某石化企业碳达峰情景预测及达峰路径研究

马 磊[1] 孟凡伟[1] 肖 勇[1] 霍军明[2]

(1. 青岛中油华东院安全环保有限公司;2. 国家管网集团北京管道有限公司)

摘 要 文章以某石化企业为例,首先核算碳排放总量及排放源构成,识别重点排放源,对碳排放量影响因素进行分析,主要包括企业产能变化导致的燃料消耗量变化、催化剂烧焦量变化等;然后采用情景分析法与Mann-Kendall 趋势检验法预测了企业碳达峰时间和峰值,提出相应减排路径措施,主要包括推动产品结构调整、构建低碳化石化企业能源系统、提高电气化率、加大低碳能源使用和降低企业综合能耗,从而减少企业二氧化碳排放量,为石化企业碳达峰路径研究提供参考和借鉴。

关键词 石化企业; 碳排放量; 碳达峰; 减排路径

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2023.01.001 **文章编号:** 1005-3158(2023)01-0001-05

Scenario Prediction and Pathway of Carbon Peaking for a Petrochemical Enterprise

Ma Lei[1] Meng Fanwei[1] Xiao Yong[1] Huo Junming[2]

(1. *China Pretroleum EDI Safety Environment Protection Co., Ltd.*; 2. *PipeChina Beijing Gas Pipeline Co., Ltd.*)

ABSTRACT Taking a petrochemical enterprise as an example, firstly, total carbon emission and the composition of emission sources were calculated. The key emission sources were identified. The influencing factors of carbon emissions which mainly involved the changes of fuel consumptions and the charring capacity of catalyst caused by the production changes of enterprise. Then, the scenario analysis and Mann-Kendall trend test method were used to predict the time and value of carbon peaking of a petrochemical enterprise. And corresponding measures of emission reduction pathway were proposed, primarily including the promotion of product structure adjustment, the construction of energy system of the low-carbon petrochemical enterprise, the improvement of the electrification rate, the increase of low-carbon energy use, the reduction of comprehensive energy consumption in enterprise. Thus, the carbon dioxide emissions of the enterprise reduced. This paper provides reference for the pathways of carbon peaking in the petrochemical enterprises.

KEYWORDS petrochemical enterprises; carbon emissions; carbon peaking; emission reduction pathway

0 引 言

近年来,二氧化碳大量排放造成严重的气候问题,危害到人类的生存环境和健康安全,采取碳减排行动缓解气候变化刻不容缓[1]。中国作为全球生态文明建设的重要参与者、贡献者和引领者,在全球气候治理中发挥着重要建设性作用[2]。2020 年 9 月,国家主席习近平在联合国成立 75 周年纪念峰会上宣布中国力争于 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和。2021 年 10 月,《国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》(国发〔2021〕23 号)等要求相继出台,宣告了碳达峰碳中和"1+N"政策体系的正式建立。

近年来,国内外学者利用各种碳预测模型对国家、省、市不同层面以及农业、工业等不同行业领域的碳达峰峰值和时间进行了预测[3],但预测模型形式多样、繁简不一,针对路径的科学性、合理性和可操作性还缺少深入的论证,影响了达峰时间和达峰路径的实施[4]。从企业自身角度出发,要完成碳达峰情景预测及达峰路径研究,需要从能源消耗、产品结构调整、减碳和降碳模式及路径措施等方面统筹考虑。

第一作者:马磊,2007 年毕业于大连理工大学环境工程专业,高级工程师,现在青岛中油华东院安全环保有限公司从事环境影响评价、碳排放等相关研究工作。通信地址:山东省青岛市市南区延安三路 113 号甲,266071。E-mail:malei.se@cnpc.com.cn。

通讯作者:孟凡伟,2005 年毕业于南京大学环境工程专业,高级工程师,现在青岛中油华东院安全环保有限公司从事环境影响评价、碳排放等相关研究工作。通信地址:山东省青岛市市南区延安三路 113 号甲,266071。E-mail:mengfanwei.se@cnpc.com.cn。

本文以某石化企业为例，梳理核算企业历史碳排放总量，筛选重点碳排放源，预测企业碳达峰时间和峰值，提出相应减排路径措施，为石化企业碳达峰路径研究提供参考和借鉴。该企业属全加氢燃料型炼厂，设计原油加工能力 1 300 万 t/a，总体加工工艺路线为“常减压蒸馏-蜡油加氢裂化-渣油加氢脱硫-重油催化裂化及延迟焦化”，主要生产汽油、柴油、航煤、丙烯、液化气、硫磺、沥青等 16 类 69 种产品。

1 技术路线

通过历史分析，梳理核算石化企业碳排放总量及排放源构成，分析碳排放量历史变化趋势和规律，筛选识别重点排放源，对碳排放量进行影响因素分析，研判碳排放趋势、预判碳减排潜力等。同时根据企业发展规划、能源消耗量和产品产量等测算未来 10 年企业的碳排放总量，采用情景分析法与 Mann-Kendall 趋势检验法预测企业碳达峰峰值和达峰时间，分析碳达峰路径，提出相应减排措施，技术路线见图 1。

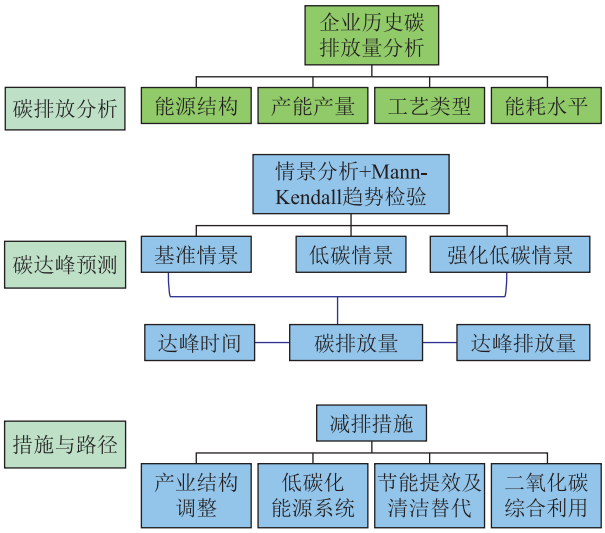

图 1 技术路线

2 预算与分析方法

2.1 情景分析法

情景分析法中的各种情景都是以历史数据为依据，结合现有相关背景（如企业产能规模、技术进步程度、相关政策约束等）进行合理的假设，以此预测可能实现的目标。对于目标的预测，在分析目标发展趋势的同时，可以研究实现此目标的可行路径，进而选择最佳减碳措施，最终实现碳达峰预测目标[5]。从目前已有文献中应用的情景分析法可以看出，所设置的情景可大致分为三类：第一类是在现有状况的基础上继续发展的一种情景；第二类是在现有发展状况的基础上，综合考虑企业发展规划可能采取的相关措施而形成的情景；第三类是在企业发展规划的基础上，综合科技的发展及相关政策的实施，提出最优发展路径所形成的情景[6]。本文参考这个设置思路为预测石化企业二氧化碳排放量设定了三种情景：一是以企业 2021 年以前的历史排放数据及趋势为基准设置的基准情景；二是参考企业“十四五”“十五五”发展规划，结合现有的、可行的各项减排措施而形成的低碳情景；三是参考企业“十四五”“十五五”发展规划，根据未来科技发展及相关政策的实施，提出最优的发展路径而设置的强化低碳情景。

2.2 趋势检验计算

Mann-Kendall 趋势检验法是世界气象组织（WMO）推荐并广泛应用的非参数统计检验方法。进行初始假设 H_0：企业碳排放仍处于平台期，尚未实现碳达峰。若拒绝 H_0 假设，则接受替代假设 H_1：企业二氧化碳排放有显著下降趋势。在该假设情况下，使用 Mann-Kendall 趋势分析检验法判断企业是否实现了碳达峰。

在 Mann-Kendall 检验中，原假设 H_0 为时间序列数据 $(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，是 n 个独立的、随机变量同分布的样本；备择假设 H_1 是双边检验。对于所有的 i，$j \leqslant n$，且 $i \neq j$，x_i 和 x_j 的分布是不相同的。

定义检验统计量 S 见式(1)：

$$S = \sum_{i=2}^{n} \sum_{j=1}^{i-1} \mathrm{sign}(x_i - x_j) \tag{1}$$

式中：sign()为符号函数，当 $x_i - x_j$ 小于、等于或大于零时，$\mathrm{sign}(x_i - x_j)$ 分别为 -1，0 或 1；S 为正态分布，其均值为 0，方差 $\mathrm{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$。

M-K 统计量公式 S 大于、等于、小于 0 时分别为：

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S > 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S < 0 \\ 0, & S = 0 \end{cases} \tag{2}$$

在双边趋势检验中，对于给定的置信水平 α，若 $|Z| \geqslant Z_{1-\alpha}/2$，则原假设 H_0 是不可接受的，即在置信水平 α 上。$|Z| \geqslant 1.28$，1.64，2.32 时，表示分别通过了信度 90%，95%，99% 显著性检验，认为企业碳排放已实现碳达峰。本文中三种情景下 Mann-Kendall 参数选择及 Z 值计算结果见表 1。

表 1 Mann-Kendall 参数选择

项目	基准	低碳	强力低碳
n	13	13	13
S	49	58	64
$\mathrm{Var}(S)$	268.67	268.67	268.67
Z	2.93	3.48	3.84

2.3 碳排放分析方法

2.3.1 核算依据

根据《中国石油化工企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》(发改办气候〔2014〕2920号),碳排放核算范围包括燃料燃烧二氧化碳排放、工业生产过程排放、火炬燃烧排放、企业净购入电力和热力对应的二氧化碳排放共五个部分。本文使用的历史排放数据为 2018—2021 年,其中以 2021 年为基准年,研究预测的年份为 2022—2032 年。

2.3.2 核算边界

碳排放核算的边界为石化企业的直接生产系统、辅助生产系统、附属生产系统对应的二氧化碳排放。其中,直接生产系统包括常减压装置、催化裂化装置、连续重整等炼油装置;辅助生产系统包括配套的供电、供水、采暖、制冷、机修、运输等;附属生产系统包括厂区内为生产服务的部门等。石化企业碳排放核算边界见图 2。

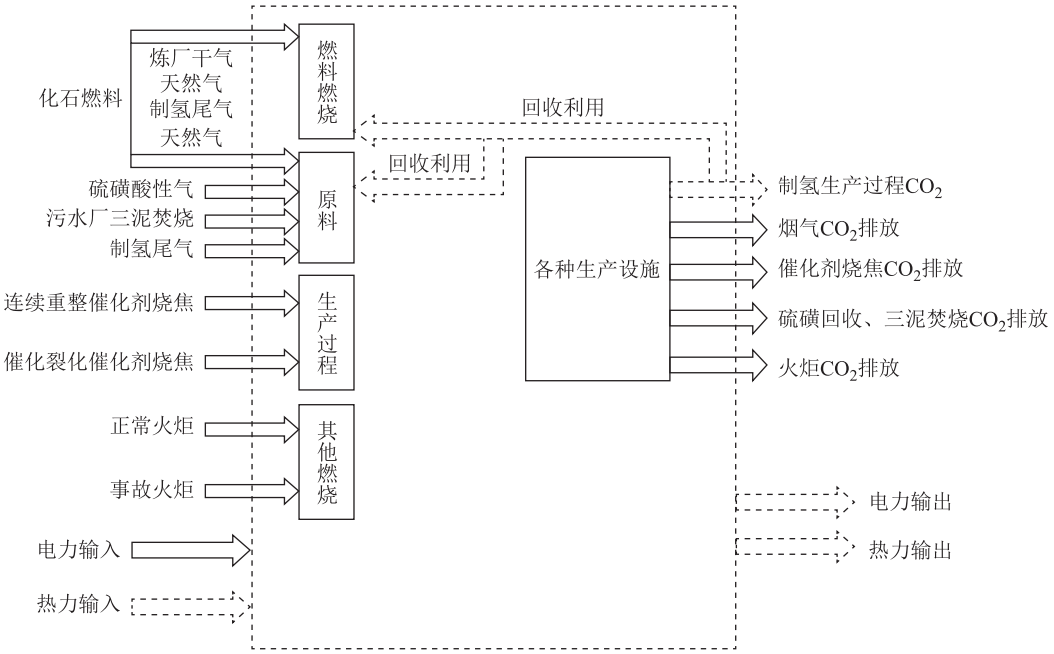

图 2　石化企业碳排放核算边界示意

3　结果与讨论

3.1 碳排放总量及排放强度分析

2018—2021 年石化企业碳排放总量情况见图 3。碳排放源中燃料燃烧排放的二氧化碳占大部分,占比 48%～55%;工业生产过程排放的二氧化碳其次,占比 19%～22%;净购入电力、热力隐含的二氧化碳排放占比也较高,为 12%～15%。常减压装置、各加氢裂化装置的加热炉是燃料燃烧排放二氧化碳主要排放源;工业生产过程排放二氧化碳的主要装置有催化裂化、制氢、连续重整等装置,其中催化裂化装置因催化剂烧焦而成为二氧化碳排放大户,再生器排放 20%左右的二氧化碳。

2018—2021 年石化企业碳排放强度变化见图 4。从图 4 可以看出,企业原油加工碳排放强度控制在

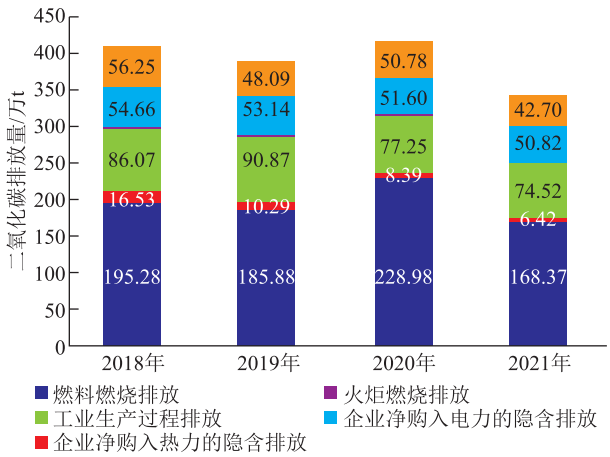

图 3　2018—2021 年石化企业碳排放总量

0.35～0.41 tCO_2/t 原油,通过上游生产装置节能减排,单位能源碳排放强度呈逐年递减趋势,可以达到 1.51 tCO_2/t 标煤。

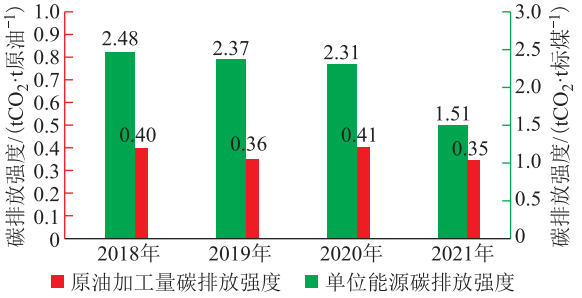

图 4　2018—2021 年石化企业碳排放强度对比

3.2 影响因素分析

根据石化企业历史碳排放情况分析，二氧化碳排放量主要影响因素为企业产能变化导致的燃料消耗量变化、催化剂烧焦量变化等。在企业产能变化不大的情况下，燃料组成变化、催化剂烧焦中碳含量变化也影响二氧化碳排放总量。同时，装置开停工、大检修周期、异常火炬排放也是影响二氧化碳排放总量的主要因素。

3.3 碳达峰情景预测

3.3.1 企业发展规划

“十四五”期间，该企业炼油规模在维持现有水平的基础上小幅增加，2024 年炼油规模达到 1 100 万 t/a，2025 年全厂大修，炼油规模为 1 000 万 t/a。在不断提高能源利用效率上深化管理，通过提高加热炉热效率等技术手段，使炼油能耗进一步降低。

“十五五”期间，新建 1 000 万 t 炼油及百万 t 级乙烯项目，最终形成 2 300 万 t 级炼油、120 万 t 级乙烯产业规模。细分三步完成：第一步，从现在开始到 2026 年，炼油规模达到满负荷运行(1 300 万 t/a)，在现有装置基础上，新建催化裂解装置及下游配套化工装置。第二步，启动炼化一体化转型升级项目，至 2029 年，配套建设百万吨级乙烯(120 万 t/a)及下游化工装置，实现 1 300 万 t 炼油＋百万吨级乙烯产业规模，实现公司由单一炼油型企业向炼化一体化企业转变，初步实现企业转型升级高质量发展的目标。第三步，至 2030 年，结合市场形势，新建 1 000 万 t 级炼油项目，最终形成 2 300 万 t 级炼油、120 万 t 级乙烯产业规模。

3.3.2 基准情景

该情景是根据该石化企业 2018—2021 年度的发展变化趋势得到的可能情景，在维持原有的碳减排措施和技术水平情况下，以石化企业 2021 年的碳排放量为基准值预测未来二氧化碳排放量的变化趋势。同时，通过 Mann-Kendall 趋势分析检验，得出 $Z=2.93>2.32$，且通过了 99%显著性检验，认为企业碳排放已实现碳达峰。

3.3.3 低碳情景

该情景是参考石化行业现有相关政策目标以及石化企业“十四五”“十五五”发展规划开展的碳减排措施来设定的。在此情景下，石化企业按照计划实施中压蒸汽管线保温改造、能量系统优化、加热炉综合节能改造、换热器提效改造、水处理技术改造等项目，同时提高全厂电气化率，均可减排 CO_2。

通过 Mann-Kendall 趋势分析检验，得出 $Z=3.48>2.32$，且通过了 99%显著性检验，认为企业碳排放已实现碳达峰。

3.3.4 强化低碳情景

科技创新是实现碳减排的必要手段，若要大幅提高清洁能源利用效率，从根本上降低二氧化碳排放量，只有依靠科技创新的突破。强化低碳情景的设置就是在假定生产技术和能源技术有所突破的情形下，结合石化企业“十四五”“十五五”发展规划，预测二氧化碳排放量。

石化企业积极开展优质风光资源的可行性研究，加强与政府和地方企业的合作，进行风电场和光伏电站的开发和建设工作，这样净外购电力可以变成绿电，排放因子参考四川大学建筑与环境学院和亿科环境共同开发的中国生命周期基础数据库(Chinese Life Cycle Database，CLCD)中的数据，取值为 6.1 gCO_2/kWh；在碳捕集环节，石化企业拟新建二氧化碳回收利用装置，利用风电、太阳能光伏电和水电进行电解水制氢项目研究和建设，替代天然气制氢；积极探索碳捕获、利用与封存技术实现和推广应用，努力实现“近零”排放。通过 Mann-Kendall 趋势分析检验，得出 $Z=3.84>2.32$，且通过了 99%显著性检验，认为企业碳排放已实现碳达峰。

综上分析可知，判断该企业在 2030 年可实现碳排放达峰，基准情景下峰值为 1 104.71 万 t CO_2 当量，低碳情景下峰值为 1 052.18 万 t CO_2 当量，在强化低碳情景下峰值为 906.94 万 t CO_2 当量。各种情景下石化企业 2022—2032 年碳达峰示意见图 5。

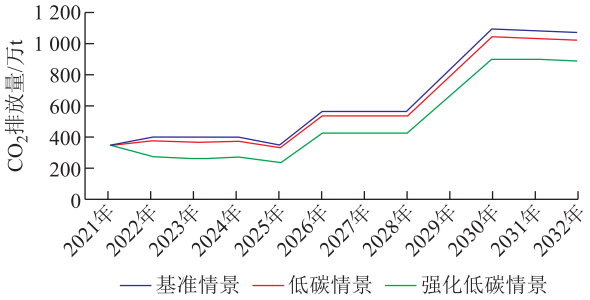

图 5　各种情景下 2022—2032 年石化企业碳达峰示意

4　碳达峰路径及政策建议

4.1 产业结构优化调整

结合石化企业所面临的压力和挑战,为了破解困境、推进高质量发展,石化企业需进行产业结构优化调整,推行减油增化优化产品,减少成品油产出规模,加快实施炼化一体化发展,原料化工轻油收率到2025 年达到 14%[5]。

石化企业按照“一次规划、分步实施”的规划原则,确定“两步走”的路径。第一步,“十四五”期间,按照现有千万吨原油加工总量,采用催化裂解工艺技术,对炼油部分进行“减油增化”改造,配套建设以催化裂解为核心的炼油及聚丙烯、苯乙烯等化工装置,提高航煤产量,压减汽柴油产量,增产化工产品,培育下游化工市场,为下一步实施乙烯项目建设、实现炼化一体化转型升级奠定基础。第二步,在炼油装置催化裂解技术改造的基础上,在“十五五”期间继续谋划千万吨炼油、百万吨乙烯装置建设,全面完成石化企业炼化一体化转型升级,奋力迈上高质量发展新台阶。

4.2 构建低碳化石化企业能源系统

石化企业积极发展绿电、绿氢项目。使用风电及太阳能发电,就地利用绿电资源发展电解水制氢项目,替代石化企业天然气制氢装置,将绿氢接入工厂氢气系统或向社会供氢;与核电企业合作,探索和自身能源系统耦合的以供热为主的小型核电系统[6]。

4.3 节能提效及清洁替代

采取有效措施,降低全厂综合能耗。通过提高加热炉热效率、优化装置结构和工艺条件、降低工业水用量、优化蒸汽系统管理等技术手段,使炼油能耗进一步降低,提高电气化率。通过蒸汽伴热替代、蒸汽透平替代、降低全厂综合能耗等措施,将全厂的电气化率从 2020 年的 16.34%提升至 2025 年的 20%。2025 年炼油综合能耗的目标是 52 kg 标油/t,较 2020 年降低 1.44 个单位。

“十四五”末期,预计可降低中压蒸汽消耗 20 万 t/a,低压蒸汽消耗 30 万 t/a,从而减少 CO_2 排放 28.63 万 t/a。

4.4 二氧化碳的综合利用

根据核算数据,制氢装置排放的二氧化碳量占全厂碳排放总量的 18%左右,因此制氢装置的二氧化碳回收与利用对石化企业碳减排具有重要意义。经过比选,建议开展二氧化碳捕集回收技术研发,对烟气中二氧化碳进行回收利用[7]。在碳利用环节,二氧化碳可作为原料制备可降解高分子塑料;99.9%(食品级)以上 CO_2 还可以作为产品外售。

4.5 不确定性讨论

由于科技发展的日新月异,以及政府相关节能减排政策的推陈出新,因此,本研究设定情景目的并非能准确估计可能实现的技术提升,只是想要提供一个可行的减排方向,并不能将所有的可能情景全部列出。此外,关于调高电气化率、降低能耗强度等技术因素,以及调整产品及能源结构等政策因素对行业碳达峰贡献的研究,还有待在后续工作中深入研究。

5　结　论

本文根据对某石化企业历史二氧化碳排放量的核算,不同情景企业碳达峰值的预测结果,提出了针对于石化企业的碳达峰目标实现路径及减排措施。主要包括通过推动产品结构调整、构建低碳化石化企业能源系统、提高电气化率、加大低碳能源使用、降低企业综合能耗,从而减少企业二氧化碳排放量,利用不同浓度的二氧化碳,研发高附加值化学品技术等,打造低碳发展新型企业。

参 考 文 献

[1]　IPCC. Climate change 2014: synthesis report[R]. 2015: 1-10.

[2]　燕东,刘枫,叶鹏飞,等.碳达峰情景预测的主要方法及模型[J].环境保护与循环经济,2021,41(7):97-101.

[3]　王勇,王恩东,毕莹.不同情景下碳排放达峰对中国经济的影响——基于 CGE 模型的分析[J].资源科学,2017,39(10):1896-1908.

[4]　曹颖,刘强,李晓梅,等.推动部分区域碳排放率先达峰调研分析报告[R].2019:10-20.

[5]　于孟君.中国石化行业二氧化碳排放量因素分解及达峰路径研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2020:40.

[6]　庞凌云,翁慧,常靖,等.中国石化化工行业二氧化碳排放达峰路径研究[J].环境科学研究,2022,35(2):356-367.

[7]　曹湘洪.炼油行业碳达峰碳中和的技术路径[J].炼油技术与工程,2022,52(1):1-10.

(收稿日期　2022-08-08)

(编辑　　刘晓辉)