中国石油消费总量控制和政策研究项目
China Oil Consumption Cap Plan and Policy Research Project

北京大学能源研究院气候变化与能源转型项目

中国塑料行业绿色低碳发展研究报告

GREEN AND LOW CARBON DEVELOPMENT OF THE PLASTICS INDUSTRY IN CHINA

北京大学能源研究院
INSTITUTE OF ENERGY

2022.11

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》

中国塑料行业绿色低碳发展研究报告

Green and Low Carbon Development of the Plastics Industry in China

作　者

曹淑艳、陈雪景、张洵洋

2022 年 11 月

致谢

塑料的不当使用不仅浪费资源、产生环境污染，也对气候变化产生负面影响。中国是全球塑料生产、消费和进出口贸易最活跃的经济体，为梳理塑料全生命周期碳排放，探索不同的减碳路径，我们组织了此次研究工作。衷心感谢白荣春、戴彦德、毛达、Tom Sanzillo 等专家（以上中文姓名按拼音首字母顺序排列）在报告的调研和起草过程中给予的支持与协助。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 中国塑料行业现状 1

1.1 全球塑料行业背景 2

1.2 中国塑料总特征 3

1.3 中国塑料贸易：全球最大的塑料生产国，进口国和出口国 7

1.4 塑料使用对资源环境的影响 9

第2章 基准情景下塑料行业碳排放 12

2.1 塑料全生命周期碳排放强度 13

2.2 塑料物质流 15

2.3 塑料碳排放情况 18

第3章 中国塑料行业碳达峰碳中和路径 20

3.1 路径一：源头减量 21

3.2 路径二：生产过程强化 26

3.3 路径三：禁止塑料焚烧 28

3.4 路径四：负碳技术 28

3.5 路径总减排潜力 29

第4章 “碳达峰碳中和”目标导向的塑料减排时间表 30

4.1 碳达峰碳中和的行动核心 31

4.2 塑料行业脱碳整体时间表和保障措施 32

图目录

图1-1：1950-2025年全球塑料年产量 2
图1-2：1950-2020年中国初级形态塑料生产 3
图1-3：中国初级形态塑料年产均增长率 4
图1-4：基于理化性质的塑料分类 4
图1-5：中国塑料制品产量构成 5
图1-6：2021年中国初级塑料终端用途 6
图1-7：1992-2020年中国塑料分品种贸易规模：进口 7
图1-8：1992-2020年中国塑料分品种贸易规模：出口 8
图1-9：中国塑料制品和初级形态塑料出口和进口 8
图1-10：石油基“三烯三苯”生产的原油（消耗型）流动 9
图2-1：石油基塑料全生命周期碳足迹 14
图2-2：中国塑料树脂产量预测 15
图2-3：基准情景下塑料树脂产量预测 16
图2-4：用后塑料垃圾量预测 16
图2-5：2011-2020年中国生活垃圾处理情况 17
图2-6：2020-2060年基准情景下塑料物质流 18
图2-7：塑料全生命周期碳排放预测 19
图3-1：2040年完全淘汰一次性塑料情景下的树脂生产预测 21
图3-2：淘汰一次性塑料情景下的碳排放 22
图3-3：耐用塑料产量和塑料废弃物 23
图3-4：源头减量情景下的碳排放 23
图3-5：源头减量实现路径的预测 24
图3-6：塑料回收率预测 25
图3-7：源头减量情景下的塑料物质流 25
图3-8：中国塑料生产原料组成 26
图3-9：过程强化碳减排强度预测 27
图3-10：生产过程强化下的碳排放 27
图3-11：塑料焚烧量预测 28
图3-12：塑料行业碳减排情景分析 29
图3-13：四个路径下2060年的减碳量 29
图4-1：塑料行业碳达峰碳中和的行动核心 31
图4-2：2020-2060年分阶段实施重点 33
图4-3：闭环塑料循环经济：“五环”协同共建 35

表目录

表1-1：不同塑料种类进入包装领域的比例 6
表1-2：全球范围内关于限制和禁止一次性塑料使用的法令 11
表2-1：生活垃圾焚烧率预测 17
表4-1：塑料行业实现“碳达峰碳中和”目标重要时间节点 32

前言

中国是全球塑料生产、消费和进出口贸易最活跃的经济体。使用利用率低的塑料产品，不仅浪费资源，产生环境污染，也对气候变化造成负面影响。2022 年 3 月，联合国各成员国达成一致，同意制定一份具有法律约束力的防治塑料污染的国际协议，中国的行动对解决全球塑料污染问题有非常重要的作用。在中国“碳达峰碳中和”目标的背景下，中国塑料行业的高质量发展具有多重意义。

本报告通过深入研究中国塑料全生命周期的物质流，预测了从现在到 2060 年，基准情景下的碳排放总量，分析了行业碳达峰碳中和的路径，评估了每个核心路径下的碳减排潜力，得出了中国塑料行业“碳达峰碳中和”发展路线图，并提出了相关的政策建议。

执行摘要

中国国初级形态塑料生产在 1950 年至 2010 年期间总体呈指数增长态势，尽管自 2010 年增长率放缓，2020 年中国初级形态塑料年产量仍突破亿吨，占全球总产量的 28%。表观消费量约为 1.3 亿吨，进口 4063 万吨，依存度为 25.5%。 2020 年中国塑料制品产量约为 7603 万吨（规模以上企业产量）。塑料制品大部分用于包装和建材，包装行业的塑料通常使用一次就丢弃，从制造到废弃的平均生命周期不到两年。

2020 年，国内消费的塑料制品中约 40% 存留在系统之中，近 50% 被填埋或散落在自然之中，或因焚烧产生了温室气体排放，有效回收再利用比例仅为 10% 左右。塑料在其整个生命周期都会产生碳排放。在基准情景下，塑料全生命周期碳排放从 2020 年的 5.6 亿吨，将会增加到 2030 年的 7.7 亿吨和 2050 年的 11.7 亿吨。

减少塑料行业的碳排放，本质上需要减少塑料消费量及由此驱动的供应端减量，即源头减量，特别是在一次性塑料方面的减量。同时，需要通过利用清洁低碳生产技术和绿色能源进一步降低碳排放强度。减少塑料焚烧将是减碳的强有力措施，对于不可回收的塑料，禁焚也可以倒逼源头减量。 塑料作为化工行业下游产品的主要“担当”之一，绿色低碳发展对其是约束，也是机遇。未来中国化工行业的功能将发生重大转变，不应只是产品制造，而是制造和资源循环并重。塑料本质上是一种基于碳基材料的产品，如果对 CO_2 进行捕集并加以利用进而制成塑料，可实现塑料行业的碳利用。

报告分别分析了四条主要碳减排路径：源头减量、生产过程强化、禁止塑料焚烧和使用负碳技术，并为塑料行业助力中国在 2060 年前实现碳中和目标制定了相关路线图和保障措施。2020 年到 2030 年的实施重点为设计一次性塑料减量的总体路线，试点生产者责任延伸机制，加强塑料重复使用与回收机制 , 同时优化石化行业产能结构。2030 至 2040 年间，需要设立原生塑料总量控制目标，强化生产环节能效提升，提高绿电和绿色原料的使用。限制和禁止塑料焚烧、增加负碳技术应用等措施将在 2040-2060 期间发挥重要的减排作用。

“碳达峰碳中和”目标导向的塑料行业减排路线的重要节点

时间	重要节点
2030	• 废塑料回收率由 2020 年的 20% 增加到 2030 年的 34%； • 2028 年实现塑料行业碳达峰。
2040	• 原生初级形态塑料需求在 2030 年到 2035 年期间达峰； • 淘汰一次性塑料。
2050	• 禁止塑料垃圾焚烧； • 达到 100% 塑料回收率； • 实现 100% 绿色能源和过程； • 实现 100% 绿色原料。
2060	• 2060 年实现碳中和。

通过实施路线图和分阶段的保障措施，中国有望在 2028 年实现塑料行业碳排放达峰，峰值约为 6.5 亿吨，到 2050 年将碳排放控制在 1 亿吨左右，2060 年实现行业碳中和。

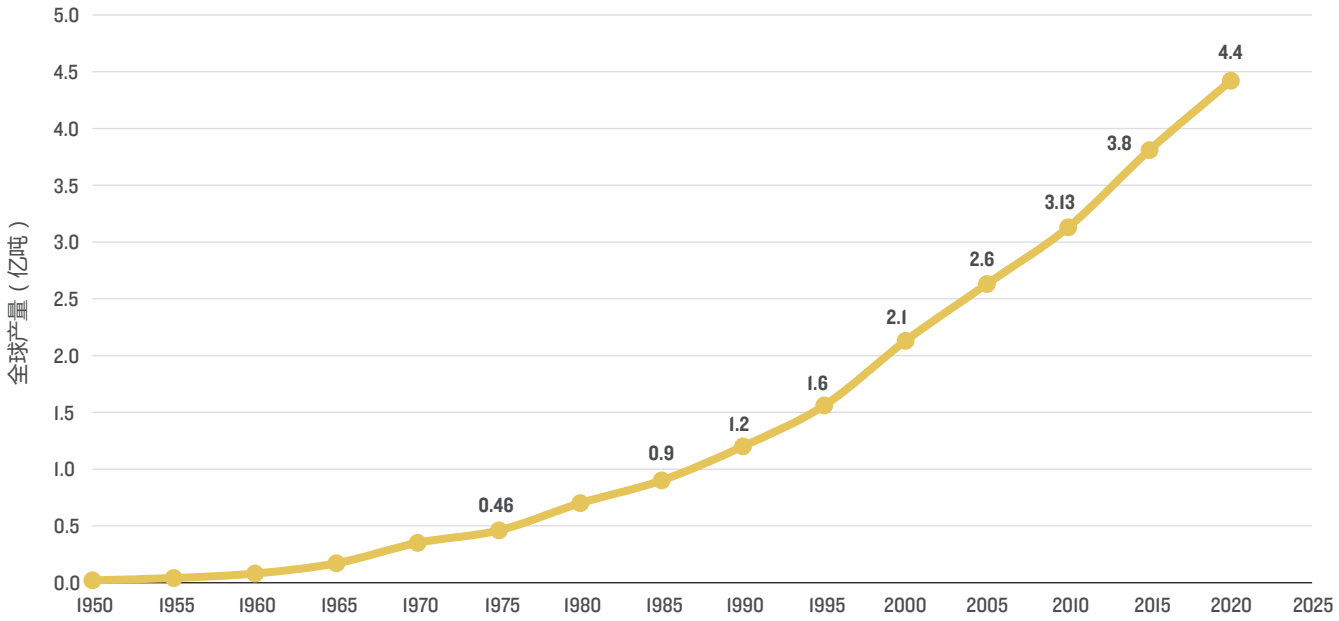
1

中国塑料行业现状

1.1 全球塑料行业背景

塑料，作为一种新的材料，自 1950 年逐渐进入规模化生产时代。轻质、耐用、好用的属性，迅速使塑料成为石油化工产品最大的需求方，中国石化行业大部分的产能用于生产塑料的基本原料，即乙烯和丙烯[1]。全球塑料生产与消费已经步入高速发展的规模，2016-2020 年，全球共生产了 22 亿吨塑料（含初级塑料树脂约 18 亿吨、塑料助剂约 1 亿吨，合成纤维 4 亿吨）。加上从 1950 到 2015 年累积产量，全球塑料累积产量约 105 亿吨。

图 1-1：1950-2025 年全球塑料年产量



数据来源：1950-2015 年数据引自 ourworldindata.org；2016-2020 年数据由 Plastics the Facts 中塑料产量、助塑剂等（6% 假设）与 www.statista.com 中合成纤维合并而得。

受新冠疫情（COVID-19）影响，2020 年全球塑料产量为 4.4 亿吨（未包含塑料助剂），其中合成树脂及共聚物产量约为 3.67 亿吨，较 2019 年下降 0.3%，合成纤维产量约 7400 万吨，较 2019 年增长 0.8%[2]。Rochman et al[3] 预测，如果保持现在的消费速率，到 2050 年，全球塑料材料将较 2012 年累积增加 330 亿吨。艾伦·麦克阿瑟基金会认为，如果不加节制，到 2035 年全球塑料材料生产规模将较 2014 年翻一番，为 6 亿吨左右，到 2050 年塑料的年产量几乎翻两番，为 11.3 亿吨[4]。

不过，全球范围内积极的塑料污染治理和全球气候变化之力将有可能避免塑料行业出现上述增长。在可预见的未来一段时间内，全球塑料生产将保持减速增长趋势，生产和消费的规模较原来的预测水平会有下降。

1 IHS Markit， Database of Petrochemical sector [DB/OL], 2021

2 Tiseo I. Global Plastic Production 1950-2020〔R〕. https://www.statista.com/statistics/282732/global- production-of-plastics-since-1950/.2022

3 Rochman C M,Browne M A,Halpern B S,et al. Policy: 2013. Classify plastic waste as hazardous[J]. Nature, 494(7436)

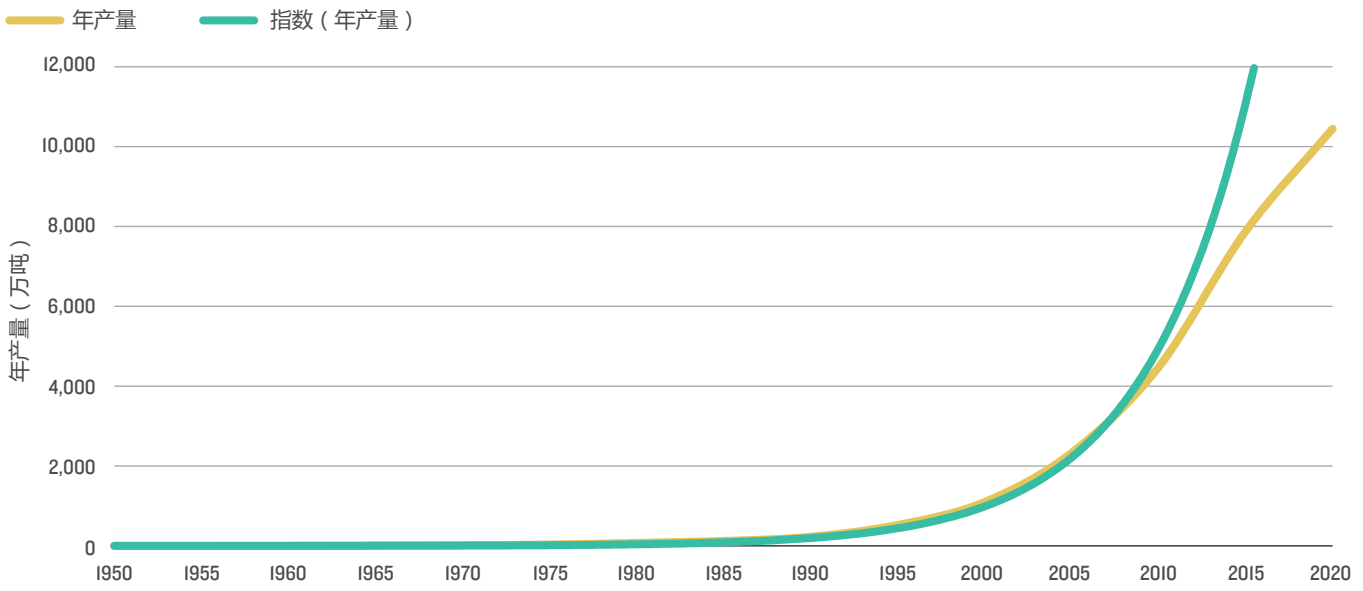
4 MF (Ellen MacArthur Foundation). The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics 〔R〕.https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf.2016

1.2 中国塑料总特征

1.2.1 上游：初级形态塑料增长迅速，产量占全球近 30%

中国是全球塑料生产、消费和进出口贸易最活跃的经济体。全国初级形态塑料生产在 1950 年至 2010 年期间总体呈指数增长态势，自 2010 年显著脱离指数增长轨迹，减速增长（图 1-2）[5]。2020 年，中国初级形态塑料年产量首次突破亿吨，占全球总产量的 28%，表现消费量 1.3 亿吨，进口 4063 万吨，进口依存度为 25.5%，较 2015 年水平（30.4%）下降了近 5 个百分点。

图 1-2：1950-2020 年中国初级形态塑料生产



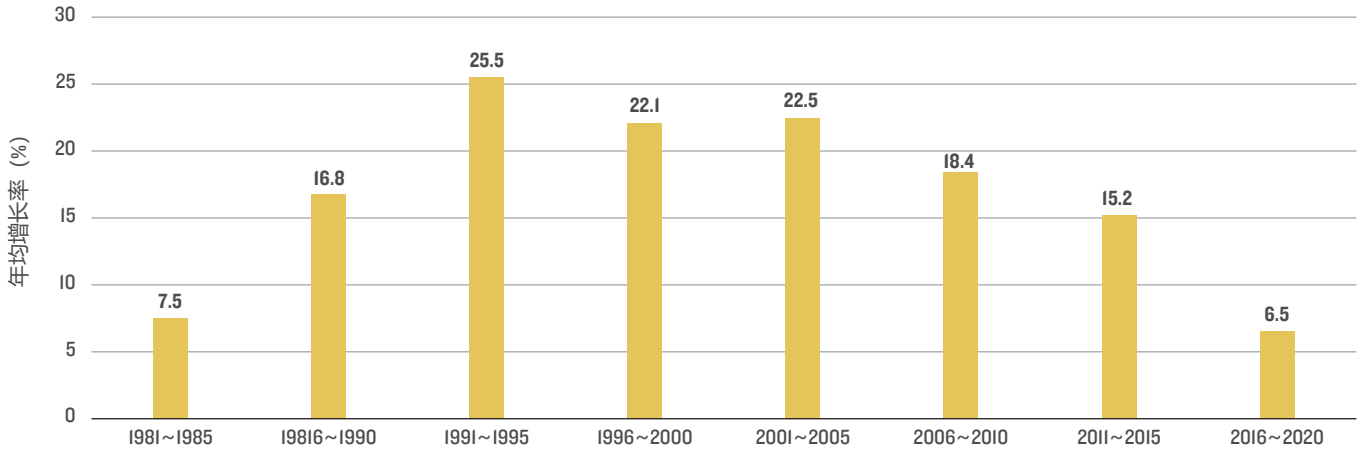
注：数据根据《中国塑料工业年鉴》等官方资料整理

中国近 20 年内，每 5 年期间的年均复合增长率（CAGR-5）虽然整体呈现下降趋势，却远高于全球整体水平（图 1-3）。

依据材料性能，塑料被分为通用塑料和工程塑料两大类（以及部分特种塑料）；按理化性质，又被分为热塑性塑料和热固性塑料两大类（图 1-4）。

5 中国塑料加工工业协会主编 . 中国塑料工业年鉴 2021〔M〕, 北京 : 中国轻工业出版社 ,2022:375

图 I-3：中国初级形态塑料年产均增长率



注：数据根据《中国塑料工业年鉴》等官方资料整理

依据材料性能，塑料被分为通用塑料和工程塑料两大类（以及部分特种塑料）；按理化性质，又被分为热塑性塑料和热固性塑料两大类（图 1-4）。

图 I-4：基于理化性质的塑料分类

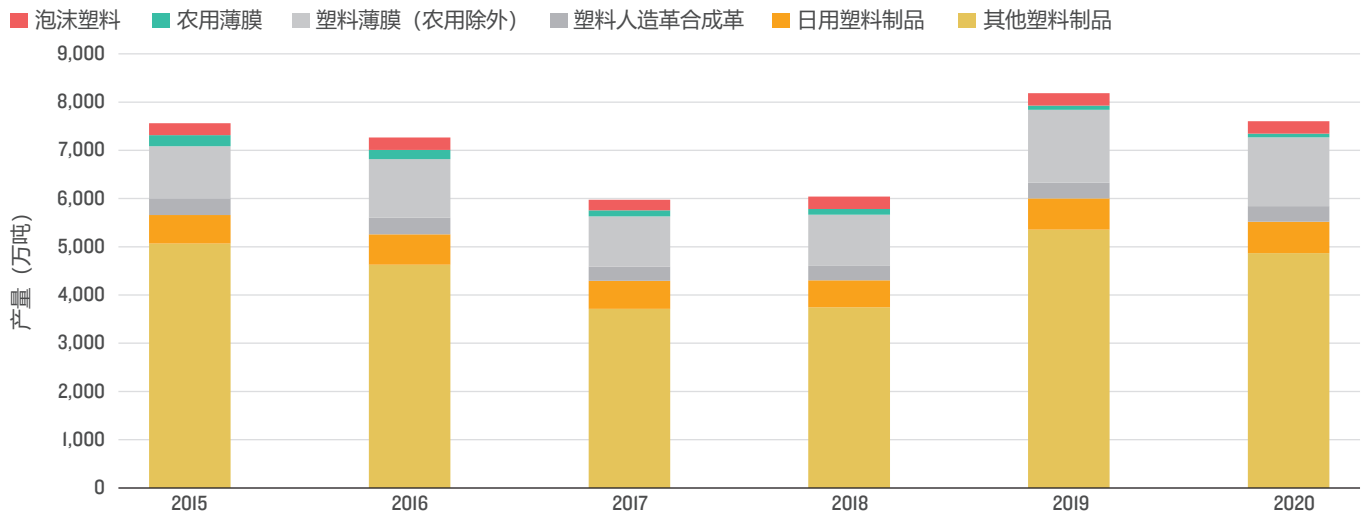
注：*标记的为五大通用塑料；下划线上为五大工程塑料。
数据来源：Plastic Europe 2019

热塑性塑料占据全球塑料制品的 85%，主要用于日常生活中。热固性塑料加工形成的过程是不可逆的，主要用于工业产品，比如汽车部件等。

1.2.2 中下游：一次性塑料制品是塑料垃圾的主要来源

塑料制品是塑料行业的中下游产品，是采用初级形态塑料为主要原料、添加剂为辅助原料加工而成的生活和工业等用品的统称。2020 年中国塑料制品产量约为 7603 万吨，较 2019 年产量下降 7.1%，数据的口径是规模以上企业的生产情况，并不是中国塑料行业的全貌。经过对原材料贸易及流向评估，估计当年的塑料制品总产量约为 1.07 亿吨。在产品构成中，塑料薄膜、泡沫塑料、塑料人造革合成革、日用塑料制品等四种形式的塑料制品占主体（图 1-5），它们的使用寿命较短，其中大部分是一次性使用，这类塑料是塑料垃圾的主要来源。

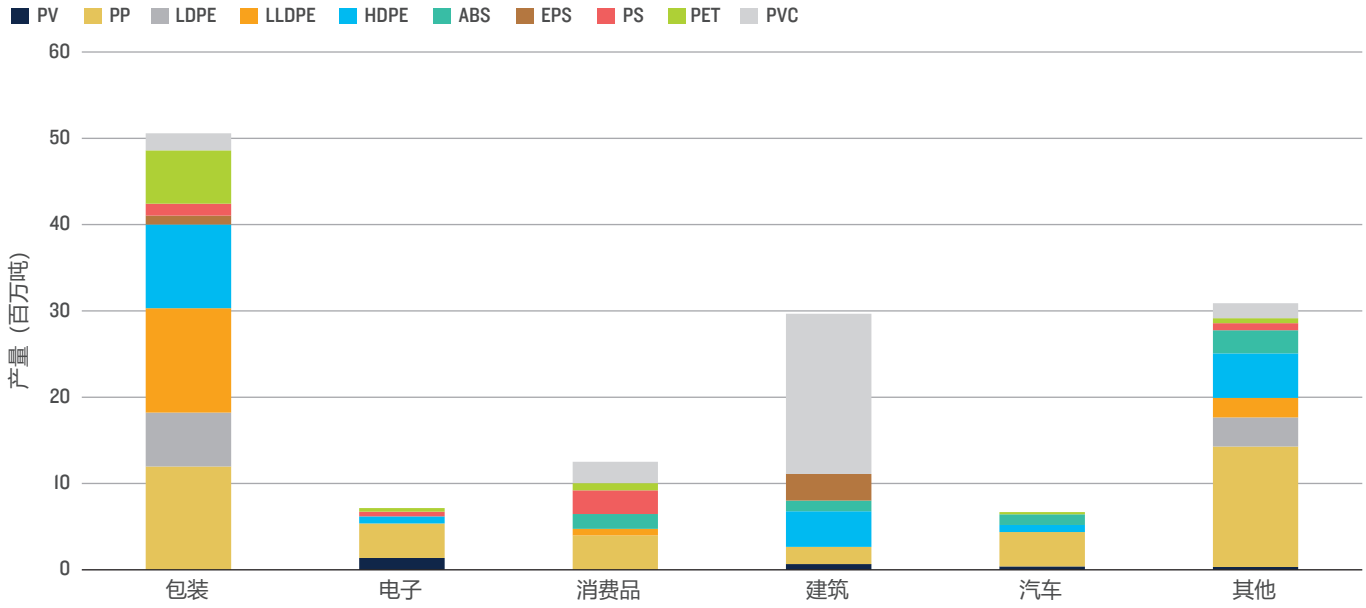
图 1-5：中国塑料制品产量构成



注：以上数据统计口径为“规模以上企业”，根据《中国塑料工业年鉴》整理。

聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚氯乙烯（PVC）、聚苯乙烯（PS）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）是全球及中国塑料制品的主要原料，约占中国塑料生产和消费的 75%，大部分用于包装和建材 [5]。

图 I-6：2021 年中国初级塑料终端用途



数据来源：IHS Markit 石化数据库整理

表 I-1：不同塑料种类进入包装领域的比例

塑料种类	PC	PP	LDPE	LLDPE	HDPE	ABS	EPS	PS	PET	PVC
包装领域占比	0%	30%	65%	80%	47%	0%	25%	25%	75%	8%

包装行业的一次性塑料通常使用一次就丢弃，从制造到废弃的平均生命周期不到两年[6]，在石化产品中以全生命周期温室气体高排放著称。在全球范围内，一次性塑料占塑料总量的 40-50%，相较中国占比更高[7]。中国一次性塑料占比约为 37%，造成这种差异的主要原因，是中国的电子，汽车，纺织及其他行业也消耗了大量的塑料原材料，比如丙烯。一次性塑料也贡献了大量的废弃物，Geyer et al. 的研究表明，到 2015 年全球包装领域贡献了约 47% 的塑料废弃物。

6 Geyer R, Jambeck J R, Law K L.2017. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. Science Advances, 3(7) , e1700782

7 Plastic Europe.Plastics–the Facts 2019〔R〕.https://www.plasticseurope.org/.2019

1.2.3 用后塑料：再利用率低，资源浪费严重

2020 年，国内消费的塑料制品中约 40% 存留在经济系统之中，近 50% 或填埋或散落在自然之中，或因焚烧产生了温室气体排放，有效回收再利用比例仅 10% 左右。根据后文的推算，2020 年塑料垃圾大约为 8400 万吨，5300 吨被焚烧，剩下的被填埋，或散落和被人们随意丢弃，没有得到妥当管理，在自然中“流浪”。

1.3 中国塑料贸易：全球最大的塑料生产国，进口国和出口国

按照常发展趋势，中国塑料的生产规模将继续扩大。作为全球最大的塑料生产国、进口国和出口国，中国依然是全球塑料经济发展的主要引擎。中国主要进口的塑料初级原料为聚乙烯 (PE) 、聚丙烯 (PP) 和聚苯乙烯 (PS)，2020 年占我国合成树脂进口总量的 80% (图 1-7) 。主要出口产品是聚甲醛 (POM)，占 2020 年初级形态树脂贸易总量的 45.8%（图 1-8）。聚乙烯 (PE) 、聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP) 用于制造一次性消费塑料制品的比例高，这反映了中国塑料行业需要全产业链优化，特别是在生产侧 [5]。

图 1-7：1992-2020 年中国塑料分品种贸易规模：进口

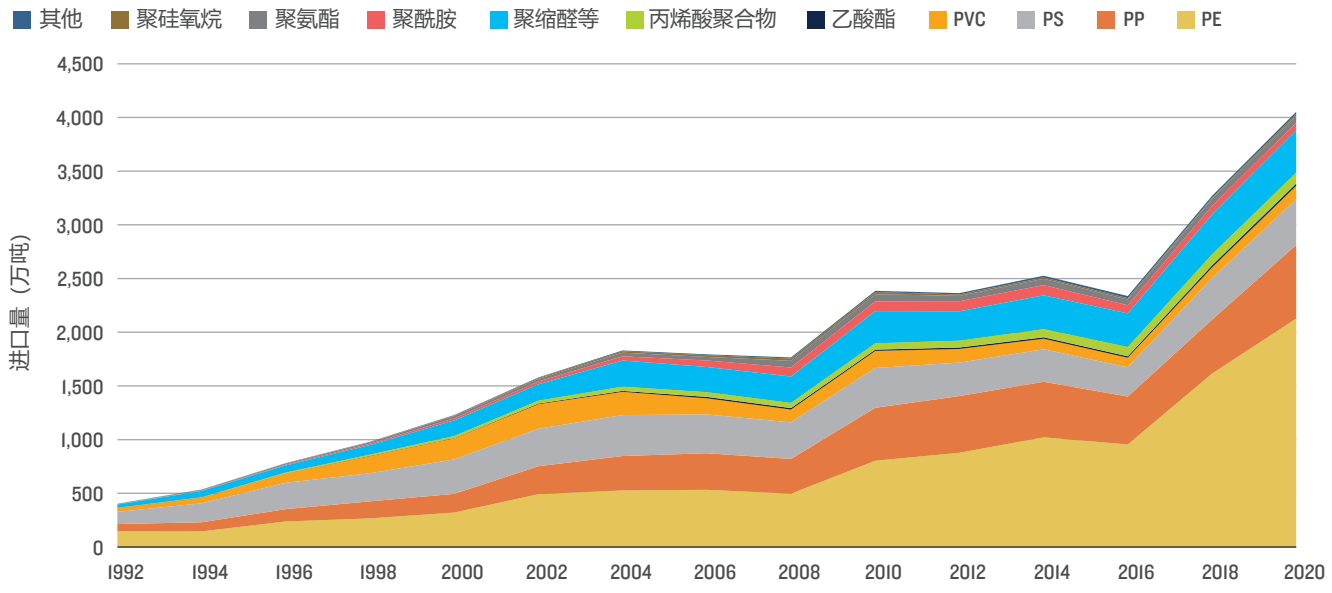
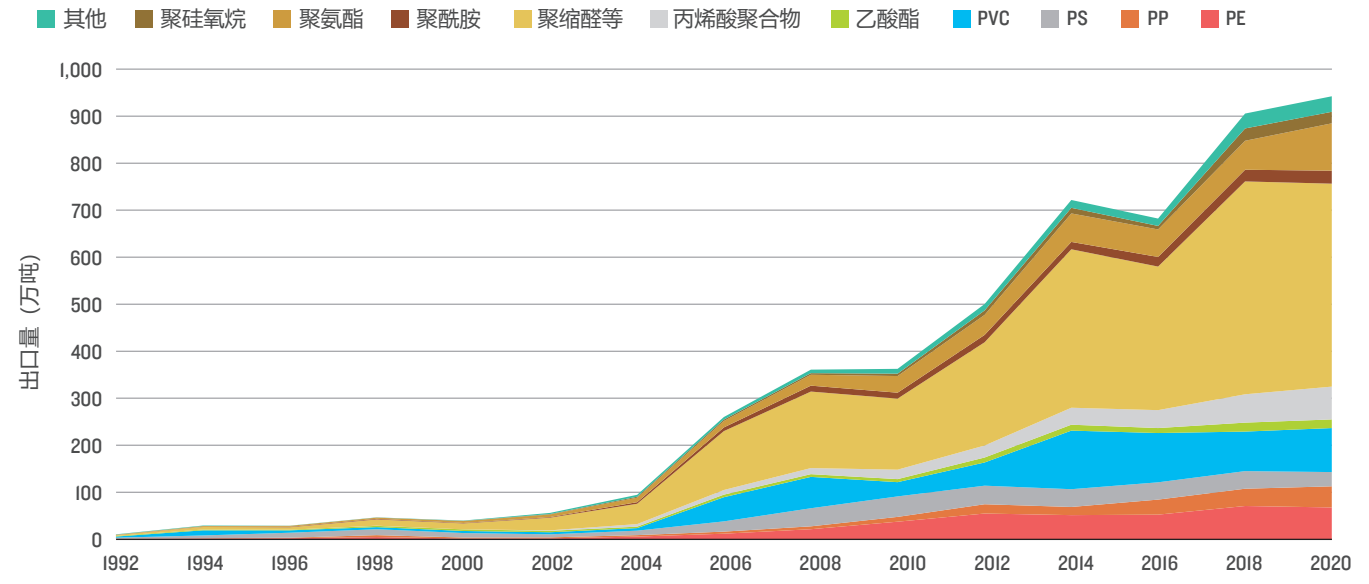


图 I-8：1992-2020 年中国塑料分品种贸易规模：出口

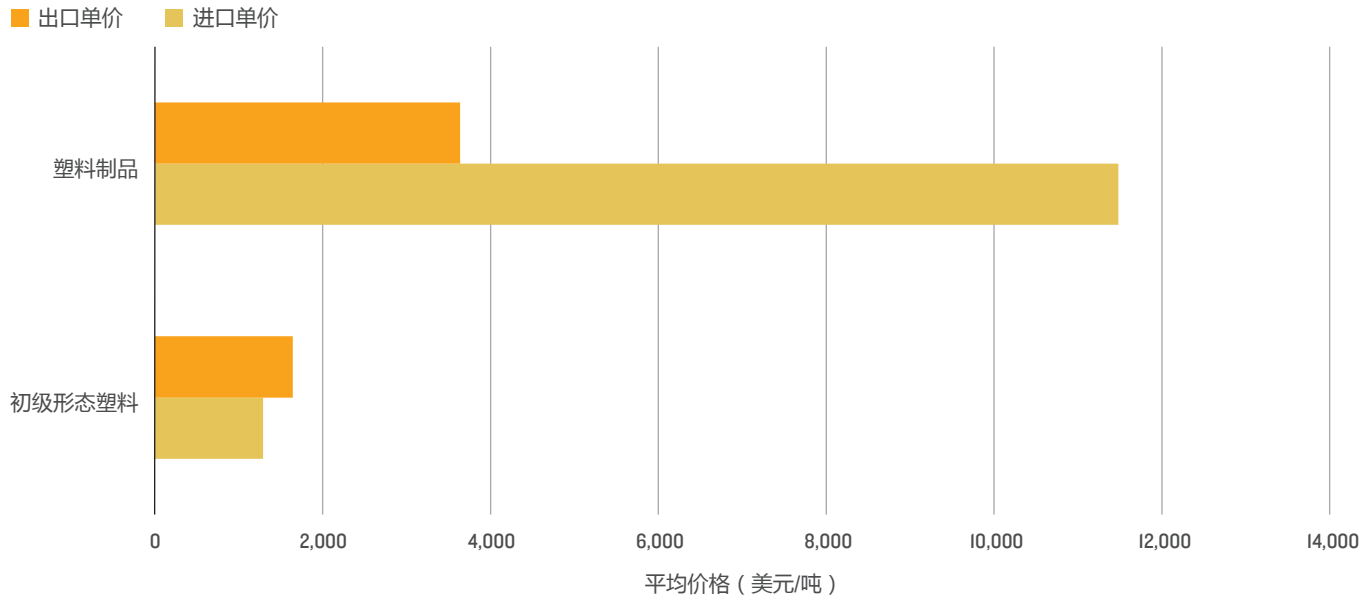


数据来源：根据海关分品种贸易进出口数据整理

从中国最大的进口塑料种类和出口塑料种类来看，包装材料需求是拉动贸易的一大动力。目前中国的包装材料回收率低，大多是一次性的使用，强化再利用和循环使用，加大回收率，将会促进中国高质量塑料贸易的发展。

在塑料制品领域，中国和全球许多国家有较为活跃的贸易往来。2020 年，进口塑料树脂的规模（重量）大约是出口规模的 4.5 倍左右。中国进口的塑料制品以高端塑料制品产品为主，出口产品以一般塑料制品为主，进口塑料制品的平均单价是出口的 3.2 倍（图 1-9）。

图 I-9：中国塑料制品和初级形态塑料出口和进口



数据来源：由海关分类中初级形态塑料（剔除天然橡胶）、塑料制品目录下的产品计算，以塑料制品出口为例，平均单价 =Σ 出口贸易总额 /Σ 出口数量。

1.4 塑料使用对资源环境的影响

1.4.1 全球影响

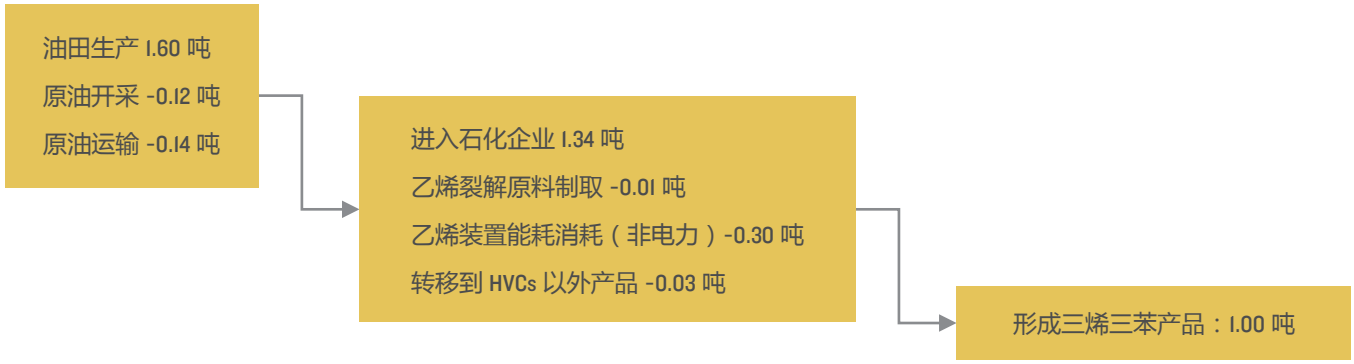
全球塑料生产的原料 99% 来自化石能源，每年塑料工业消耗了全球 8%-9% 的石油[8]。随着交通运输部门对石化燃料需求的下降，塑料将是未来石油需求增长的最大驱动因素之一。在产品全生命周期下，塑料产生的碳排放占全球 2015 年碳排放的 3.8%[9]。UNEP（2018）[10] 预测，在照常发展模式下，2050 年全球塑料生产将会消耗全球石油供应总量的 20%，其中，超过四分之一是一次性塑料产品。有研究预测到 2050 年，塑料的碳排放可能占全球 1.5 度温控目标所需碳预算的 10-13%； 从 2015 年到 2050 年，塑料生产的碳排放将增加近 400%[11]。

根据《力挽狂澜：破除海洋塑料污染》报告[12]，如果不采取行动，预计 2040 年全球塑料垃圾产生量估计为 4.3 亿吨，约是 2016 年水平的 2 倍，泄露到海洋的塑料流将高达 2900 万吨，接近 2016 年水平（1100 万吨）的 3 倍，累积于海洋中的塑料规模估计为 6.46 亿吨，是 2016 年水平（1.5 亿吨）的 4 倍多。这是一个可怕而难以承受的发展之“重”。塑料垃圾加剧了全球持久性污染包括微塑料污染风险。全球生产出来的塑料产品中，有一半多进入并累积在自然之中。世界环保界正在讨论将微塑料颗粒也列为新污染物，它们对人体健康带来较大风险，对器官，神经，生殖发育都可能造成危害。微塑料颗粒大多具有环境持久性和累积性，在环境中难以降解，其中的化学物质在生态系统中易于富集，可长期蓄积在环境中和生物体内。它们的来源广泛，治理难度大。

1.4.2 中国影响

初级形态塑料的原料是以“三烯三苯”为主的基础化学品。中国约 82% 的“三烯三苯”产品产自油气资源，其余部分主要来自甲醇（含煤制甲醇和外购甲醇）[13]。当前技术水平下，中国每生产一吨石油基“三烯三苯”约消耗石油资源 1.6 吨。其中，0.60 吨石油消耗在原油运输、装置能耗、产品转移及原料损失上（图 1-10）。 中国平均每生产 1 吨初级形态的通用塑料，按工艺结构估算，消耗石油资源 0.90 吨[14]。

图 1-10：石油基“三烯三苯”生产的原油（消耗型）流动



注：引自《塑料终端消费的环境足迹》（北京石油化工学院，2020）。

8 Nielsen, T. D.; Hasselbalch, J.; Holmberg, K.; Stripple, J. 2019. Politics and the Plastic Crisis: A Review throughout the Plastic Life Cycle[J/OL]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment 9(1) . DOI: 10.1002/wene.360.

9 Zheng J. &Suh S.2019. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics[J]. Nature Climate Change 9, 374–378

10 UNEP. SINGLE-USE PLASTICS: A Roadmap for Sustainability (Rev. ed., pp. vi; 6)〔R/OL〕. https://www.unep.org/resources/report/single-use-plastics-roadmap-sustainability.2018

11 CIEL(Center for International Environmental Law).Plastic & Climate:The Hidden Costs of a Plastic Planet 〔R/OL〕.https://www.ciel.org/plasticandclimate. 2019

12 PCT& SYSTEMIQ.《力挽狂澜：破除海洋塑料污染》(Breaking the Plastic Wave)〔R/OL〕.2020

13 石油和化学工业规划院“十四五”石化行业高质量发展研究 . 术〔R〕. 北京 :2020

14 此外，还有非石油基原料消耗与其他组分原料消耗。

据下文测算，考虑到塑料生产，焚烧，填埋和回收，2020 年中国塑料全生命周期的碳排放大约为 5.6 亿吨，占当年全国碳排放（110 亿吨左右）的 5%。塑料作为化工行业下游产品的主要“担当”之一，绿色低碳发展对其是约束，也是机遇。未来的中国化工业的行业功能将发生重大转变，不应仅是产品制造功能，而是制造和资源循环功能并重。中国是世界上增长最快的化工市场，自 2009 年成为全球最大的化工品生产国以来，一直保持领先地位，2019 年占全球化工品销量约 40%。化工行业中的一些产品是原料耗能、生产耗能和末端耗能“三重”性质的产品，尤其是塑料。

I.4.3 塑料行业相关政策概况

中国已经发布了一系列政策方案，加强石化行业，即塑料上游行业的低碳绿色发展。2021 年 10 月发布的《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰中和工作的意见》深入地说明了国家预期石化行业为实现 3060 承诺作出贡献。该计划呼吁石化行业应控制发展炼油，逐步停止使用煤炭为生产设施供电，扩大氢气进口以供能源利用。2022 年 4 月国家六部门联合印发的《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》加强了对氢能源、碳捕获和储存技术的重视，还提出了提高该行业碳效率的目标。

此外，2021 年 5 月，生态环境部发布了《关于加强高耗能、高排放建设项目生态环境源头防控的指导意见》。该指南要求对高能耗、高排放的项目进行严格的环境影响跟踪评价和审批，包括新的石化和煤化工项目。石化行业也针对 3060 双碳目标发布了初步方案。 2021 年 1 月，中国石油和化学工业联合会、石油和化工企业、化工园区等 17 家石化行业参与方在北京联合签署并发布了《中国石油和化学工业碳达峰与碳中和宣言》，该宣言提到了三项行业为助力 3060 承诺采取的措施：

1) 低碳绿色能源，为社会提供更多低碳、可再生能源；

2) 提高能源效率，减少行业碳排放，提供低碳和可回收的石化产品，通过上下游产业的累积行动减少排放；

3) 开发二氧化碳捕捉和储存技术，以及将捕捉碳用于生产工序的技术。

在塑料污染治理方面，中国同样密集的出台相关政策。中国在 2007 年出 台了限塑令，即《关于限制生产销售使用塑料购物袋的通知》，当时主要目的是治理塑料袋造成的白色污染。2020 年，中国有关政府部 门联合发布了《关于进一步加强塑料污染治理的意见》。2021 年，《固体法》修订时增加了控制塑料污染的要求，发布了“十四五” 塑料污染治理的行动方案等。国家有关部门指出，将明确从全生 命周期协调和推动塑料污染的治理。中共中央、国务院印发的《关 于深入打好污染防治攻坚战的意见》提出，到 2025 年，固体废物 和新污染物治理能力应明显增强。2022 年 5 月 4 日国务院办公厅关于印发《新污染物治理行动方案》，将微塑料列入重点管控的新污染物清单。

2021 年 7 月 1 日国家发展改革委发布的《十四五循环经济发展规划》提出塑料污染全链条治理专项行动和快递包装绿色转型推动行动。科学合理推进塑料源头减量，严格禁止生产超薄农用地膜、含塑料微珠日化产品等危害环境和人体健康的产品，鼓励公众减少使用一次性塑料制品。 强化快递包装绿色治理，推动电商与生产商合作，实现重点品类的快件原装直发，推动生产企业自觉开展包装减量化。实施快递包装绿色产品认证制度。开展可循环快递包装规模化应用试点，大幅提升循环中转袋 (箱) 应用比例。总体而言，中国塑料治理政策从关注末端使用后废弃，到塑料的流通和使用环节，再到产品的设计包装环节，逐渐向产业链上游发展。

对于一次性塑料的限用和禁用，全球已经有多达七十多个国家采取行动。表 1-2 列举了部分国家关于禁止一次性塑料制品的法令。

表 I-2：全球范围内关于限制和禁止一次性塑料使用的法令

印度	• 自 2022 年 7 月 1 日起，印度禁止了 19 种一次性塑料制品的使用，同时将设立国家和连邦级单位检查非法制造、进口、储存、分销、销售及使用被禁的一次性塑料制品。禁令中涉及的制品包括气球塑料棒、塑料旗帜、糖果棒、冰淇淋棒、装饰用聚苯乙烯、塑料杯盘、塑料刀叉勺等餐具和吸管等 [15]。
非洲	• 非洲 55 个国家中已有 34 个国家通过了禁塑法律或已经实施了相关法律，其中，16 个国家提出完全禁止塑料袋。2018 年 6 月，继全面禁止塑料袋后，肯尼亚政府进一步宣布，在 2020 年 6 月 5 日前，在指定“保护区域”对所有一次性塑料用品实施禁令 [16]。
欧盟	• 2021 年 7 月 3 日起，欧盟禁止使用有非塑料材质替代品的一次性塑料制品，包括一次性塑料盘、餐具、吸管、气球棒等，这里不仅包括聚苯乙烯等很难降解的塑料，氧化式可降解塑料也在禁止之列 [17]。
美国加州	• 2022 年 6 月 30 日，加州通过了一项针对一次性塑料和包装最雄心勃勃的法案《SB54》，该法律旨在将塑料污染责任从消费者转移到塑料生产者，主要针对一次性包装（不限于塑料）和包含一次性塑料的食物器具。该法律要求到 2027 年，加州的塑料包装数量将减少 10%，到 2030 年减少 20%，到 2032 年减少 25%，减量要求着手在消除一次性塑料包装方面。该法律还授权政府在某些情况下可提高要求塑料包装减量的百分比 [18]。

2022 年 2 月 28 日到 3 月 2 日在肯尼亚首都内罗毕举行的第五届联合国环境大会上，联合国各成员国达成一致，同意制定一份具有法律约束力的防治塑料污染的国际协议。中国作为全球最大的塑料生产国和进口国，其行动对解决全球塑料污染问题有非常重要的作用。

到目前为止，尚未有中国塑料行业为针对气候变化的具体行动计划发布。在 1+N 政策框架下，塑料行业正在制定路径图，这在相关部门对石化行业“十四五”规划采取的行动中有所体现。**该报告就中国塑料行业产生的碳排放展开研究，讨论了其在中国实现碳达峰碳中和目标道路上的影响，为未来相关的政策研究提出方向和建议。**

15 Sustainable Plastics, India bans 19 single use plastics items from 1 July 2022 [EB/OL], https://www.sustainableplastics.com/news/india-bans-19-single-use-plastic-items-1-july-2022, 2022

16 Greenpeace, 34 Plastic Bans in Africa[EB/OL], https://www.greenpeace.org/africa/en/blogs/11156/34-plastic-bans-in-africa/, 2020

17 European Commission, EU restrictions on certain single-use plastics [EB/OL], https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/single-use-plastics/eu-restrictions-certain-single-use-plastics_en, 2021

18 DIA PIPER, California's new Extended Producer Responsibility Act is major addition to suite of plastic-focused laws[EB/OL], https://www.dlapiper.com/en/us/insights/publications/2022/07/new-california-extended-producer-responsibility-law-targets-plastic-pollution/, 2022

2

基准情景下塑料行业碳排放

塑料在其整个生命周期都会产生碳排放。单位塑料的碳排放量称为排放强度。本研究基于塑料全生命周期碳排放强度，根据历史数据和行业发展趋势，预测了塑料生产量，从而得到生产侧的碳排放量；同时分析了塑料物质流，包括进入焚烧、回收、填埋与泄露的量，进而评估出末端处理的碳排放量。

本章分为三个小节：

- 塑料全生命周期碳强度分析
- 基准情景下塑料物质流
- 基准情景下塑料碳排放量

本章节的相关假设如下：

（1）采用文献结合分析计算得到塑料全生命周期碳排放强度，假设本研究所关注的时间序列内（2020-2060 年）塑料的全生命周期二氧化碳排放强度不变。

（2）以 2020 年塑料生产和消费数据为基础，假设了塑料需求年平均增长率为 3%（2016-2020 年初级形态数量的年均增长率为 6.5%），来预测了 2060 年塑料产量。塑料需求在真实情况下会动态增长，根据现有政策，比如循环经济发展规划和限塑令，塑料增长在未来将会进入平台期，并最终下降，为简化计算，在此报告中采用线性平均增长率。

（3）本研究中所使用的边界条件为在中国生产和使用的塑料，采用的原始数据为中国塑料生产产能数据[19]，产能数据大于实际产量，对排放有可能有一定高估，比如中国乙烯生产负荷在 2021 年为 80% 左右。与此同时，中国也进口塑料，2020 年中国净进口塑料 3100 万吨，生产 10700 万吨，生产占两者之和的 77.5%， 此报告并没有考虑进口塑料的碳排放，对排放可能有一定低估，总体来说有一定抵消作用。当然，这些假设会对模拟造成一定的误差。

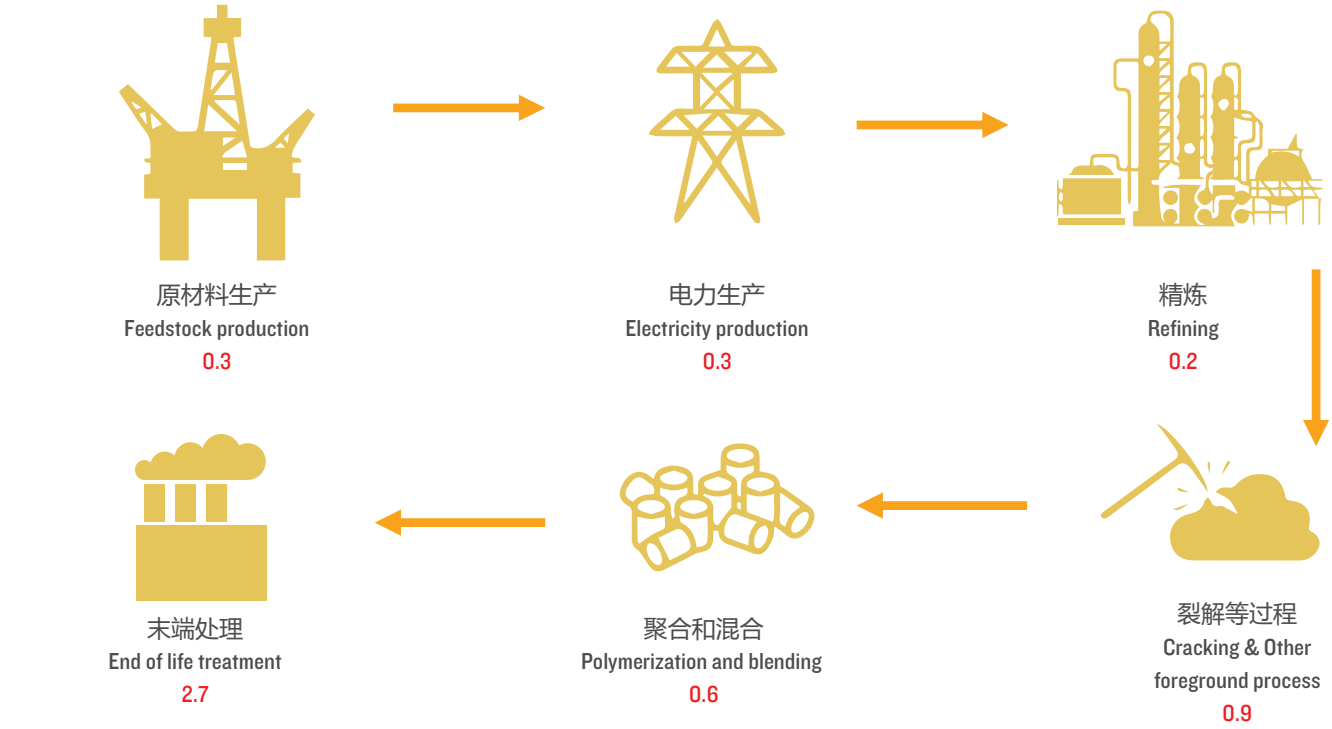
2.1 塑料全生命周期碳排放强度

塑料在整个生命周期的生产过程和末端处理是碳排放最主要的来源（图 2-1）。生产过程碳排放包括化石燃料燃烧产生的排放和化学工序的排放。以石油原料为例，原料生产碳排放强度为 0.3 吨 CO_{2e}/ 吨塑料，包括原油开采过程中能量使用造成的碳排放；电力生产碳排放强度为 0.3 吨 CO_{2e}/ 吨塑料；炼化和裂解过程碳排放强度为 0.9 吨 CO_{2e}/ 吨塑料，主要为将原油精炼成石脑油产生的排放物，这些排放物有许多来源，包括裂解和加热；聚合和成型的碳排放强度为 0.6 吨 CO_{2e}/ 吨塑料[20]。石油为原料的生产过程排放强度为 2.3 吨 CO_{2e}/ 吨塑料。塑料产品使用环节的碳排放，排放强度远小于生产和末端处理环节，因此本研究不纳入考虑范畴。塑料的生命周期末端处理包括焚烧、填埋、露天堆放等。此报告假设末端处理全部为焚烧的碳排放，为 2.7 吨 CO_{2e}/ 吨塑料。

19 为简化分析，本文分析假设“生产量”等于“消费量”。

20 Material Economics. Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry.〔R/OL〕.https://materialeconomics.com.2019

图2-1：石油基塑料全生命周期碳足迹



单位：CO_{2e}千克/千克塑料

数据来源：Material Economics, 2019, Exhibit 3.3

由于不同化石燃料（石油、天然气、煤）和各种树脂制成的塑料都具有不同的碳排放强度，我们对整体塑料生产碳排放强度进行了加权平均计算。据估算，煤制塑料的过程排放量是石油制塑料的两倍，而天然气制塑料的排放量比石油制塑料的碳排放量低 20%[11]。 塑料在中国主要由石油制成，占产量的 85%），另外 10% 来自于煤炭，剩下 5% 来自于天然气。用石油、煤炭和天然气生产塑料生产过程碳排放强度的的加权平均值，核算出中国塑料的生产过程碳排放强度为 2.5 吨 CO_{2e}/ 吨塑料。据此得出，中国每吨塑料经过生产、消耗、垃圾管理的平均碳排放量为 5.2 吨 CO_{2e}。

能源效率实际上存在区域差异，中国 PE 和 PP 的碳排放强度为 2.75-3.75 吨 CO_{2e}，而欧洲大约为 2.5 吨 CO_{2e}[20]。此外，不同树脂生产的碳排量强度也有区别。自然资源保护协会（NRDC）中国项目的一项研究表明，PVC 树脂的生产过程碳排放量（高达 8 吨 CO_{2e}）是 PE 和 PP 的两倍多。

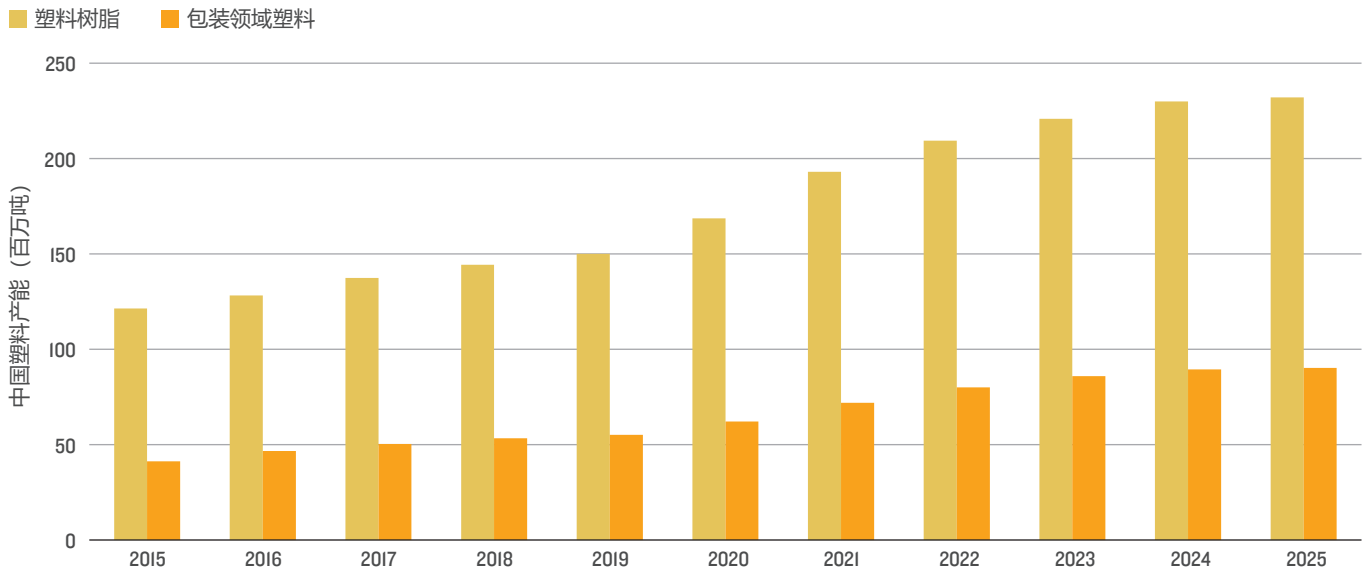
塑料垃圾的不同末端处理方法，碳排放也不尽相同。本报告假设不同的塑料垃圾的处理方法中，只有焚烧会产生碳排放。实际上垃圾填埋和回收也有相应的排放，但焚烧和其他形式的燃烧比其他垃圾处理方法碳足迹更高，因此在报告中着重分析。

2.2 塑料物质流

2.2.1 一次性塑料与塑料垃圾预测

图 2-2 为中国塑料树脂产能到 2025 年的预测情况：塑料树脂从 2015 年的 1.2 亿吨增长到 2025 年的 2.3 亿吨。实际上，中国塑料行业已经存在产能过剩的情况，例如 2021 年，乙烯产能仅使用 80% 左右。

图 2-2：中国塑料树脂产量预测



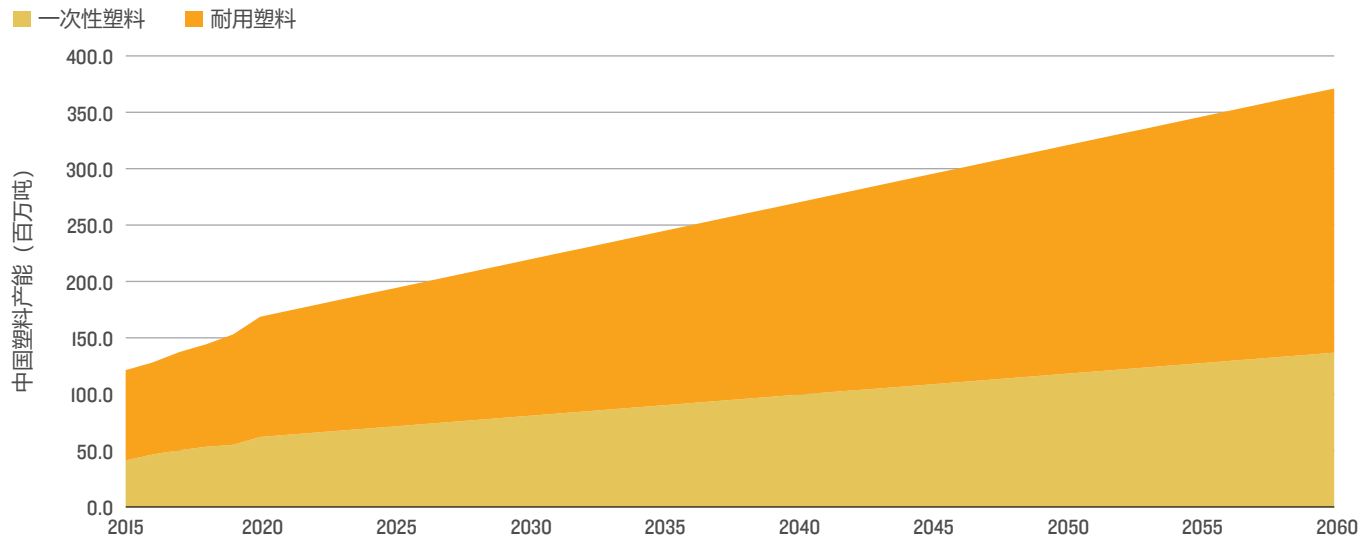
数据来源：根据 IHS Markit 石化数据库整理

根据塑料流向不同领域的情况（图 1- 6），报告进一步预测了包装塑料的产量。为了模拟一次性塑料的碳排放足迹，报告假设包装行业中的所有塑料都是一次性塑料。诚然，这种假设是一种简化：除包装外，还有其他行业使用一次性塑料；即使在包装行业，也存在一定的机械回收实现了有限的材料循环[21]。例如，包装行业的可回收一次性塑料瓶（如 PET 饮料瓶等）具有足够的材料价值，可以进行机械回收。为了简化计算，本研究中将流向包装领域的塑料定义为一次性塑料。根据这一简化，图 2-2 展示了中国一次性塑料使用情况。2021 年一次性塑料占中国生产塑料的 37%，预计到 2025 年将上升到 39%。 2015 至 2025 年中国塑料产能预计增长率为 8.5%，一次性塑料产能增长率为 9%。其中 2015-2020 的五年平均增长率为 6.24%， 2021-2025 的 5 年平均增长率为 4%。

由于 2021 年主要塑料生产前体物乙烯的产量只达到产能的 80%，2021-2025 存在行业扩张情况。因此本报告以 2020 年为基准年份，假设基准情景下，塑料年平均增长率为 3%，来预测目前到 2060 年的塑料生产情况。到 2060 年，原生树脂塑料产量为 3.7 亿吨，是 2020 年的 2.2 倍。届时，一次性塑料生产预测将达到 1.4 亿吨（图 2-3）。

21 Minderoo Foundation, Plastic Waste Makers Index [Z/OL]. https://www.minderoo.org/plastic-waste-makers-index/ ,2020

图2-3：基准情景下塑料树脂产量预测

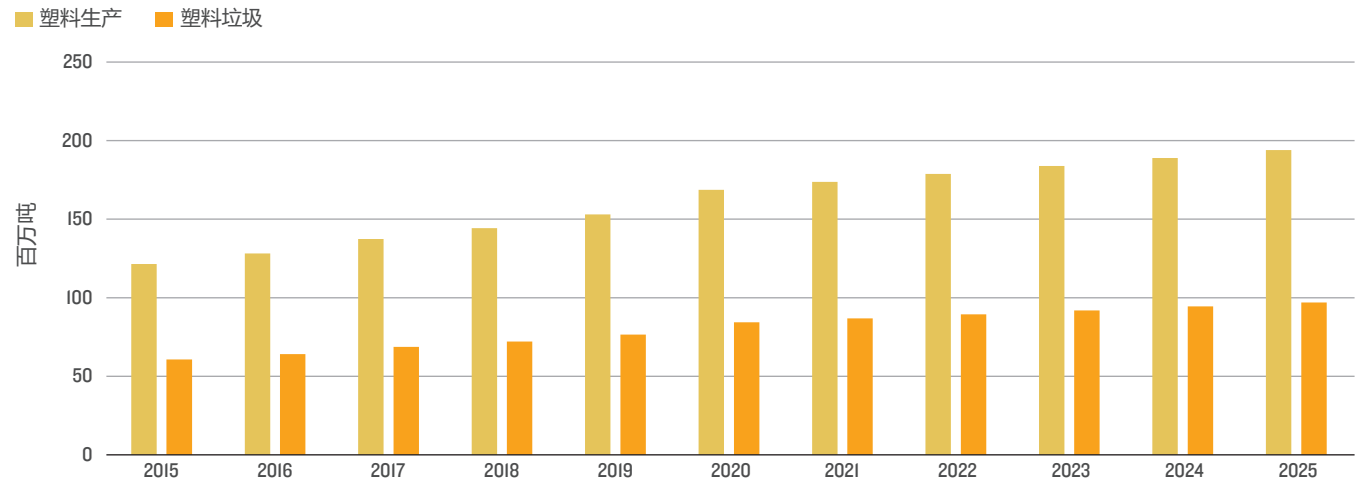


假设一次性塑料 100% 变成塑料废弃物，而耐用塑料 20% 变成废弃物[7]（根据 Geyer et al. 2017，不同塑料生命周期估算），可以得到塑料废弃物变化趋势（图 2-4）。以 2020 年数据为例，一次性塑料产量 0.622 亿吨，耐用塑料为 1.065 亿吨，那么该假设下塑料垃圾产量为

假设一次性塑料 100% 变成塑料废弃物，而耐用塑料 20% 变成废弃物[7]（根据 Geyer et al. 2017 对于不同塑料生命周期的估算），得到塑料废弃物变化趋势（图 2-4）。以 2020 年数据为例，一次性塑料产量 0.622 亿吨，耐用塑料为 1.065 亿吨，那么该假设下塑料垃圾产量为

$0.622\times100\%+1.065\times20\%=0.835$ 亿吨，占塑料总产量的 49.4%。因此，每生产出一吨塑料，在使用后将产生约 0.5 吨的塑料垃圾。

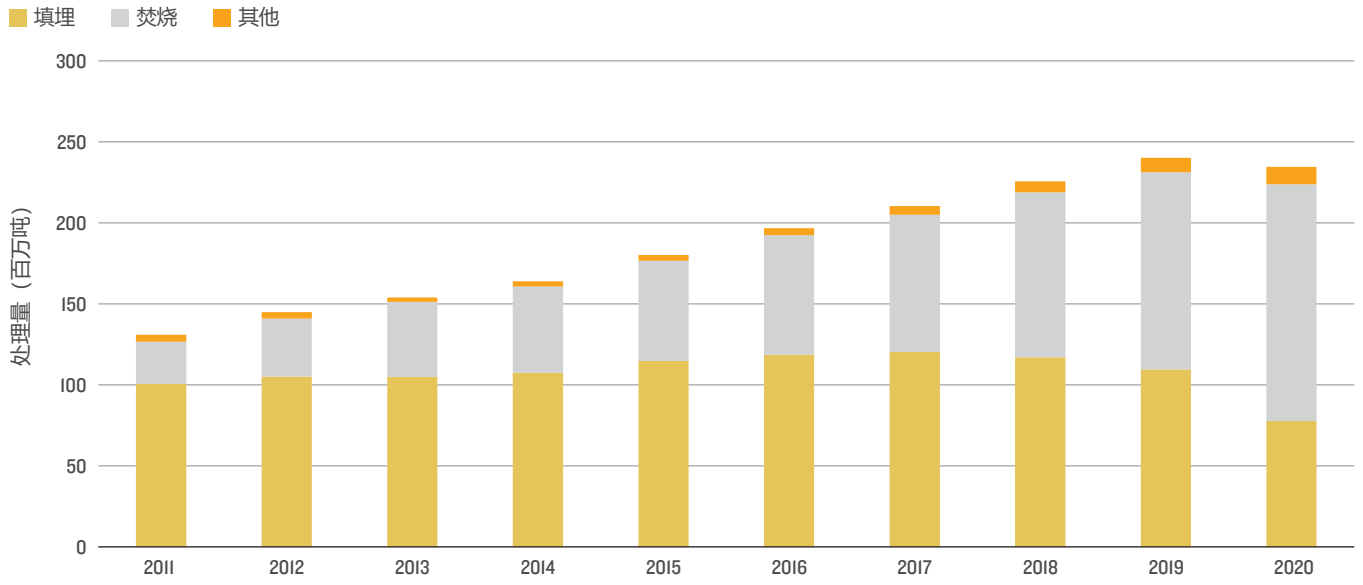
图2-4：用后塑料垃圾量预测



2.2.2 塑料焚烧的现状和假设

目前除回收和露天堆放以外，中国剩余废塑料进入生活垃圾管理体系，通过收集转运最后进入焚烧或填埋。为了分析塑料垃圾进入焚烧的比例，本报告先分析了中国市政生活垃圾处理的情况。根据中国统计年鉴近 10 年的数据（图 2-5），从 2011 到 2020，中国生活垃圾处理量从 1.3 亿吨增加到了 2.35 亿吨，增长率为 44%。焚烧量从 2011 年的 2600 万吨（占垃圾总处理量的 19.9%）增加到 2020 年的 1.47 亿吨（占垃圾总处理量的 62.3%），翻了 6 倍。

图 2-5：2011-2020 年中国生活垃圾处理情况



数据来源：中国统计年鉴

根据《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》，到 2025 年底，中国的城市生活垃圾焚烧处理能力将达到约 80 万吨 / 日，意味着约 65% 的生活垃圾将被焚烧处理。本报告，假定 2021 年生活垃圾的焚烧率为 65%，垃圾焚烧率每年提高 1 个百分点，于 2030 年达到 75%，于 2040 年达到 85%，而后一致保持在 85% 的水平（表 2-1），这一焚烧比例是针对进入生活垃圾体系的塑料垃圾。

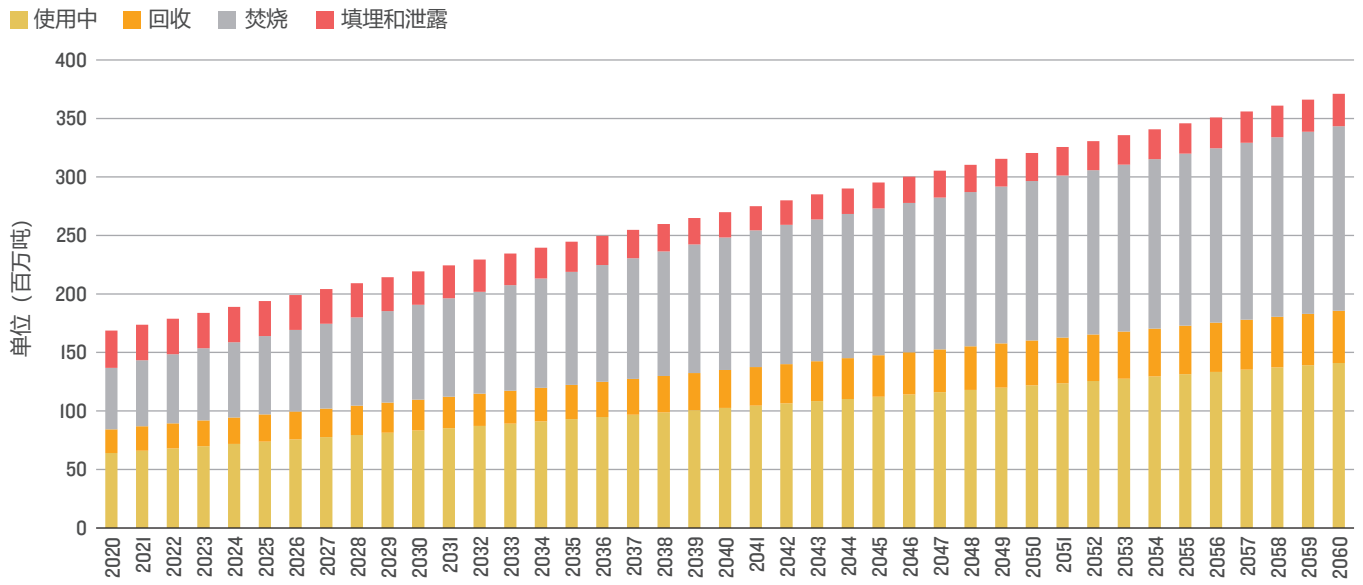
表 2-1：生活垃圾焚烧率预测

年份	2020	2021	2025	2030	2035	2040	2045
焚烧率 %	62.3	65	70	75	80	85	85

2.2.3 塑料物质流

原生塑料一部分留存在系统之中使用，一部分回收，剩余的塑料进入焚烧，填埋以及泄漏到自然环境中。假设目前 10% 塑料（相对于塑料产量）进入回收体系，50% 被废弃，那么目前仅有 40% 的塑料留存在使用系统之中。图 2-6 展示了基准情景下塑料的物质流，包括留存在使用系统中，回收，焚烧，填埋和自然泄露。基准情景下，系统使用中的塑料稳步增加，从 2020 年的 0.64 亿吨增长到 2060 年的 1.4 亿吨。焚烧量从 2020 年的 0.5 亿吨增长到 2060 年 1.5 亿吨。废塑料先减少再增加，到 2060 年约有 0.28 亿吨塑料进入填埋和自然泄露。

图 2-6：2020-2060 年基准情景下塑料物质流

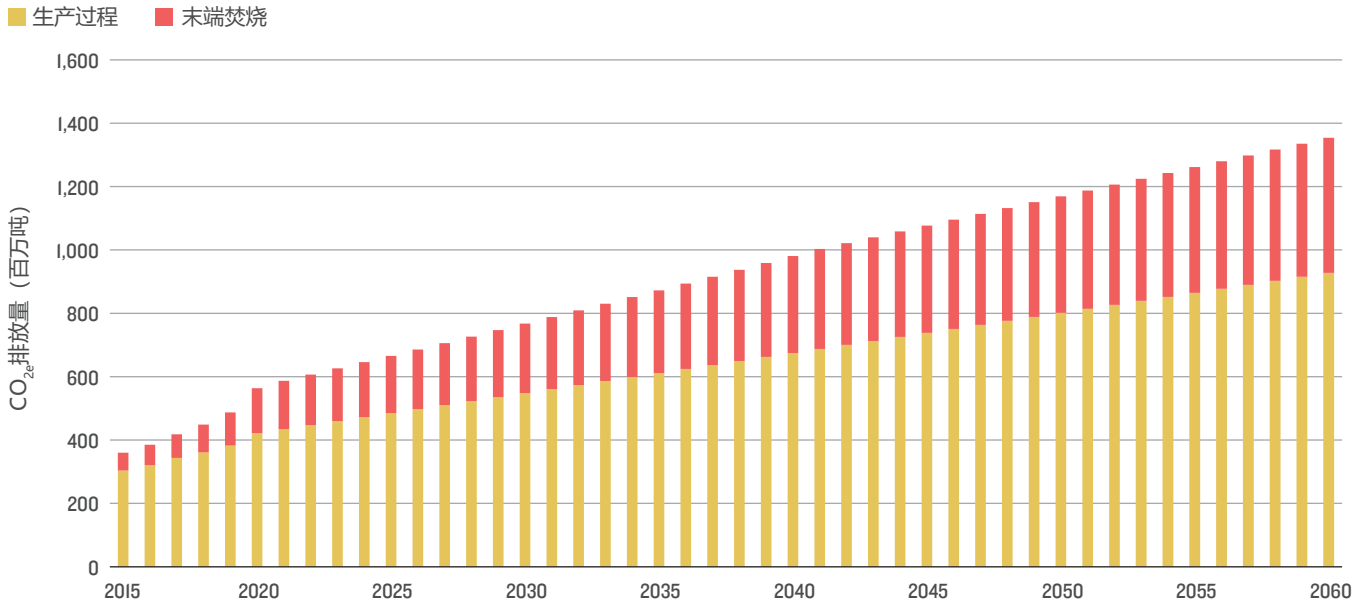


2.3 塑料碳排放情况

根据前文的设定，塑料生产过程中碳排放强度为 2.5 吨 CO_{2e}，废塑料焚烧碳排放强度为 2.7 吨 CO_{2e}，可计算出基准情景下，塑料全生命周期的碳排放从 2020 年的 5.6 亿吨，增加到 2030 年的 7.7 亿吨和 2050 年的 11.7 亿吨（图 2-7）。根据清华大学的一项研究，这分别占中国在 1.5 度温控情景下碳排放额度的 4%，6% 和 88%[22]。随着塑料生产和需求的增加，塑料垃圾也大幅度增长，加上焚烧能力的提升，塑料末端焚烧量也随之增加。整个生命周期中，末端焚烧的碳排放大约占 30%。

22 Institute of Climate Change and Sustainable Development of Tsinghua University et al. China' s Long-Term Low Carbon Development Strategies and Pathways. [R/OL]. 2022

图2-7：塑料全生命周期碳排放预测



3

中国塑料行业碳达峰碳中和路径

从上一章塑料的全生命周期碳排放预测可以看出，塑料的碳排放主要来自于生产过程和用后管理。减少碳排放，本质上需要减少塑料消费量及由此驱动的供应端减量，即源头减量，特别是在一次性塑料方面的减量。 同时，需要使用低碳生产工艺和绿色能源进一步降低单位塑料生产的碳排放强度。针对用后管理，减少塑料焚烧将是降碳的强有力措施，对于不可回收的塑料，禁焚也可以发挥倒逼源头减量的作用。 从更长远的角度，塑料本质上是一种基于碳基材料的产品，因此对 CO_2 进行捕集并加以利用进而制成塑料，是实现塑料行业全生命周期碳中和的优势。

从塑料全生命周期碳排放的角度，我们制定了四条碳减排路径：源头减量，生产过程强化，禁止塑料焚烧和使用负碳技术，为塑料行业助力中国实现碳达峰碳中和目标制定了相关路线图。

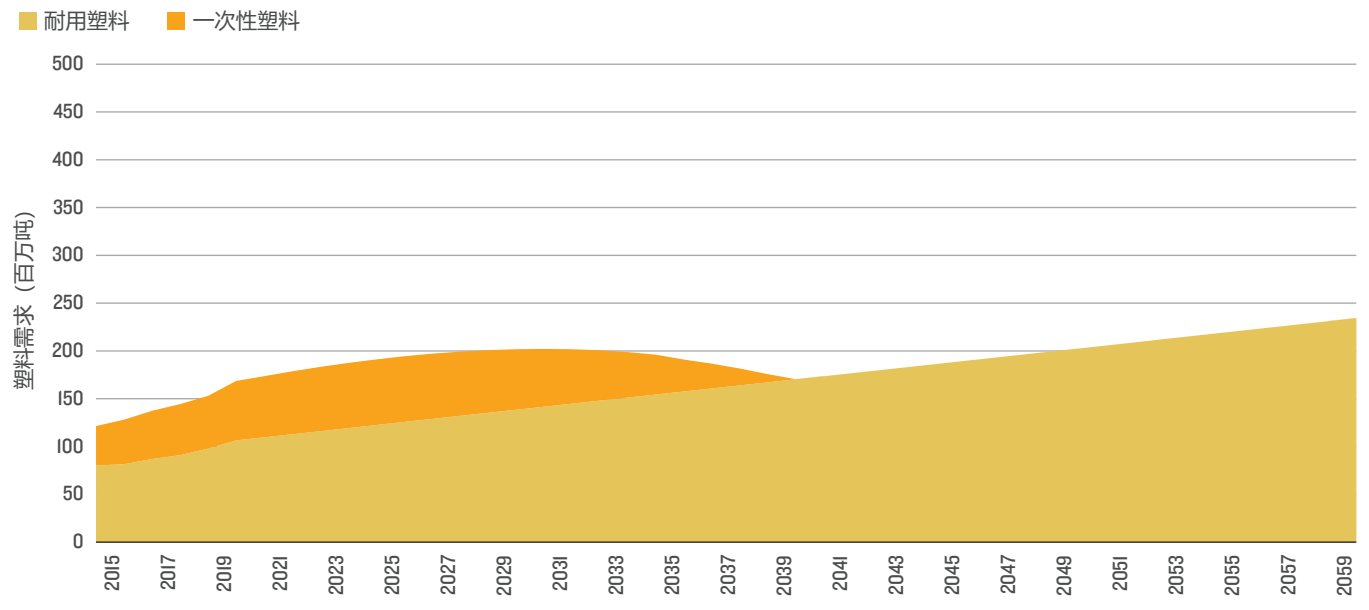
3.1 路径一：源头减量

根据前文分析，塑料中的一次性塑料大约占了 40%，由此产生了大量的废弃物。结合国家循环经济发展和塑料管理政策的落地，尤其是限塑令的强有力实施，塑料源头减量势在必行。塑料源头减量的方法有两方面：淘汰一次性塑料和减少耐用塑料的使用。研究也分析了强化塑料回收对实现源头减量的影响。通过设定成效节点，我们分析了其对碳减排潜力的影响。

3.1.1 2040 年以前淘汰一次性塑料

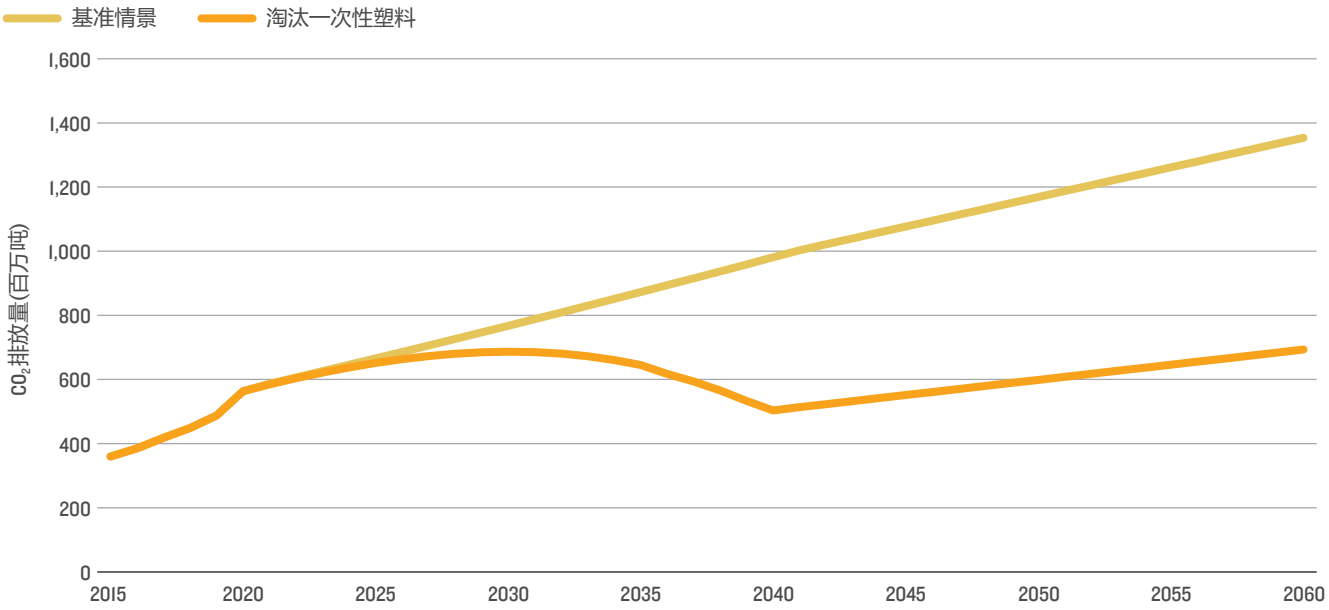
假设在一系列控制与减量措施下，从现在开始逐步减少一次性塑料，其需求在 2027 年左右达峰（约 0.7 亿吨）。到 2040 年，将完全淘汰一次性塑料。碳排放峰值在 2030 年到来，为 6.9 亿吨。随后逐步减少至 2040 年，排放量为 5 亿吨（减少 48.7%）。由于塑料生产增长率为 3%，即使淘汰一次性塑料，2040 年以后，耐用塑料需求仍在增长，导致排放量在 2040 年以后又开始抬头，到 2060 年总排放量为 6.9 亿吨，较基准情景的 13.5 亿吨减少了 50%。

图 3-1：2040 年完全淘汰一次性塑料情景下的树脂生产预测



从现在开始逐步减少一次性塑料，到 2040 年，完全淘汰一次性塑料[7]。碳排放峰值在 2030 年到来，为 6.9 亿吨。随后逐步减少至 2040 年，排放量为 5 亿吨（减少 48.7%）。由于本报告假设塑料生产增长率为 3%，即使淘汰一次性塑料，2040 年以后，耐用塑料需求仍在增长，导致排放量在 2040 年以后又开始抬头，到 2060 年排放量为 6.9 亿吨，相对基准情景的 13.5 亿吨减少了 50%。

图 3-2：淘汰一次性塑料情景下的碳排放

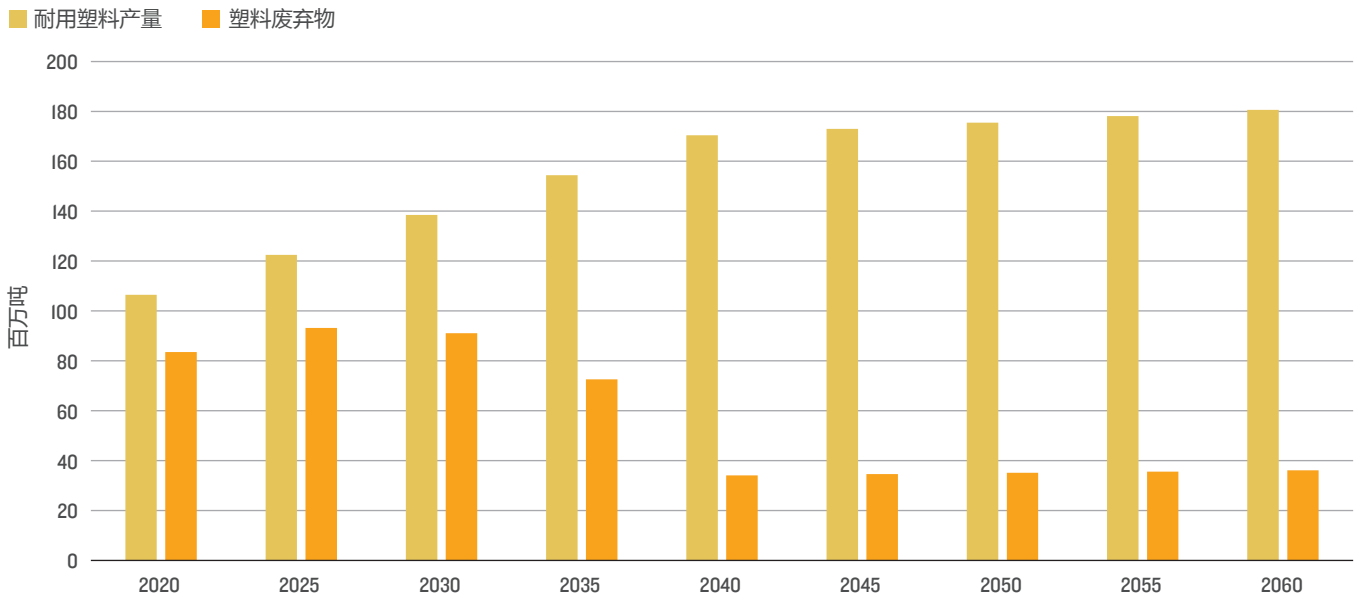


逐步淘汰一次性塑料需要一系列塑料减量、重复利用和回收的方案。例如：无塑料的新快递模式、减少包装材料使用的设计原则、产品再利用和再制造以延长产品寿命、创新产品设计和材料选择，以及高效和高质量的回收。

3.1.2 减缓耐用塑料的增长

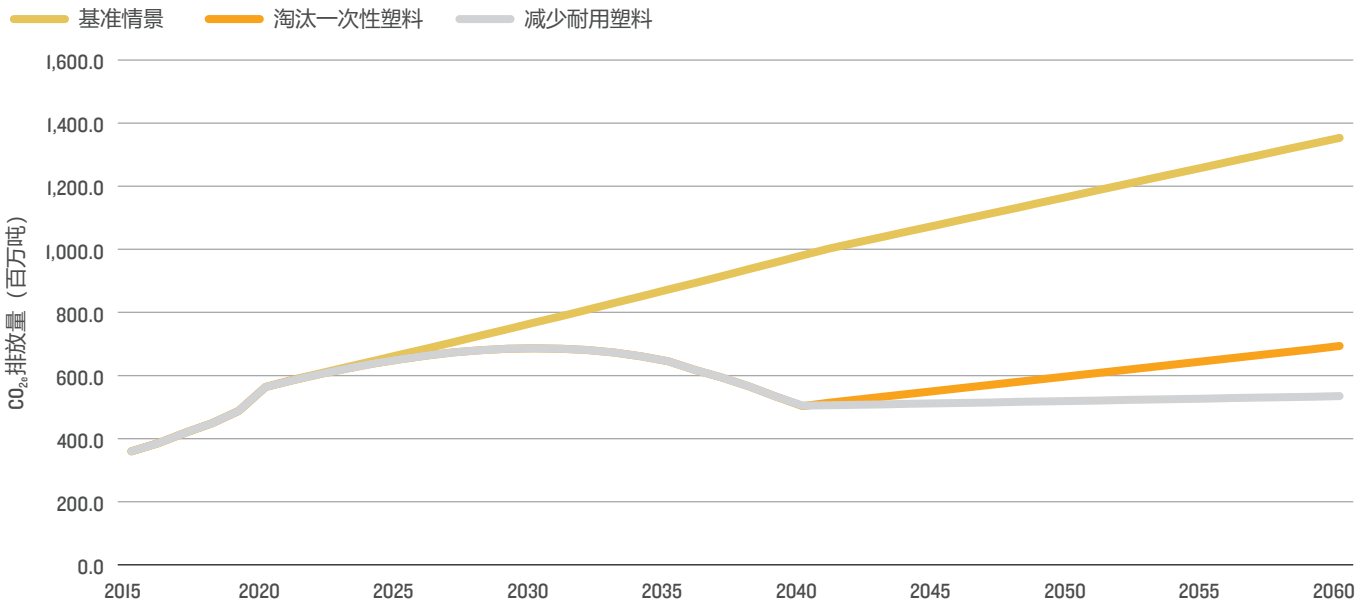
在限制一次性塑料的同时，为防止 2040 年后由于耐用塑料的增长导致碳排放回升，报告进一步模拟了限制耐用塑料需求增长的情况和分析了它对碳减排的影响。不同于一次性塑料主要流向包装领域，耐用塑料主要用于电子电器产品、汽车、建筑等领域。耐用塑料目前依旧主要来自于化石原料，生产过程也产生大量的碳排放，若未来实现 100% 绿色原材料，耐用塑料的使用可以对环境有正向意义。假设自 2040 年起，假设耐用塑料生产品的需求从之前的年均增长 3% 下降为年均 0.3%，可以得到强化减量的塑料产量预测（图 3-3）。到 2060 年，塑料总产量为 1.8 亿吨，塑料垃圾产量为 0.36 亿吨，较基准情景的垃圾量（1.86 亿吨）减少了 80%。

图3-3：耐用塑料产量和塑料废弃物



在假设碳强度不变，耐用塑料产量发生变动的情况下，至2060年，碳排放量将为5.35亿吨，相较于只淘汰一次性塑料的情景（6.9亿吨）又额外减少11%的碳排放（图3-4），源头减量一共可贡献8.2亿吨，约60.5%的减排量。

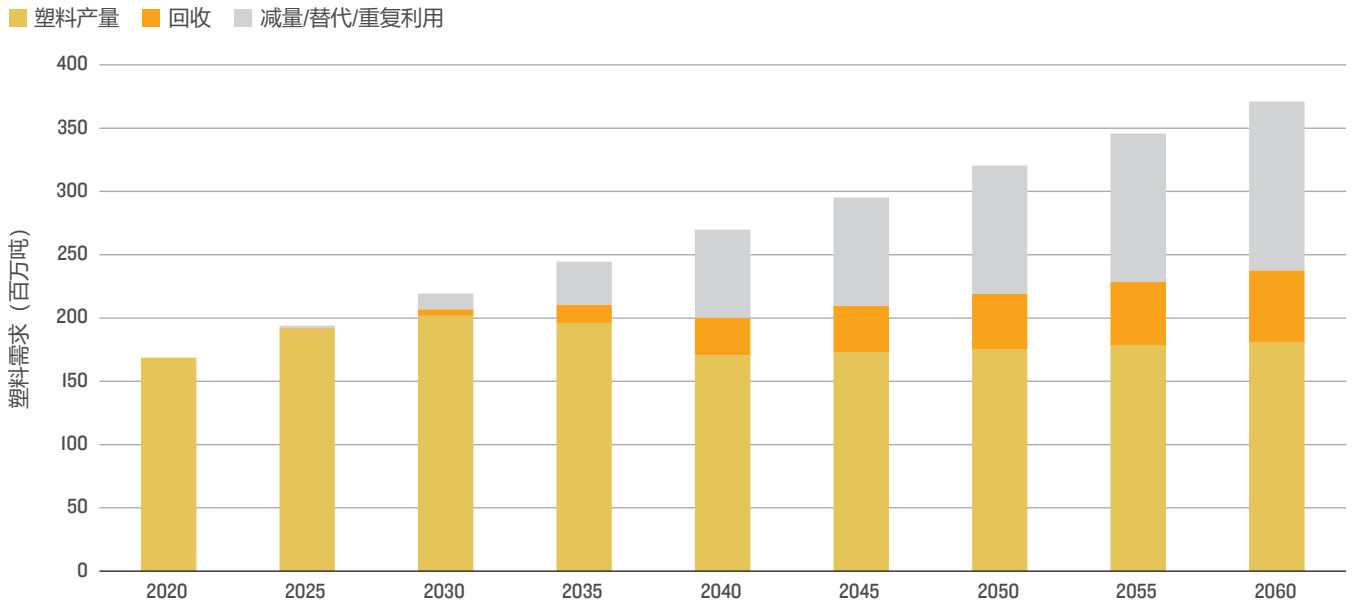
图3-4：源头减量情景下的碳排放



3.1.3 强化回收实现供应端减量的效用分析

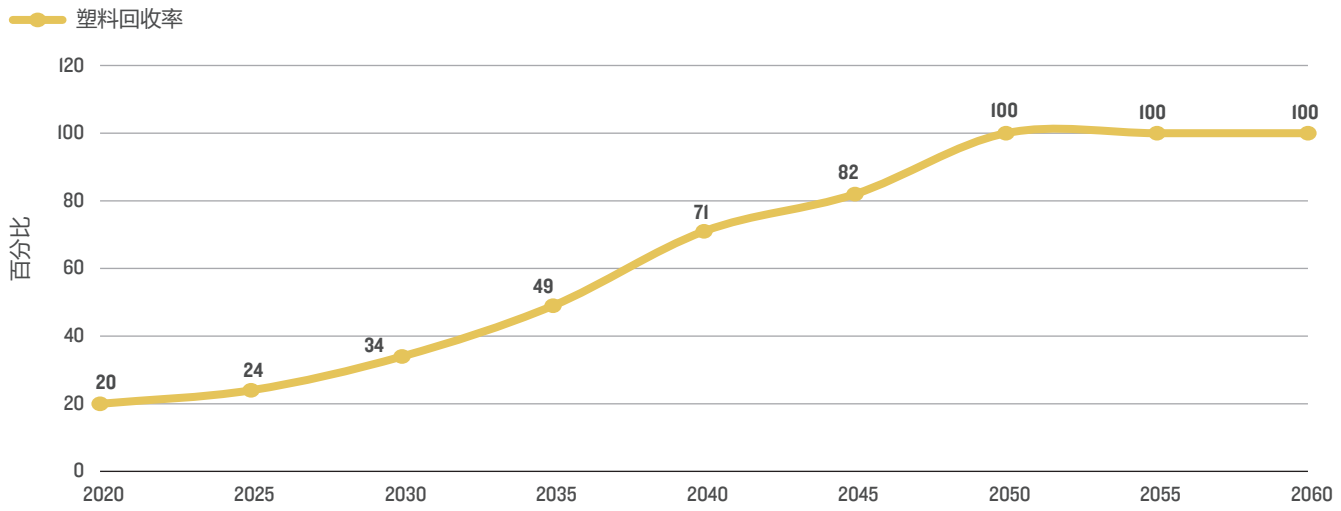
源头减量是为了减少原生塑料的生产量，进而减少塑料废物，以达到减少塑料全生命周期的碳排放。为了不因降低塑料的消费量而影响到人们的生活品质，减量、重复使用和回收依次是填补需求空缺的重要措施。报告假设源头减量中，回收的贡献率占 30%，塑料减量、替代和重复使用占 70%，并计算出到 2060 年，这两个方面为满足塑料需求，需要达到的效用量。

图 3-5：源头减量实现路径的预测



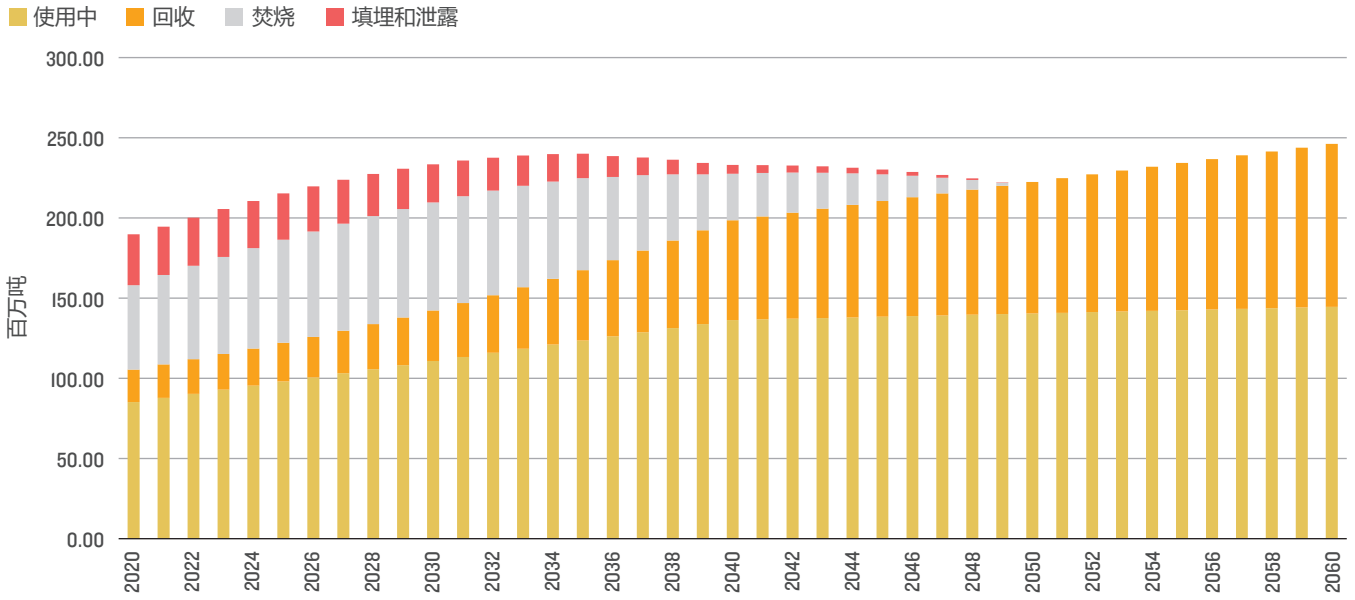
强化回收下，塑料源头减量的实现路径如图 3-5。从 2020 年到 2060 年，回收和塑料减量 / 替代 / 重复使用都逐渐增大。到 2060 年，可使用塑料量（新生产 + 回收利用）达到 4.2 亿吨。强化回收情境下，塑料回收率（回收量 / 废弃塑料量）由 2020 年的 20% 增加到 2030 年的 34%，到 2050 年达到 100% 废塑料回收。（图 3-6）。

图3-6：塑料回收率预测



在采取淘汰一次性塑料，减少耐用塑料的使用，以及设定回收率目标的条件下，报告计算了源头减量情景下新的塑料物质流（图 3-7）。塑料焚烧量于 2029 年达峰（0.68 亿吨）。到 2050 年，因为实现了对废弃塑料 100% 的回收，焚烧，填埋和泄漏降为零。到 2060 年，塑料在系统中使用量为 1.4 亿吨，回收的塑料为 1 亿吨左右，总体比基准情景下减少了 1.3 亿吨塑料。

图3-7：源头减量情景下的塑料物质流



3.2 路径二：生产过程强化

如前文分析，中国化石原料塑料生产过程排放系数为 2.5 吨 CO_{2e}/ 吨塑料，占全生命周期碳强度的将近 50%。通过生产过程的绿色低碳化，可实现相当一部分的碳减排。生产过程的减排包括能源使用的碳减排和原料使用的碳减排。此章节的分析若实现两者 100% 脱碳，对塑料全生命周期碳排放的影响。实现塑料的生产过程百分之百绿色低碳的生产过程包括使用可再生能源，蒸汽裂解装置的电气化，聚合的电气化、提高蒸汽裂解装置的加工和能源效率等。百分之百绿色原料的包括使用绿氢和碳捕捉的碳，以生命周期末端的塑料为新生产的原料和以沼气和生物石脑油等为形式的生物质能燃料等。

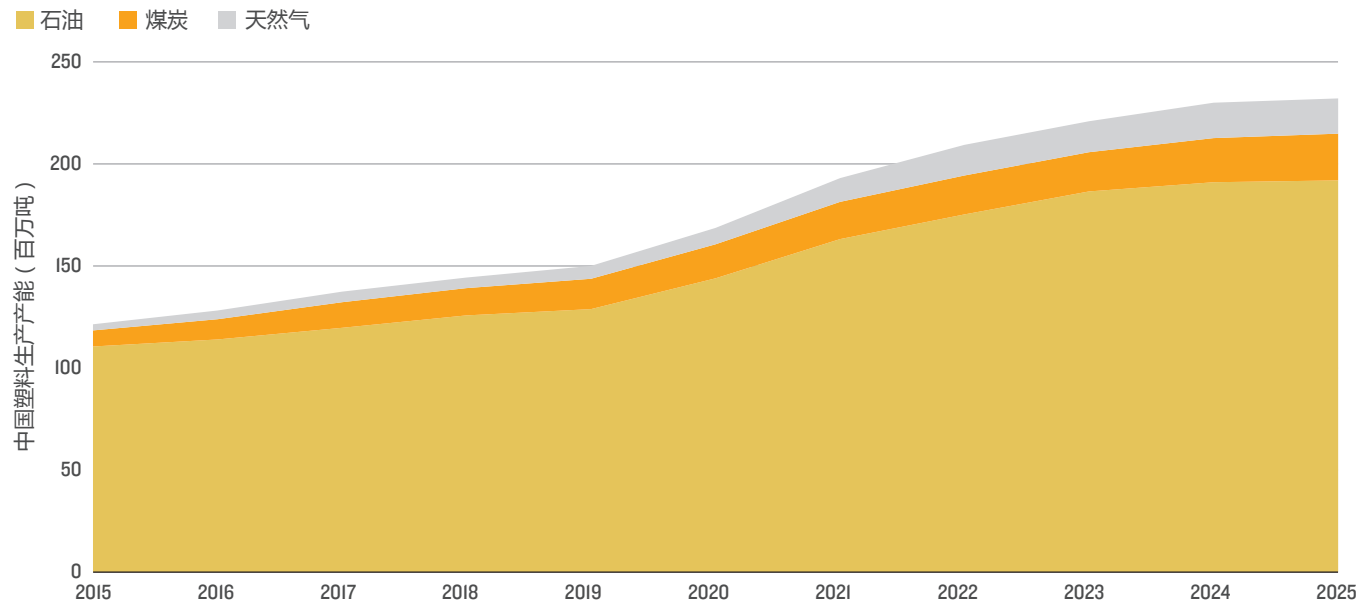
3.2.1 2050 年实现百分之百绿色能源与过程

如前文分析，中国化石原料基塑料生产过程碳排放强度为 2.5 吨 CO_{2e}/ 吨塑料，占全生命周期碳排放强度的近 50%。通过生产过程的绿色低碳化，可实现相当一部分的碳减排。生产过程的减排包括能源消耗相关的碳减排和原料相关的碳减排。此章节分析了两者皆实现 100% 脱碳对塑料全生命周期碳排放的影响。实现塑料百分之百绿色能源与过程包括使用可再生能源、蒸汽裂解装置的电气化、聚合的电气化、提高生产工艺能耗效率等。百分之百的绿色原料的包括使用绿氢、以生命周期末端的塑料为新生产的原料、以沼气和生物石脑油等为形式的生物质能燃料、由机械和化学回收材料生产的塑料等。

3.2.2 2050 年实现百分之百绿色原料

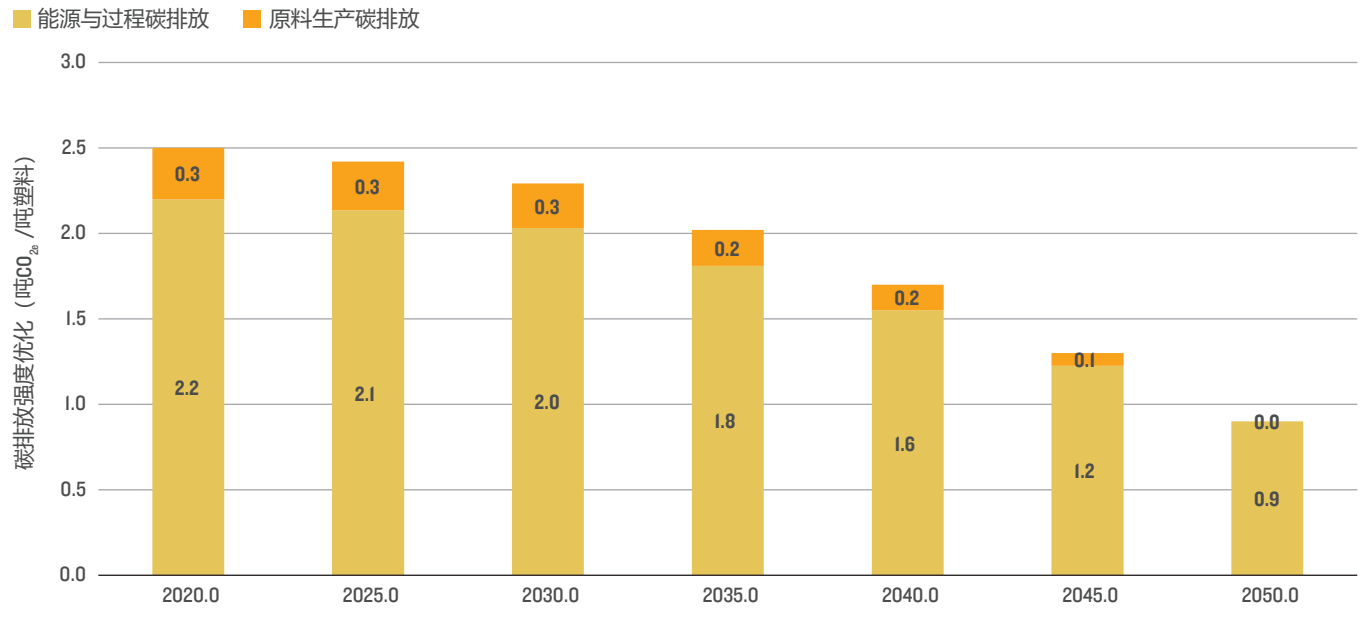
不同化石能源（石油、天然气、煤）为原料制成的塑料的生产过程碳排放强度也各不相同。据估算，煤制塑料的过程排放量是石油制塑料的两倍，而天然气制塑料的排放量比石油制塑料的排放量低 20%[14]。塑料在中国主要由石油制成（占产量的 85%），10% 在中国生产的塑料来自于煤炭，剩下来自于天然气（图 3-8）。塑料生产过程中，因原料使用造成的碳排放强度为 0.3 吨 CO_{2e}。

图 3-8：中国塑料生产原料组成



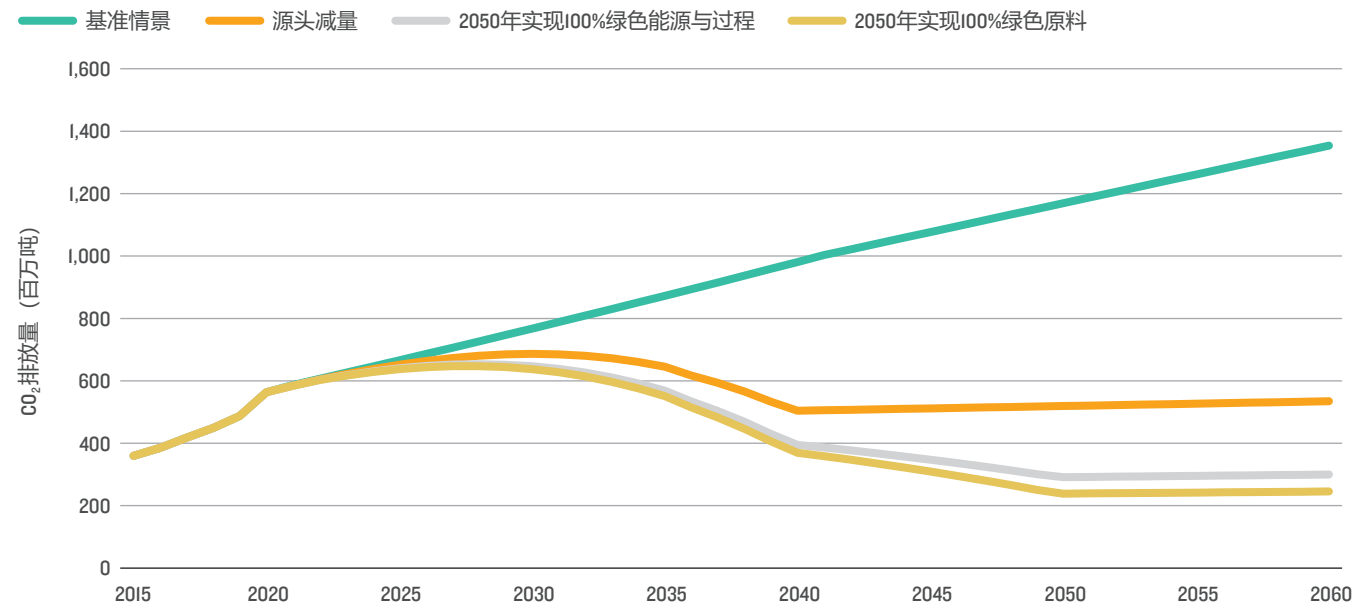
百分之百绿色能源与过程的己安排路线可以解决一部分生产工艺中的碳排放问题，如果将化石原料替换成绿色零碳原料，可额外降低 0.3 吨 CO_{2e} 的碳排放强度。相对于基准情景，实现塑料生产的绿色能源与过程、绿色原料，可一共减少 2.9 亿吨碳排放量，占基准情景的 21.3%（图 3-10）。

图3-9：过程强化碳减排强度预测



通过路径一和路径二，塑料行业的碳达峰时间为 2028 年，达峰排放量为 6.47 亿吨。相对于 2028 年基准情景的 7.26 亿吨，减少了 1.13 亿吨排放（图 3-10）。

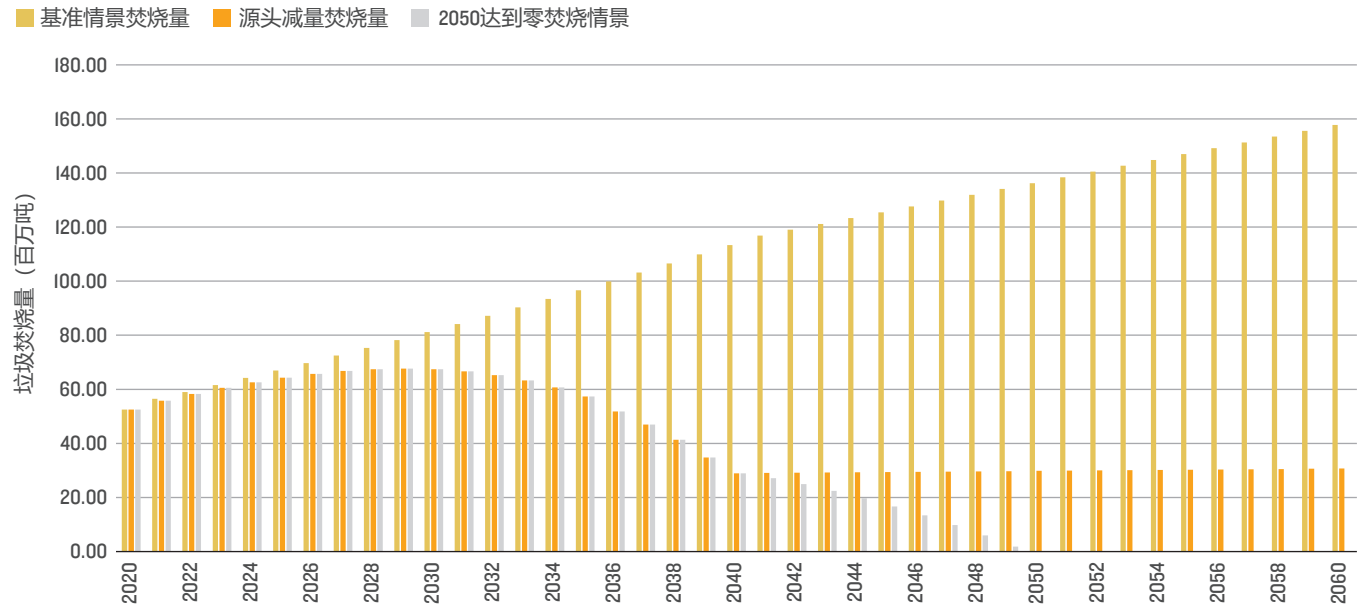
图3-10：生产过程强化下的碳排放



3.3 路径三：禁止塑料焚烧

前面的分析可知，末端焚烧的碳排放强度占全生命周期排放强度的 50% 以上，末端焚烧碳排放一共占总排放量的 30% 左右（图 2-7）。为了实现塑料行业碳达峰碳中和，还需要减少塑料生命周期末端的碳排放。假设一次性塑料已在 2021 至 2040 年逐步淘汰，焚化炉原料将大幅减少，之后逐步停止焚烧。基准情景下，2030 年塑料焚烧量为 8000 万吨，2040 年达到 1.13 亿吨，2050 年达到 1.36 亿吨。实施“路径一“源头减量后，塑料废弃物将大量减少，因此进入焚烧炉的废塑料也相应减少。2030 年为 0.67 亿吨，2040 年 0.29 亿吨，此后维持在 0.30 亿吨左右。路径三模拟了 2040 年至 2050 年逐步废除塑料焚烧的情况。2040 年以后，逐步减少塑料焚烧，至 2050 年，该 0.30 亿吨塑料将全部用于回收（图 3-11）。

图3-11：塑料焚烧量预测



到 2060 年，塑料零焚烧将额外贡献 0.83 亿吨的碳减排，占基准情景的 6.1%（图 3-12）。路径一与路径三也有联动作用，如禁止焚烧无法回收的塑料，比如热固性塑料，则会倒逼源头减量，减少不必要的塑料使用。禁止焚烧热固性塑料的措施可以提前进行，甚至可以 2030 年前完全禁止焚烧。

3.4 路径四：负碳技术

塑料生产的化学工序中的碳排放仍然存在，必须使用兜底技术，比如碳捕捉，封存和利用（CCUS），使该行业完全实现碳中和。在实施前三个减碳路径的基础上，2040 年规模化的应用负碳技术 (CCUS)，到 2060 年负碳技术可实现碳减排 1.61 亿吨，占基准情景的 11.9%（图 3-12）。这一长远情景下，负碳技术的成熟度有待进一步验证，可以进一步发展基于自然的解决方案，比如提高碳汇来消纳塑料行业的额外碳排放，作为负碳技术的补充。

3.5 路径总减排潜力

根据以上的四个路径，中国塑料行业可在 2028 年达峰，峰值为 6.47 亿吨，到 2050 年将碳排放控制在 1 亿吨左右，2060 年实现行业碳中和。2060 年，源头减量路径较基准情景下，可减少碳排放 8.2 亿吨，生产过程强化路径可实现减排 2.9 亿吨，零焚烧路径可减排 0.8 亿吨，负碳技术路径可减排 1.6 亿吨（图 3-12），减碳比例分别为 61%，21%，6%，12%（图 3-13）。

图 3-12：塑料行业碳减排情景分析

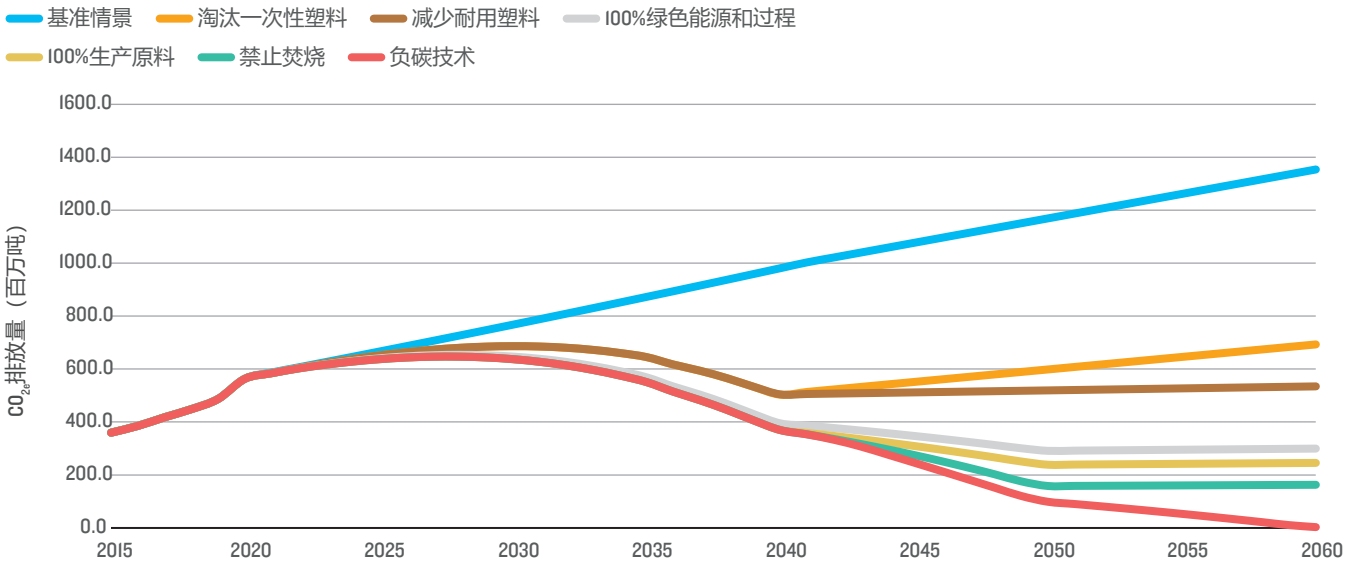
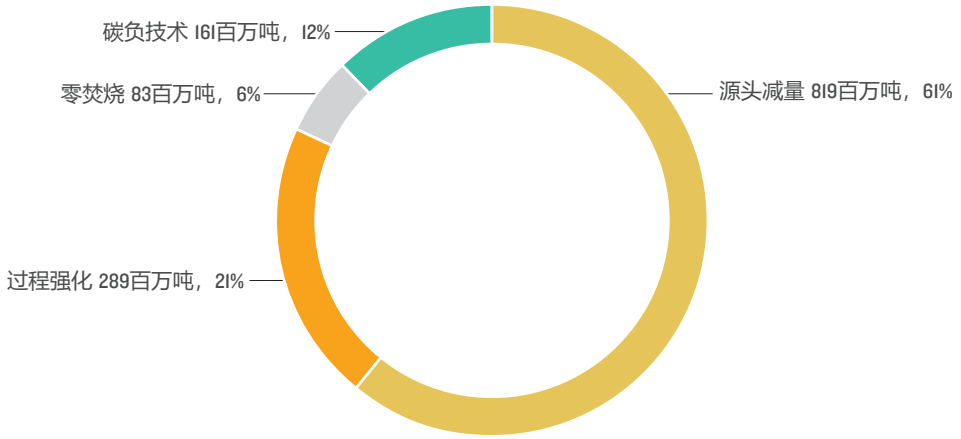


图 3-13：四个路径下 2060 年的减碳量



4

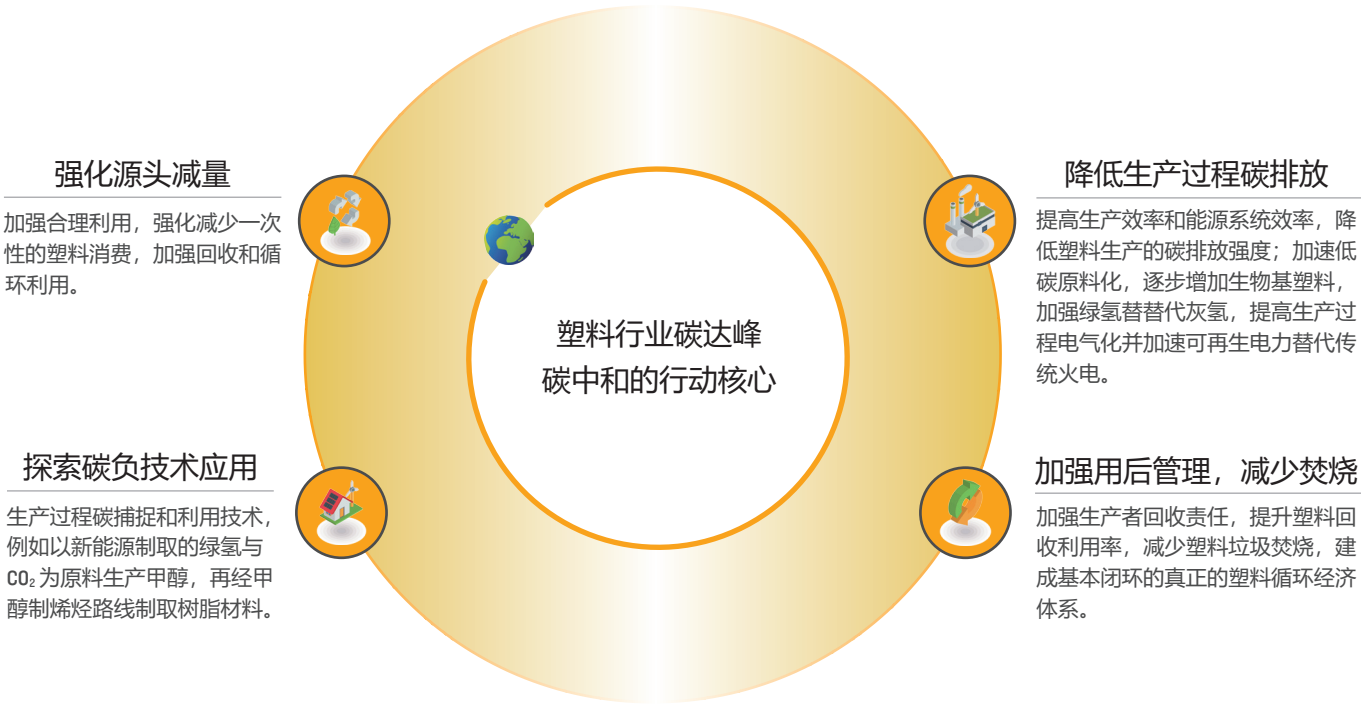
“碳达峰碳中和”目标导向的塑料减排时间表

本研究从塑料行业全生命周期碳排放管理入手，结合设计的四条主要碳减排路径，设计了为实现中国塑料行业碳达峰碳中和目标的减排时间表。

4.1 碳达峰碳中和的行动核心

塑料行业碳中和的发展的挑战是如何在增长的需求中，进行不必要消费的减量、生产侧的提效和脱碳、增加循环再利用和回收、减少和最终消除塑料垃圾。在碳达峰碳中和的目标导向下，应全链条节能、减排、减油，推动石化行业转型和高质量发展，由生产塑料产品的单一功能向生产产品和循环资源的双重功能转型，尽早建成塑料循环经济体系。

图 4-1：塑料行业碳达峰碳中和的行动核心



4.2 塑料行业脱碳整体时间表和保障措施

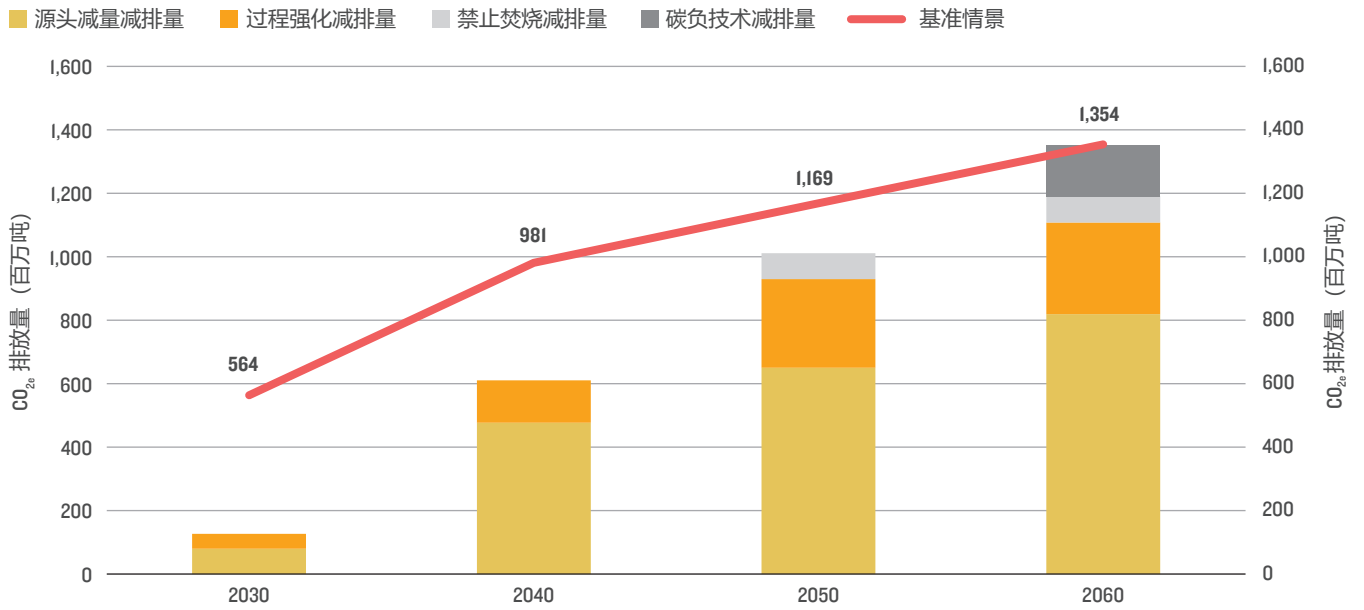
整体而言，在 2020-2060 年期间，加强塑料消费源头减量，需贯穿始终，并加速塑料回收、减少用后焚烧。研究建议到 2040 年淘汰一次性塑料，并推动新生初级形态塑料需求在 2030 到 2035 年达峰。生产环节的节能降碳也应同步进行，在政策和市场机制的驱动下促进技术突破，实现低碳工艺和绿色原料的规模化使用。源头减量和过程强化可以推动碳排放在 2030 年前出现拐点。减少焚烧、增加负碳技术应用等措施所带来的减排贡献将在 2040-2060 期间发挥关键作用，促成行业整体实现碳中和。

表 4-1：塑料行业实现“碳达峰碳中和”目标重要时间节点

时间	重点节点	不同措施的碳减排贡献（百万吨和贡献率）				碳减排量 *（百万吨）
		源头减量	过程强化	禁止焚烧	碳负技术	
2030	• 2028 年实现塑料行业碳达峰； • 废塑料回收率增加到 34%。	80 (63%)	47 (37%)	0	0	127
2040	• 原生初级形态塑料需求在 2030 年到 2035 年期间达峰； • 淘汰一次性塑料。	477 (78%)	134 (22%)	0	0	611
2050	• 100% 塑料回收率； • 100% 使用绿色能源和生产过程； • 100% 使用绿色原料。	650 (64%)	280 (28%)	81 (8%)	0	1011
2060	• 实现碳中和。	819 (66%)	289 (23%)	83 (7%)	161 (12%)	1351

注：* 减排量为对标基准情景下的碳排放量。

图4-2：2020-2060年分阶段实施重点



	2020-2030	2030-2040	2040-2060
源头减量	• 加强包装塑料减量、设计一次性塑料减量总体路线； • 试点生产者责任延伸机制，加强回收机制与体系建设	• 设立原生塑料总量控制目标，建立产品碳足迹等环境监管指标； • 大力发展高端技术和塑料产品，积极参与全球资源配置，减少低端产品制造和出口	• 完善塑料回收体系，包括耐用塑料的回收体系
过程强化	• 加强产业结构优化，淘汰石化落后产能	• 加强低碳工艺，绿电和绿色原料在生产测的应用，推动供给侧高质量发展	• 确保绿色原料在塑料原料生产的使用比例；保证可再生能源在生产过程中的高使用率
禁止焚烧	• 通过源头减量减少垃圾焚烧量	• 到 2040 年建议禁止焚烧不可回收的塑料，比如热固性塑料（模型没有列入计算）	• 实施“禁焚令”，推进废弃塑料循环利用，严格监管垃圾焚烧发电企业的运行情况，确保各类污染物稳定达标排放。
碳负技术	• 市场机制和政策驱动下促进研发和技术突破	• 石化行业试点大规模碳负技术项目	• 完善石化行业的碳交易市场，负碳技术成本大幅度降低

4.2.1 2020-2030 年实施重点

未来一段时间内，消费增长带动的产量增长，依然是塑料碳排放增长的主要驱动因素。制定中长期源头减量目标应是2020-2030 年期间的主要工作，力争到 2030 年，废塑料的回收率由 2020 年的 20% 增加到 2030 年的 34%。实现“碳达峰碳中和”目标虽然不应以紧缩消费为代价，但对消费品类、消费方式和用后处理需进行宏观引导和有效管理，尤其是需要减少一次性塑料消费，及加强循环再利用和塑料回收，引导绿色低碳的塑料经济发展。

第一、加强包装塑料减量、设计一次性塑料减量总体路线。

减量是塑料行业碳减排的关键点，也是目前的短板，应增强以预防为主的减量措施。目前中国塑料包装的消费约占塑料总量消费的 40%， 减少一次性塑料包装的使用是碳减排的重要措施。增强产品质量，延长耐用性塑料的使用寿命从而减少耐用塑料的生产，还可以降低一部分碳排放。在减少一次性塑料消费方面，需要从理念到行动、从消费者到生产者、消费者、管理者的共同努力。

塑料本质不是一次性的，一次性塑料的产生是商业模式和垃圾管理、包装管理机制等问题。应对和化解塑料问题，需要商业模式创新，预防和消除没有必要、可替代的一次性消费；包装设计要考虑后端的回收再用；在消费侧，加强绿色消费宣传和引领，建设可以推动生产者绿色创新、倒逼生产者提供绿色产品、绿色设计，而非自动适应既有商业模式，也是极为重要的一环。

“十四五”时期是塑料治理的关键期，需建立配套的塑料利用源头减量机制，为 2030 年前塑料行业碳达峰做准备。

1) 建设直接减量、间接减量、隐性减量的协同减量机制，促进“禁限塑”政策升级。

2) 加强绿色包装设计，减量与回收落实并重，对包装设计与使用，建立后端回收再用报告机制。

3) 创新商业模式，发展共享服务。例如，在快餐行业试点循环型餐具，在大型商超试点发展塑料瓶罐回收服务。

4) 建立预防性的“禁限塑”清单，消除没有必要、可替代的一次性塑料品消费。逐步禁止可替代的一次性塑料品消费。

5) 提高产品设计和品质，促进耐用塑料品使用寿命增长和一次性用品能回收性。

同时，需要在不同省市现有努力的基础上，建立区域和关键行业塑料垃圾引发量和排放减量机制，建立零废城市生活垃圾塑料占比控制指标。提升用后塑料回收率，降低用后塑料焚烧率。

第二、试点生产者责任延伸机制，加强重复使用与回收机制，建设塑料循环经济体系

推动生产者责任延伸制。与押金制、大型商超试点回收服务配套，提升回收产品的清洁度，同时激励生产者和消费者行为转变。对一些耐用塑料品，建立产品质量保障押金制度，激励企业提生产品品质。

1) 落实生产者责任延伸制和绿色包装制度，使“可回收”变成“被回收”，包装设计要考虑后端的回收再用。建立清晰的包装回收率、再生料利用率等刚性管理指标。

2) 加强塑料使用约束、监管、标志等制度。例如，增加产业链的塑料成分透明度，增强塑料产品品质管理，加强再生料制品品质监管，建立产品生命周期碳足迹追踪和标签制度。

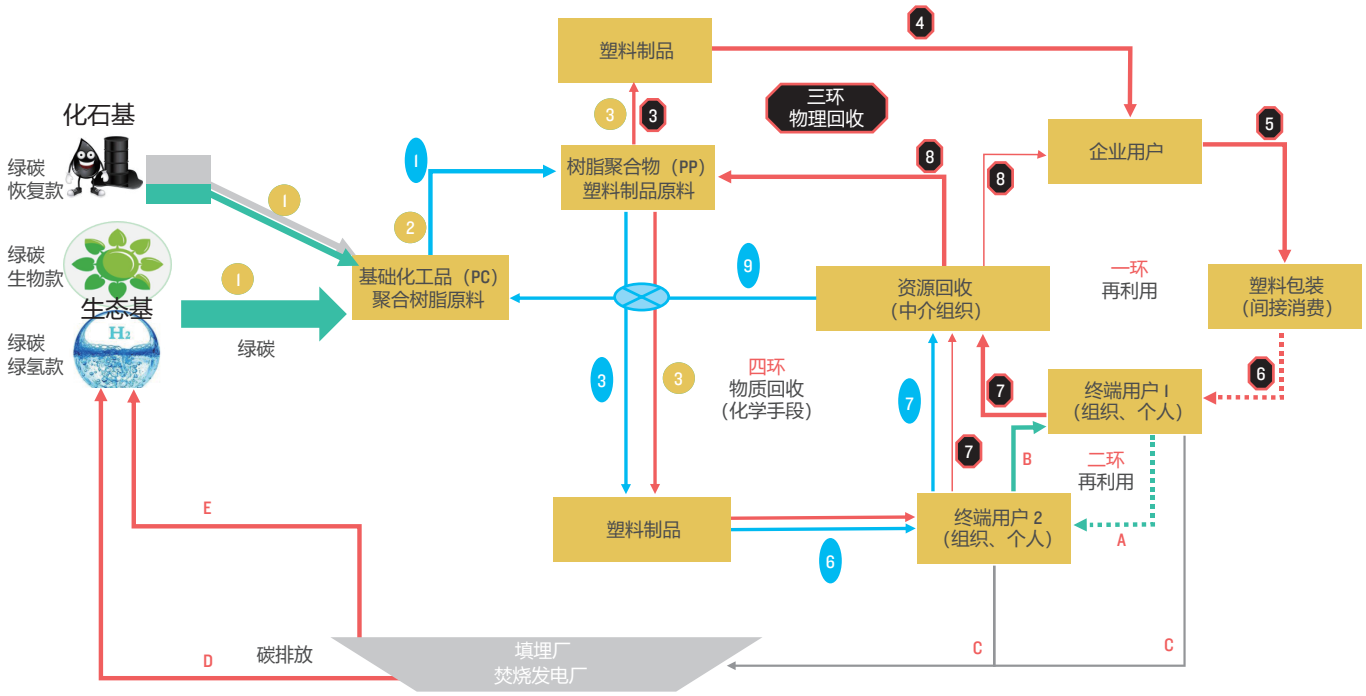
3) 建立化学回收的技术支持和监管体系，推广试点项目。

4) 在农村试点推行塑料替代政策，协同农膜、化肥袋、农药瓶等塑料管理，推进农村塑料污染治理。

5) 加强对薄膜类产品循环性的研发。对单一材质的薄膜塑料产品，适当增加厚度，以满足回收需求，提高回用率和材料化利用率。

实现塑料行业碳中和并减少环境污染，尽早建成塑料循环经济体系是关键[23]。分析表明，中国有可能在 2050 年前后基本建成闭环塑料循环经济，在 2060 年前后基本实现塑料产品全产业链、全周期碳中和。为确保不迟于 2060 年实现碳中和，中国塑料行业需要顶层设计，建设产品全链条管理，城乡一体化统筹，基本解决一次性产品问题的闭环塑料循环经济，使塑料如同金属矿产资源一样可循环使用。此报告提出了“五环”协同共建的闭环塑料循环经济系统（图 4-3），中国的塑料循环经济体系可以由五个相互耦合的循环圈有机组成，五大循环协同发力，推动塑料经济生态化、高质量发展。

图 4-3：闭环塑料循环经济：“五环”协同共建



注：数字为产品路线编码，圆圈对应日常塑料制品及其他用户可直接使用的塑料产品，如塑料门窗，六边形针对其他塑料制品；字母为用后塑料产品或产品（或其所含碳元素）的流向标记。

在这个“五环”协同共建的闭环塑料循环经济中：

1) “一环”路径是间接消费型塑料（例如包装回收、家电汽车所含的塑料）再利用路径，由图中六边形中的 5-6-7-8 路径，重点配套生产侧减量机制。核心是压实生产者责任制，如：对一些快消型的塑料品类建立押金制，押金不低于商品价值的 1/3。

2) “二环”路径是直接消费型塑料（如塑料玩具、塑料座椅、塑料管道）的循环再利用路径，提升产品性能和使用寿命（通过塑料添加物等），同时，配套二手商品流通机制。

3) “三环”路径是物理回收路径，针对各类消费的塑料制品，长路径对应六边形中的 3-4-5-6-7-8，短路径对应蓝色圈中的数字 3-6-7-8（8，位于六角形框）。提高回用率和清洁度是关键。农村地膜回用造粒案例和德国薄膜塑料袋回收案例启示，对薄膜类塑料建立厚度机制和回收再利用机制。

23 国务院 . 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知〔Z/OL〕.http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.2021-10-26

4) “四环”路径是化学回收路径，路径由 3-4-5-6-7-9，即由“三环”路径中的数字 8 变更为数字 9，这“最后一公里”重点是将用后塑料再生产为塑料生产原料，保障塑料回收再利用不降级。这条保级路现在基础薄弱，需要技术、技术、政策倾斜，加快建设，重点建设。

5) “五环”路径是生态循环路径，源头原材料不再取自于传统的化石能源，而是由生态系统的水资源、生物资源供给，末端处理时填埋可降解或碳排放可再利用。

闭环塑料循环经济发展的关键变革理念，积极行动。从产品的全生命周期环境影响与风险控制入手，由应对末端的塑料垃圾污染向应对线性塑料经济转变，预防为主，防治结合，系统治理，加速发展减量化、可循环、易回收、可更新（通过资源再生技术）、基本闭环、近零碳排放的新塑料经济模式。

第三、加强产业结构优化，淘汰落后产能。

塑料行业的供应端减量与石化行业的发展息息相关，应充分考虑中国实现 3060 目标下的减塑场景，优化石化产业结构。《“十四五”推动石化化工行业高质量发展指导意见》提出，2025 年前，石化化工行业应不断推动产业结构调整、优化调整产业布局、加快绿色低碳发展 [24]。

在 2020-2025 年期间，石化行业上游的炼化一体化产能增长预计将放缓，在“十四五”末进入产能平台期；在此期间，如上述《意见》所指出的，需要调整产业结构，加快落后产能退出，严控高碳排放、高污染的细分行业的产能增长。2026-2030 年期间，需严格控制新建重复产能，进一步加速淘汰落后产能；与此同时，石化行业整体的炼油业务将逐步减少，发展高质量化工产业。

4.2.2 2030-2040 年实施重点

这是新生初级形态塑料树脂生产总量达峰的关键期，通过进一步实施减量措施，可实现原生塑料在 2030 到 2035 年期间实现生产总量达峰。在此期间，同时需要加大生产侧的技术革新，提高绿色能源和绿色原料的应用。力争在 2040 年完全淘汰一次性塑料，之后由化石原料基生产的耐用塑料的需求大大减少。

第一、设立原生塑料总量控制目标

此阶段，需加大塑料的材料化回收，回收率从 2030 年的 35% 提高到 2040 年的 70%。同时，制定新料树脂（原生塑料）的消费总量控制目标，建议总量控制在 2 亿吨左右，并划入“十六五”规划，并成立总量控制研究小组，制定相关监督管理体制。将再生料百分比作为化工行业循环经济发展考核指标。对重点包装品，建立回收机制、循环利用率、包装产品碳足迹比等环境监管指标。

第二、加强低碳工艺、绿色电力和绿色原料在生产侧的应用

对于已建和在建的产能，应加快低碳原料替代，降低对石油等化石能源的依赖。提高绿电的使用比例，加强低碳生产技术的应用，如深度电气化、石轻烃裂解和原油直接裂解等。

第三、推动塑料产业供给侧高质量发展。

推动行业高质量发展，不仅是推动产业向价值链上游转移，同时也会带来碳减排的协同效益。中国的塑料产业的产量和产能均处世界前列，但是在高端产品的产业链上仍然存在技术短缺等问题。在 2030-2040 年期间，需在高端技术和产品领域取得长足进展，并积极参与全球资源配置，显著减少低端产品的制造和出口，减少本地产生的碳排放。

4.2.3 2040-2060 年实施重点

此阶段，一次性塑料已经基本淘汰，塑料的增长主要来自耐用塑料的消费需求。回收体系已经趋于完善，这为耐用塑料的进一步回收提供了基础，废塑料回收率将从 2040 年的 70% 提到 2050 年的 100%；同时，逐渐减少塑料垃圾焚烧，到 2050 年彻底废除垃圾焚烧，这也倒逼不可回收塑料的减量或甚至停止使用。生产侧到 2050 年，将全面实现百分之百绿色能源和原料的使用。在政策和市场机制的驱动下，扩大负碳

24 国务院 . 六部门联合印发关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见〔Z/OL〕.http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/08/content_5683972.htm.2022-03-28

技术领域的布局，到 2050-2060 年实现规模化应用。

第一、建立完善的财税政策和市场机制，实现石化行业深度脱碳。

建立健全的石化碳市场是石化行业脱碳的关键举措，预计“十四五”期间，石化行业将会进入碳市场。 在 2040 到 2060 年这个阶段，中国的石化行业的碳交易市场应该趋于成熟，碳盘查和核查系统规范。石化行业应充分利用交易机制的激励，拓展融资渠道，研发低碳工艺技术，打破成本壁垒，实现生产过程深度脱碳。

第二、限制塑料焚烧，实施“禁焚令”，避免末端处理造成的碳排放。

源头减量和塑料回收率的提升将大幅度减少塑料垃圾的产生，使限制焚烧的难度逐步降低。 最终的目标是实现零焚烧，消除这种末端处理产生的环境污染和碳排放， 实现废塑料的完全循环利用。对于不可回收的塑料，禁焚也会促使其减量和替代循环使用。 “禁焚令”应严格监管垃圾焚烧发电企业的运行情况，确保各类污染物稳定达标排放。

第三、推动负碳技术在石化行业的规模化应用。

石化行业可以利用工艺过程中产生的碳排放源相对集中的优势，在已有的设施附近配套 碳捕捉系统，可避免闲置资产处置和提高经济效益。在二氧化碳捕集和分离方面，已经有以下技术：化学溶剂法，物理溶剂法，吸附法和膜分离技术等。以上碳捕捉方法的成本降低都依赖于溶剂技术和吸附与分离材料，应着力于这些技术的突破。塑料产品的原料可以来自于捕捉的 CO_2，从而实现全生命周期的零排放，这是塑料行业实现碳中和的优势和机遇。有效的政策和市场机制可以帮助石化和塑料行业在碳利用方面发挥其价值， 布局新兴的负碳技术产业。

排版印制 / 136 7111 7637
mirodesign
米罗空间品牌设计

本报告采用环保纸印刷

邮箱：CONTACT@CCETP.CN

网址：HTTPS://WWW.CCETP.CN

封面图片：© Photo from PxHere