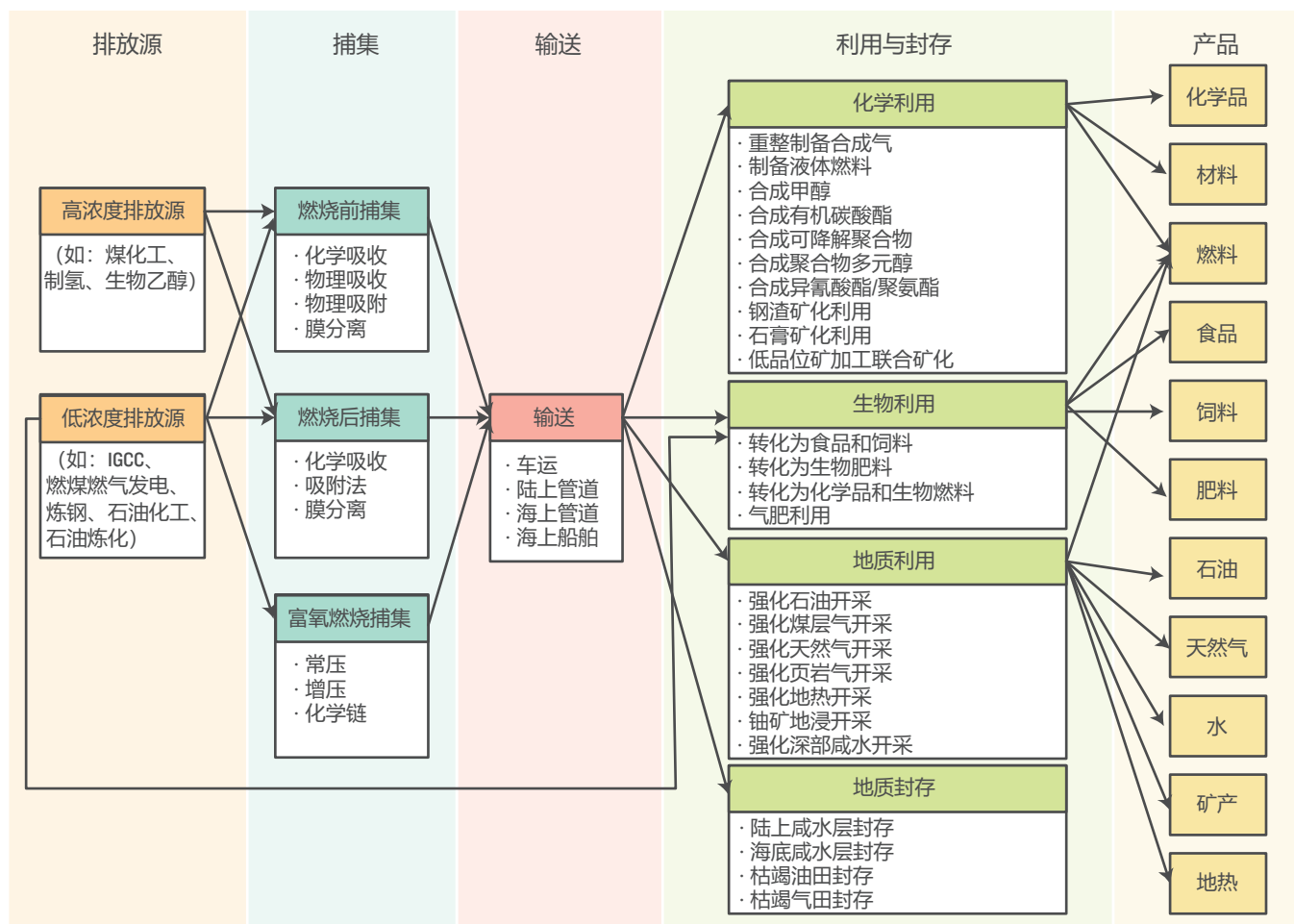
测通过采用 CCUS 手段, 到 2060 年与基准情景相比能降低约 3000 万吨左右的碳排放。

2022 年 8 月, 工业和信息化部, 国家发展改革委生态环境部联合颁布了《工业领域碳达峰实施方案》, 将推动绿色低碳技术的突破, 包括碳捕集利用封存和温和条件二氧化碳资源化利用等关键核心技术, 并加快部署大规模碳捕集利用封存产业化示范项目。工信部等六部门联合印发的《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》也提出, 石化化工企业应因地制宜、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、驱油和制化学品等示范。

17 BloombergNEF, \$759 Billion Required for a Net-Zero Petrochemicals Sector by 2050[EB/OL],2022 <https://about.bnef.com/blog/759-billion-required-for-a-net-zero-petrochemicals-sector-by-2050/>

18 REALISE CCUS, CCUS & Refineries[EB/OL],2022, <https://realiseccus.eu/ccus-and-refineries>

图 4-2: CCUS 技术流程及分类示意图



数据来源: 科技部社会发展科技司, 中国 21 世纪议程管理中心, 中国碳捕集, 利用与封存 (CCUS) 技术发展路线

从国际上看, 位于北海港口的 Carbon Connect Delta 项目, 计划捕捉来自荷兰和比利时石化, 化工和钢铁等工业的二氧化碳排放, 封存于北海的枯竭气田。可行性研究于 2020 年底完成, 预计到 2030 年, 碳捕捉能力达到 650 万吨/年, 这将贡献超过 40% 的荷兰到 2030 年的减排目标。在欧洲, 其他的工业集群, 甚至跨国 CCS 设施也在积极部署中¹⁹。

美国德克斯萨的空气产品公司部署了第一家商业规模化的蒸汽甲烷重整装备加碳捕捉装置, 此项目位于亚瑟港的 Valero

炼化工厂。项目 2013 年投产, 每年捕捉大约 1 百万吨的二氧化碳, 被运输到德克萨斯油田用来驱油²⁰。另一个石化行业 CCUS 的案例是美国 Sturgeon 炼化工厂, 将废沥青转化氢气产生的二氧化碳捕捉, 并用于油田驱油 (EOR), 每年大约储存 120 ~ 140 万吨二氧化碳²¹。

中国的 CCS 地质封存潜力约为 1.21 到 4.13 万亿吨, 适合进行碳捕集和封存的地点主要集中在东北、西北、华北南部、四川盆地等地区。中国油田主要集中在松辽盆地、渤海湾盆

19 Smart delta resources, Carbon Connect Delta[EB/OL], 2021 <https://www.smartdeltaresources.com/en/carbon-connect-delta>

20 Preston, C. "The Carbon Capture Project at Air Products' Port Arthur Hydrogen Production Facility." [J]2018. 14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference. Melbourne, October 21-26.

21 MIT (Massachusetts Institute of Technology). "Alberta Carbon Trunk Line Fact Sheet: Carbon Dioxide Capture and Storage Project." [EB/OL], 2016. www.sequestration.mit.edu/tools/projects/alberta_trunk_line.html.

地、鄂尔多斯盆地和准噶尔盆地，气藏主要分布于鄂尔多斯盆地、四川盆地、渤海湾盆地和塔里木盆地，中国深部咸水层的CO₂封存容量约为2.4万亿吨，其分布与含油气盆地分布基本相同²²。

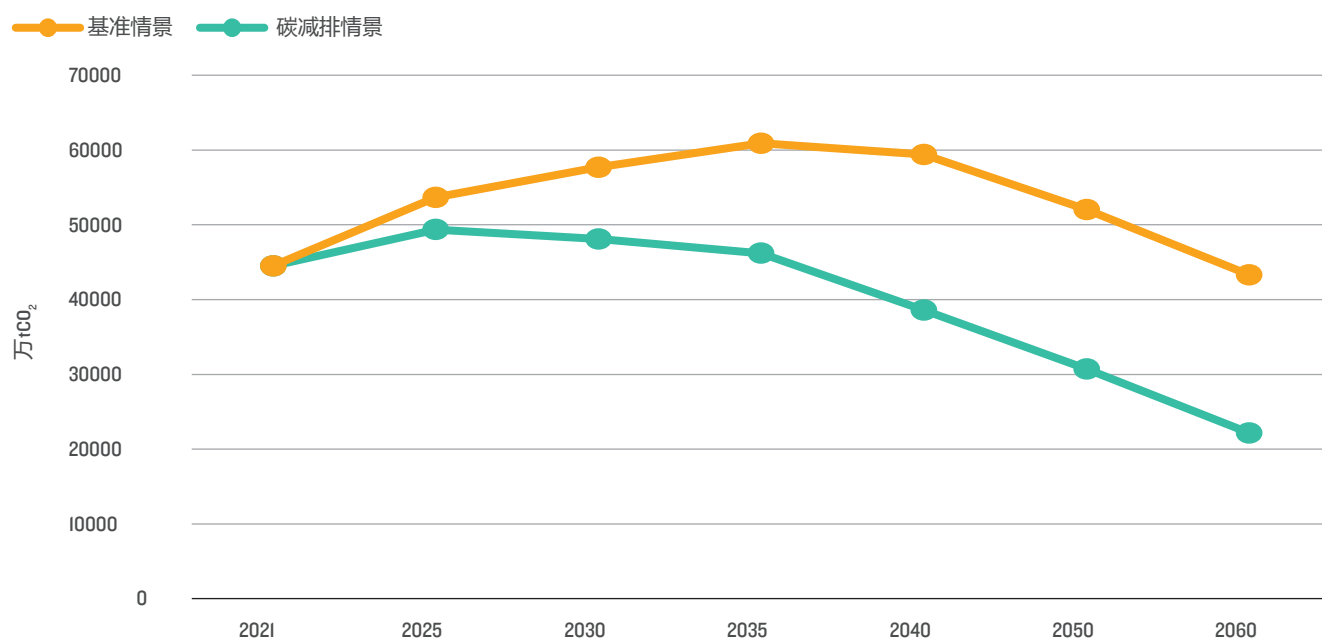
目前我国石化行业在碳利用方面，还是以驱油和驱气的地质利用为主要方式，短期内具有较高的可行性。比如2022年8月投产的全国最大的CCUS驱油项目：齐鲁石化胜利油田CCUS项目。该项目将化肥厂的煤制气装置排放的二氧化碳经过收集，压缩，干燥脱水和提纯，再注入胜利油田油井，达到碳封存和驱油的目的。项目覆盖地质储量约2500万吨，年减排二氧化碳百万吨，预计未来15年可实现增油将近300万吨。镇海炼化靠近东海领域，目前项目也在考虑在陆地陆海一体盆地进行碳封存试点，远期考虑海洋碳封存。

二氧化碳也可以作为原料，制成合成能源和高附加值化工品，实现资源化利用。通过使用绿氢和二氧化碳反应制甲醇、制航煤、制甲烷、制芳烃等多种途径进一步起到捕碳减碳的作用。

4.6 主要路径碳减排潜力综合评估

在实施上述路径的条件下，到2060年，与基准情景相比，中国石化行业二氧化碳排放量从4.33亿吨降低到2.21亿吨。实施上述路径与基准情景下碳排放的对比如图4.3所示。

图4-3: 碳减排情景与基准情景的碳排放比较



22 生态环境部环境规划院，中国科学院武汉岩土力学研究所等，中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 [R].2021

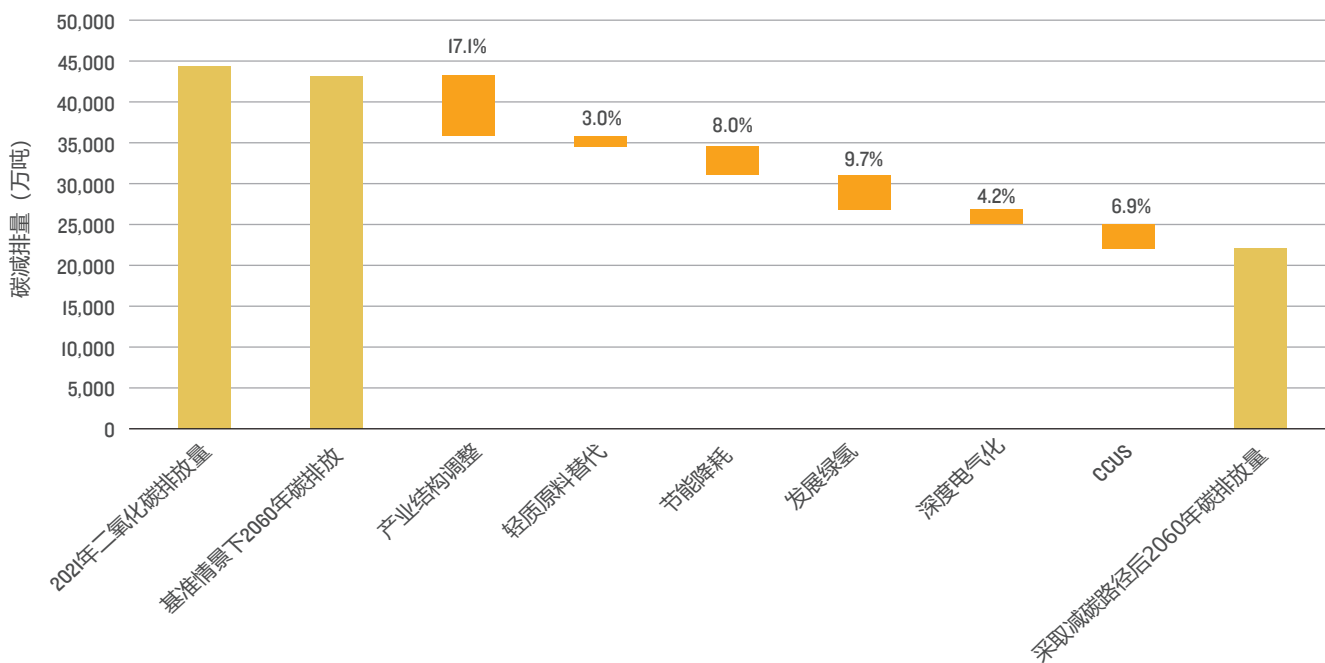
2060 年主要路径减碳潜力如下表所示。

表 4-4: 中国石化行业主要路径碳减排潜力汇总表

序号	项目	排放量与减排量, 万吨 CO2	减排占比
1	基准情景下 2060 年碳排放	43300	/
2	主要碳减排路径的减排量	-21200	48.96%
2.1	产业结构调整	(-7400)	17.09%
2.2	轻质原料替代	(-1300)	3.00%
2.3	节能降耗	(-3500)	8.08%
2.4	发展绿氢	(-4200)	9.70%
2.5	深度电气化	(-1800)	4.16%
2.6	CCUS	(-3000)	6.93%
3	采取减碳路径后碳排放量	22100	/

到 2060 年各路径的碳减排潜力如下图所示。

图 4-4: 中国石化行业主要碳减排路径减排潜力



中国石化行业碳达峰 碳减排路线图与效益评估

综合来看，中国石化行业应采用多措并举、全面发力的路径促进行业尽快减排、尽早达峰。一是从源头上进行供给侧改革、调整产业结构、调整原料结构，实现源头减碳。二是在过程中通过节能降耗、发展绿氢和深度电气化等措施提高加工效率，实现过程减碳。三是以 CCUS 作为兜底手段，实现末端减碳。在节能降耗方面，促进行业重点产品单位能耗在 2030 年

整体达到目前的标杆值或者先进值，之后继续下降；在产业结构调整方面，降低油品生产与消费、稳定乙烯当量自给率；在轻质原料替代方面，不断提高非石脑油路线制乙烯产量；在发展绿氢方面，不断提高绿氢应用规模；在深度电气化方面，首先提高动设备电气化程度，同时逐步深化工艺装置电气化程度。在 CCUS 方面，稳步提高捕集利用二氧化碳规模。

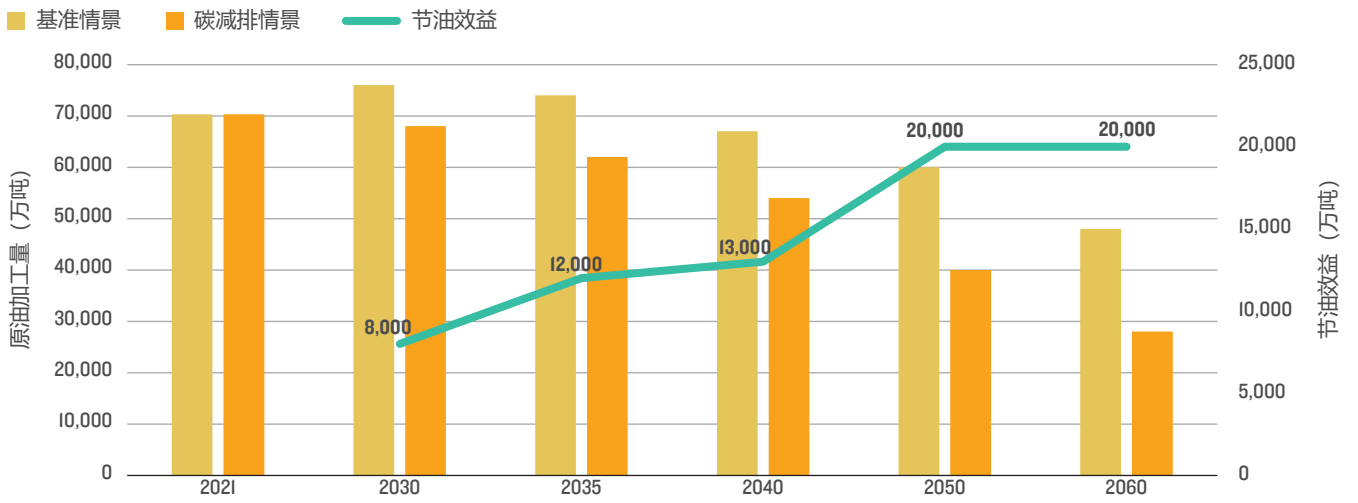
表 5-1: 中国石化行业碳减排时间表

	2021-2030	2030-2040	2040-2050	2050-2060
产业结构调整	<ul style="list-style-type: none"> 汽柴油消费稳步下降； 煤油消费持续增加；受航空需求拉动到 2040 年前一直增加； 乙烯当量自给率上升到 70%； 	<ul style="list-style-type: none"> 汽柴油消费稳步下降； 煤油消费持续增加； 乙烯当量自给率保持在 70%； 	<ul style="list-style-type: none"> 汽柴油消费稳步下降； 煤油消费基本平稳； 乙烯当量自给率保持在 70%； 	<ul style="list-style-type: none"> 汽柴油消费稳步下降； 煤油消费开始下降； 乙烯当量自给率保持在 70%；
轻质原料替代	<ul style="list-style-type: none"> 非石脑油路线乙烯达到 25% 	<ul style="list-style-type: none"> 非石脑油路线乙烯达到 30% 	<ul style="list-style-type: none"> 非石脑油路线乙烯达到 35% 	<ul style="list-style-type: none"> 非石脑油路线乙烯达到 40%
节能降耗	<ul style="list-style-type: none"> 100% 的产能达到目前的能耗标杆值或者先进值要求 	<ul style="list-style-type: none"> 重点产品单位能耗比 2030 年下降 4% 	<ul style="list-style-type: none"> 重点产品单位能耗比 2040 年下降 4% 	<ul style="list-style-type: none"> 重点产品单位能耗比 2050 年下降 4%
发展绿氢	<ul style="list-style-type: none"> 绿氢使用达到 30 万吨 / 年 	<ul style="list-style-type: none"> 绿氢使用达到 50 万吨 / 年 	<ul style="list-style-type: none"> 绿氢使用达到 100 万吨 / 年 	<ul style="list-style-type: none"> 绿氢使用达到超过 >300 万吨 / 年
深度电气化	<ul style="list-style-type: none"> 动设备电气化率达到 80%；电加热蒸汽裂解等工艺过程深度电气化技术开始示范。 	<ul style="list-style-type: none"> 动设备电气化率达到 100%；电加热蒸汽裂解等工艺过程深度电气化技术开始应用 	<ul style="list-style-type: none"> 动设备电气化率达到 100%；电加热蒸汽裂解等工艺过程深度电气化技术开始推广 	<ul style="list-style-type: none"> 动设备电气化率达到 100%；电加热蒸汽裂解等工艺过程深度电气化技术占比达到三分之一
CCUS	<ul style="list-style-type: none"> 捕集利用 500 万吨 CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> 捕集利用 1000 万吨 CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> 捕集利用 2000 万吨 CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> 年均捕集利用 3000 万吨 CO₂

采取碳减排措施不但取得降低碳排放的直接效益，控制和降低石油消费也是碳减排措施的必然效果。在采取碳减排路径后，与基准情景相比，石油消费量显著下降，到 2060 年石油

消费量仅为 2.8 亿吨左右，按中国石油自产 2 亿吨考虑，石油对外依存度将从现在的超过 70% 下降到 29%。

图5-1: 采取碳减排路径后取得的节油效益



6

政策建议

1) 控制产能

严格控制炼油产能，淘汰落后产能，推进炼油产业结构调整，按照《石化产业规划布局方案》促进炼油和石化行业大型化、一体化发展。到2025年控制炼油产能在9.3亿吨/年以内，之后炼油产能只减不增。对东部地区及环渤海地区500万吨/年及以下炼厂淘汰或者进行产能等量减量置换。在全国范围内推进炼油产能指标交易。控制自备热电建设，新建石化项目不再建设自备煤电厂。

2) 制定标准

针对低碳发展导向，完善重点产品能耗限额标准，编制重点石化产品碳排放限额标准。在绿色制造体系的基础上，建立完善低碳评价体系，建立碳回收再利用产品的认证、绿色低碳技术评估等服务体系和平台。

3) 推广技术

及时更新《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南》，推广应用成熟节能降碳技术。鼓励先进技术研发，在炼油和乙烯行业重点支持推动渣油浆态床加氢等劣质重油原料加

工、先进分离、组分炼油及分子炼油、低成本增产烯烃和芳烃、原油直接裂解、电裂解炉、合成气一步法制烯烃、电化学还原二氧化碳制乙烯技术开发应用。鼓励现有装置进行电气化改造，提高电气化程度，加强装备电气化与绿色能源、绿色氢能耦合利用技术应用。适应石化行业高要求，进一步提高电力技术成熟度，电气化设备安全可靠。在芳烃行业重点加强国产模拟移动床吸附分离成套（SorPX）技术，以及吸附塔格栅、模拟移动床控制系统、大型化二甲苯塔及二甲苯重沸炉等技术装置的开发应用，提高运行效率，降低装置能耗和排放。

4) 资金支持

加快推进碳交易体系建设，推动石化行业在2023-2024年能纳入碳交易市场。完善有利于绿色低碳发展的财税、价格、金融、土地、政府采购等政策。积极发展绿色金融，配套专项基金、低碳转型资金、低碳信贷等相关政策对应用绿色低碳技术进行扶持，推动绿色低碳技术创新，突破和推广应用低碳前沿技术，降低企业减碳成本，特别是推动绿电和绿氢的成本降低，提高行业利用可再生能源比例。

附录

碳排放计算依据

参照国标《温室气体排放核算与报告要求 第10部分：化工生产企业》(GB/T 32151.10-2015)，化工生产企业的温室气体排放为各个核算单元的化石燃料燃烧产生的二氧化碳排

放、生产过程中的二氧化碳排放和氧化亚氮排放(如果有)、购入电力、热力产生的二氧化碳排放之和，同时扣除回收且外供的二氧化碳的量(如果有)，以及输出的电力、热力所对应的二氧化碳量(如果有)，按下式计算：

$$E = \sum_i (E_{\text{燃烧},i} + E_{\text{过程},i} + E_{\text{购入电},i} + E_{\text{购入热},i} - R_{\text{CO}_2\text{回收},i} - E_{\text{输出电},i} - E_{\text{输出热},i})$$

燃料燃烧排放

燃料燃烧排放包括煤、油、气等化石燃料在各种类型的固定燃烧设备(如锅炉、煅烧炉、窑炉、熔炉、内燃机等)或移

动燃烧设备(厂内机动车辆)中发生氧化燃烧过程产生的二氧化碳排放，按下式计算：

$$E_{\text{燃烧},i} = \left[\sum_{j=1}^n \left(AD_j \times CC_j \times OF_j \times \frac{44}{12} \right) \right] \times GWP_{\text{CO}_2}$$

- $E_{\text{燃烧},i}$ —— 核算期内核算单元*i*的燃料燃烧产生的二氧化碳排放量，单位为吨二氧化碳当量(tCO₂e)；
- AD_j —— 核算期内第*j*种化石燃料用作燃料燃烧的消费量，对固体或液体燃料，单位为吨(t)；对气体燃料，单位为万标立方米(10⁴Nm³)；
- CC_j —— 核算期内第*j*种化石燃料的含碳量，对固体和液体燃料，单位为吨碳每吨(tC/t)；对气体燃料，单位为吨碳每万标立方米(tC/10⁴Nm³)；
- OF_j —— 核算期内第*j*种化石燃料的碳氧化率；
- GWP_{CO_2} —— 二氧化碳的全球变暖潜势，取值为1；
- $\frac{44}{12}$ —— 二氧化碳与碳的相对分子质量之比；
- i —— 核算单元编号；
- j —— 化石燃料类型代号。

工业生产过程中的碳平衡

过程排放是指化石燃料和其他碳氢化合物用作原材料产生的二氧化碳排放以及碳酸盐使用过程（如石灰石、白云石等用

作原材料、助溶剂或脱硫剂等）分解产生的二氧化碳排放。根据原料输入的碳量以及产品输出的碳量按碳质量平衡法计算，按下式计算：

$$E_{\text{CO}_2 \text{原料}, i} = \left\{ \sum_r (AD_{i,r} \times CC_{i,r}) - \left[\sum_p (AD_{i,p} \times CC_{i,p}) + \sum_w (AD_{i,w} \times CC_{i,w}) \right] \right\} \times \frac{44}{12}$$

- $E_{\text{CO}_2 \text{原料}, i}$ —— 第 i 个核算单元的化石燃料和其他碳氢化合物用作原料产生的二氧化碳排放，单位为吨二氧化碳（ tCO_2 ）；
- $AD_{i,r}$ —— 第 i 个核算单元的原料 r 的投入量，对固体或液体原料，单位为吨（ t ）；对气体原料，单位为万标立方米（ 10^4Nm^3 ）；
- $CC_{i,r}$ —— 第 i 个核算单元的原料 r 的含碳量，对固体或液体原料，单位为吨碳每吨（ tC/t ）；对气体原料，单位为吨碳每万标立方米（ $\text{tC}/10^4 \text{Nm}^3$ ）；
- r —— 进入核算单元的原料种类，如具体品种的化石燃料、具体名称的碳氢化合物、碳电极以及二氧化碳原料；
- $AD_{i,p}$ —— 第 i 个核算单元的碳产品 p 的产量，对固体或液体产品，单位为吨（ t ）；对气体产品，单位为万标立方米（ 10^4Nm^3 ）；
- $CC_{i,p}$ —— 第 i 个核算单元的碳产品 p 的含碳量，对固体或液体产品，单位为吨碳每吨（ tC/t ）；对气体产品，单位为吨碳每万标立方米（ $\text{tC}/10^4 \text{Nm}^3$ ）；
- p —— 流出核算单元的含碳产品种类，包括各种具体名称的主产品、联产产品、副产品等；
- $AD_{i,w}$ —— 第 i 个核算单元的其他含碳输出物 w 的输出量，单位为吨（ t ）；
- $CC_{i,w}$ —— 第 i 个核算单元的其他含碳输出物 w 的含碳量，单位为吨碳每吨（ tC/t ）；
- w —— 流出核算单元且没有计入产品范畴的其他含碳输出物种类，如炉渣、粉尘、污泥等含碳的废弃物；
- $\frac{44}{12}$ —— 二氧化碳与碳的相对分子质量之比。

碳平衡测算法是石化化工行业排放量计算的重要方法，以流入、流出核算单元的总量平衡为前提，确保计算不产生漏项。以未计入产品的废弃物为例，其含碳量和是否归属排放，需要根据具体情况区分：

废渣：废渣及高浓度废液中的碳根据处理方式不同，填埋或回收的残碳被固定下来，而做燃料利用的残碳最终均纳入碳排放中，用作生产系统燃料时核减公用工程消耗。

废水：废水处理最终的污泥焚烧可能会产生极少量的含碳有机化合物，它们在后续处理或自然环境中最终将氧化成二氧化碳，因此以二氧化碳当量作为温室气体排放计入本生产单元。

弛放气及可燃气：尾气 / 弛放气及其它工艺过程中产生的可燃气也用做其它生产单元的原料或燃料，这部分碳排放仍计入生产单元中。

二氧化碳回收利用量

主要指回收燃料燃烧或工业生产过程的二氧化碳并作为产品外供给其他单位从而应予扣减的那部分二氧化碳，不包括企业现场回收自用的部分。

净购入的电力、热力产生的排放

重点子行业典型企业的净购入电力（消费 - 输出）所对应的二氧化碳排放，电力的排放因子选取国家主管部门的最近年份发布数据的电网排放因子。

重点子行业典型企业的净购入热力（消费 - 输出）所对应的二氧化碳排放，热力消费的排放因子取推荐值 $0.11 \text{tCO}_2/\text{GJ}$ 。

参数

我国目前关于温室气体排放核算的指导文件，主要参考《2006年IPCC国家温室气体清单指南》、《IPCC国家温室气体清单优良作法指南和不确定性管理》、《省级温室气体清单

编制指南（试行）》等文献资料，部分结合行业经验值，整理出常见化石燃料品种和化工产品的排放因子参数，供不具备实测条件的企业参考使用，如下表。

附录表：常见石化燃料特性参数推荐值

燃料品种	计量单位	低位发热量 GJ/t 或 GJ/10 ⁴ Nm ³	单位热值含碳量 tC/GJ	燃料碳氧化率	
固体燃料	无烟煤	t	26.7 ^c	27.4×10 ^{-3b}	94%
	烟煤	t	19.570 ^d	26.1×10 ^{-3b}	93%
	褐煤	t	11.9 ^e	28.0×10 ^{-3b}	96%
	洗精煤	t	26.334 ^a	25.41×10 ^{-3b}	93%
	其他洗煤	t	12.545 ^a	25.41×10 ^{-3b}	90%
	型煤	t	17.460 ^d	33.60×10 ^{-3d}	90%
	焦炭	t	28.435 ^a	29.5×10 ^{-3b}	93%
液体燃料	原油	t	41.816 ^a	20.1×10 ^{-3b}	98%
	燃料油	t	41.816 ^a	21.1×10 ^{-3b}	98%
	汽油	t	43.070 ^a	18.9×10 ^{-3b}	98%
	柴油	t	42.652 ^a	20.2×10 ^{-3b}	98%
	煤油	t	43.070 ^a	19.6×10 ^{-3b}	98%
	石油焦	t	32.5 ^c	27.50×10 ^{-3b}	98%
	其他石油制品	t	40.2 ^c	20.0×10 ^{-3c}	98%
	焦油	t	33.453 ^a	22.0×10 ^{-3c}	98%
	粗苯	t	41.816 ^a	22.7×10 ^{-3d}	98%
	炼厂干气	t	45.998 ^a	18.2×10 ^{-3b}	99%
	液化石油气	t	50.179 ^a	17.2×10 ^{-3b}	98%
液化天然气	t	44.2 ^c	17.2×10 ^{-3b}	98%	

燃料品种	计量单位	低位发热量 GJ/t 或 GJ/10 ⁴ Nm ³	单位热值含碳量 tC/GJ	燃料碳氧化率	
气体燃料	天然气	10 ⁴ Nm ³	389.31 ^a	15.3×10 ^{-3b}	99%
	焦炉煤气	10 ⁴ Nm ³	179.81 ^a	13.58×10 ^{-3b}	99%
	高炉煤气	10 ⁴ Nm ³	33.00 ^d	70.8×10 ^{-3c}	99%
	转炉煤气	10 ⁴ Nm ³	84.00 ^d	49.6×10 ^{-3d}	99%
	密闭电石炉气	10 ⁴ Nm ³	111.190 ^d	39.51×10 ^{-3d}	99%
	其他煤气	10 ⁴ Nm ³	52.270 ^a	12.2×10 ^{-3b}	99%

a 数据取值来源为《中国能源统计年鉴 2013》。

b 数据取值来源为《省级温室气体清单指南（试行）》。

c 数据取值来源为《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》。

d 数据取值来源为行业经验值。



本报告采用环保纸印刷