

# 基于系统动力学的化工行业碳排放影响因素分析

鲁亚宁<sup>1,2</sup>, 廖翠萍<sup>2</sup>, 张雨龙<sup>3</sup>

(1. 沈阳化工大学经济与管理学院, 沈阳 110142; 2. 中科院广州能源研究所, 广州 510640;

3. 贵州理工学院经济管理学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 随着中国碳减排的深入推进, 化工行业的碳排放逐步呈现下降趋势。然而, 该行业在实现碳中和目标过程中依然面临高能耗和高碳排放的挑战。为此, 基于系统动力学的碳排放模型, 对 2010—2021 年化工行业子行业的碳排放进行拟合分析, 探讨人均消费、固定资产投资、教育水平等多重因素对碳排放的动态影响。模型仿真结果表明, 随着消费水平的提升, 碳排放压力增加, 但通过加大固定资产投资和引导绿色消费行为, 碳排放可得到抑制。

**关键词:** 化工行业; 系统动力学; 碳排放; 仿真分析; 因素探究

**中图分类号:** F224; F426. 72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)07-0336-07

随着全球对气候变化问题的关注不断提升<sup>[1]</sup>, 碳中和已成为各国共同追求的战略目标。化工行业因其高能耗和高碳排放特性, 已成为中国节能减排工作中的重点领域之一<sup>[2]</sup>。实现化工行业的低碳转型不仅是中国实现碳中和目标的重要一环, 也是推动化工行业高质量发展的必由之路<sup>[3]</sup>。然而, 化工行业在实现碳中和目标过程中面临着严峻的挑战。

为了应对化工行业的碳排放挑战, 需要系统分析当前碳排放状况, 明确主要的影响因素, 进而有效制定低碳转型策略<sup>[4]</sup>。许多学者对碳排放问题进行了深入研究。针对工业碳排放的预测, 田利军和徐森雨<sup>[5]</sup>利用系统动力需额模型对中国民航脱碳路径进行了研究。与此同时, 赵路<sup>[6]</sup>研究表明, 政府补贴低碳产品消费者策略在初期有助于市场开拓, 而从长期来看, 补贴低碳减排技术策略能更有效推动企业投资低碳技术, 实现更高的绩效价格比。丁玉龙和秦尊文<sup>[7]</sup>进一步探讨了信息通信技术对绿色经济效率的影响, 通过面板 Tobit 模型的实证研究发现, 信息通信技术的应用可以有效提升绿色经济效率, 从而间接促进碳减排, 通过信息化手段提升化工行业的生产和管理效率, 成为实现低碳转型的重要路径。

在化工行业碳排放的相关研究中, 已有学者从不同角度探讨了各种影响因素的作用<sup>[8]</sup>。别晓东和

周德禄<sup>[9]</sup>通过理论与实证分析, 揭示了人力资本在经济低碳转型中的重要作用。张晶晶等<sup>[10]</sup>通过对新疆准东经济技术开发区的碳排放特征进行分析, 发现化石燃料燃烧是主要排放源, 强调了能源结构调整对碳排放的积极作用, 提出了发展园区循环经济、制定低碳行业标准等对策。同时, 金智新等<sup>[11]</sup>在研究中指出, 在“中等收入”与新“双控”政策背景下, 煤炭行业迎来了转型发展的新机遇, 强调了产业政策的调控对实现低碳目标的关键作用。

能源结构和政策对化工行业碳排放的影响也备受关注。韩泉城等<sup>[12]</sup>基于山东省 2010—2022 年统计数据, 采用“自上而下”法测算交通运输碳排放量, 并通过 STIRPAT (stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology) 模型分析了人均 GDP、城镇化率、综合换算周转量和能源结构等因素对碳排放的影响, 发现这些因素与碳排放量呈正相关关系。

尽管现有研究揭示了诸如经济投入、技术进步和市场需求等因素对碳排放的影响, 但大多数研究侧重于单一因素的静态分析, 未能全面量化多因素之间的动态交互作用。本文应用系统动力学模型于化工行业的低碳转型, 以期揭示该行业投资对技术升级和教育支持下的碳排放动态变化, 丰富现有研究中的化工行业碳排放多因素影响探究。

**收稿日期:** 2024-10-09

**作者简介:** 鲁亚宁(2000—), 男, 黑龙江牡丹江人, 硕士研究生, 研究方向为能源战略管理; 廖翠萍(1966—), 女, 广东广州人, 研究员, 研究方向为能源战略规划、能源政策与能源经济、低碳技术评估及低碳经济发展; 通信作者张雨龙(1989—), 男, 贵州贵阳人, 博士(后), 研究方向为能源经济。

## 1 化工行业碳排放系统动力学模型构建

### 1.1 模型设计与研究范围

化工行业碳排放受到经济、技术进步、市场发展、环境因素、教育水平等多种因素的共同影响。为了系统分析这些因素对碳排放的影响,建立系统动力学模型,并采用联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)方法进行碳排放的测算。研究范围:选取了石油加工、化学原料、医疗制药等6个具有代表性的化工行业的子行业,以确保研究对象具有代表性,数据可靠且仿真结果具有科学性。

### 1.2 系统动力学模型的解释

系统动力学模型通过存量与流量的关系,结合因果反馈机制,量化政策激励和技术进步对碳排放的动态影响。具体而言,该模型刻画了政策变化对技术创新的驱动效应、技术进步对市场需求的调节机制,以及教育投入对影响碳排放的优化过程。这种系统化的反馈机制使得模型能够在不同情景下动态模拟化工行业的碳排放趋势,为制定有效的碳减排策略提供科学依据。

### 1.3 数据来源

具体能源种类的二氧化碳排放系数和电力逐年排放系数见表1和表2。数据来源于联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)以及中国碳核算数据库(CEADS)。

表1 各种能源的二氧化碳排放系数

能源种类	二氧化碳排放系数/ ( $\text{kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	能源种类	二氧化碳排放系数/ ( $\text{kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )
原煤	1.90	天然气	1.96
型煤	1.86	汽油	2.86
焦炭	2.66	柴油	3.04
液化石油气体	3.04	煤油	3.03
生物质	1.81	石油	3.19

表2 2010—2021年电力的二氧化碳排放系数

年份	排放系数/ ( $\text{kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	年份	排放系数/ ( $\text{kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )
2010	0.762	2016	0.713
2011	0.757	2017	0.705
2012	0.750	2018	0.692
2013	0.741	2019	0.676
2014	0.731	2020	0.659
2015	0.724	2021	0.557

### 1.4 测算结果

基于以上数据与IPCC得到中国化工行业的碳排放数据,见表3。

表3 2010—2021年中国化工行业碳排放数据

年份	碳排放量/亿 t	年份	碳排放量/亿 t
2010	388.07	2016	406.71
2011	448.18	2017	389.23
2012	434.60	2018	346.66
2013	439.26	2019	343.90
2014	420.00	2020	302.40
2015	476.46	2021	309.88

表3显示,2010—2015年化工行业碳排放量呈现增加趋势,峰值出现在2011年和2015年,反映了行业扩张和对化石燃料依赖的增强。并且,2014年的轻微下降与政策逐步推动技术进步和能效提高的措施有关,但这一影响尚未完全显现。自2016年起,碳排放量开始明显下降,并在2020年达到最低值。这一趋势主要与以下两方面的因素有关:①技术进步。技术进步在降低单位产量碳排放方面起到了关键作用。例如,环保型生产设备的普及和高能效工艺的应用,使得化工行业的碳强度逐年降低。②经济增长模式的调整。市场对绿色产品的需求不断增加,推动了行业内企业的产品升级和绿色转型,从而减少了整体的碳排放量。然而,2021年碳排放量略有上升,与经济复苏和需求上升导致的短期增产有关。这一现象表明,在经济活动加强的背景下,化工行业的减排工作仍需进一步优化,尤其是在如何降低化石燃料消耗和提升绿色能源比例方面。在对化工行业碳排放量进行测算之后,接下来需要进一步分析影响这些排放的关键因素。这些因素的选取对于系统动力学模型的建立和仿真至关重要。

### 1.5 化工行业碳排放影响因素分析

#### 1.5.1 逻辑图

影响因素的科学选取是系统动力学模型构建的关键环节。研究确定了若干关键影响因素,并对其进行了定性分析。图1展示了化工行业碳排放的主要影响因素及其相互关系,这些因素通过因果反馈机制共同作用,动态影响碳排放的变化过程。

#### 1.5.2 存量流量图

基于因果回路的分析,化工行业碳排放系统的存量流量图清晰展示了各关键变量(如固定资产投资、技术进步等)之间的动态关系及其相互影响。由于主要依据历史数据进行仿真,时间段为2010—2021年。系统动力学存量流量图如图2所示。主要变量见表4。



续表

变量名称	单位	变量类型	变量名称	单位	变量类型
最终产品耗能	亿 kg 标准煤	辅助	石油占比	无量纲	辅助
人均最终产品制造耗能	亿 kg 标准煤/百万人	辅助	生物质占比	无量纲	辅助
电力消费量	亿 kW·h	辅助	煤炭排放系数	无量纲	辅助
天然气消费量	亿 m <sup>3</sup>	辅助	石油排放系数	无量纲	辅助
液化石油气消耗量	亿 t	辅助	天然气排放系数	无量纲	辅助
煤炭消耗量	亿 t	辅助	液化石油气排放系数	无量纲	辅助
石油消耗量	亿 t	辅助	生物质能排放系数	无量纲	辅助
生物质消耗量	亿 t	辅助	电力排放系数	无量纲	辅助
城镇人口	百万人	辅助	低碳意识	无量纲	辅助
公众学历水平	百万人	辅助	教育投入比例	无量纲	辅助
人口增加量	百万人	辅助	GDP 增长率	无量纲	速率
人口减少量	百万人	辅助	城镇化率	无量纲	速率
科技投资	亿元	辅助	出生率	无量纲	速率
GDP 增长量	亿元	辅助	死亡率	无量纲	速率
教育投入	亿元	辅助	科技投资比例	无量纲	速率
大中型企业申请专利数	件	辅助	—	—	—

## 2 模型仿真与分析

### 2.1 历史检验

历史检验是通过比较仿真结果与实际数据来判断模型的有效性。选取化工行业总碳排放量、化工行业总能耗、GDP 总量和人口数量 4 个变量进行历史检验。仿真时间为 2010—2021 年,仿真步长为 1 年,并保存每一年的仿真结果。各指标仿真数据对照见表 5。数据仿真结果见表 6。

表 5 列出了各项指标的仿真数据与实际数据的对照。通过比较可以看出,除个别年份外,绝大多数年份的仿真结果与实际数据的误差在 ±5% 以内,表明模型对大部分年份的数据拟合效果较好。其中,2014 年和 2015 年的误差较大,这可能与两个原因有关:一是没有完全模拟当时的经济政策调整和能源价格波动;二是固定资产投资对碳排放具有滞后性,无法及时作用于碳排放数据。而 2020 年误差较大,分析其原因为:一是新冠肺炎疫情导致的能源需求下降;二是因为中国当时的政策放缓了生产,因而使整体化工行业子行业耗能减少,并且模型未考虑到当时的政策也导致出现预测不准的情形。总体而言,模型的仿真结果与实际数据接近,进一步验证了其在化工行业碳排放和能耗预测中的有效性。

通过对化工行业耗能、碳排放量、GDP 总量和总人口的仿真结果与实际数据的对比分析,模型整体表现出良好的准确性和可靠性。在化工行业耗能方面,大多数年份的误差均处于合理范围内。多数年份 GDP 的仿真值误差为 0.00% (模型的精度并非 100% 准确,只是由于小数位的省略而显示为

表 5 各指标仿真数据对照

年份	化工行业耗能/ 万 t 标准煤		误差/ %	化工行业碳排放 量/万 t CO <sub>2</sub>		误差/ %
	真实值	仿真值		真实值	仿真值	
2010	140.09	139.71	-0.27	388.07	404.53	4.24
2011	161.79	149.23	-7.76	448.18	431.57	-3.71
2012	156.89	155.43	-0.93	434.60	448.68	3.24
2013	158.58	157.76	-0.52	439.26	454.27	3.42
2014	151.62	165.82	9.36	420.00	450.25	7.20
2015	172.00	153.12	-10.98	476.45	438.70	-7.92
2016	146.82	145.60	-0.83	406.71	415.71	2.21
2017	140.51	136.94	-2.54	389.23	389.98	0.19
2018	125.14	125.30	0.19	346.66	355.52	2.56
2019	124.17	114.25	-7.99	343.95	322.15	-6.34
2020	109.17	118.40	8.46	302.40	331.50	9.62
2021	111.87	112.70	0.78	309.88	304.40	-1.77

表 6 数据仿真结果

年份	GDP 总量/亿元		误差/ %	总人口/百万人		误差/ %
	真实值	仿真值		真实值	仿真值	
2010	412 119.30	412 119.00	0.00	1 340.91	1 340.91	0.00
2011	487 940.20	487 940.00	0.00	1 349.16	1 347.33	-0.15
2012	538 580.00	538 580.00	0.00	1 359.22	1 355.59	-0.29
2013	592 963.20	592 963.00	0.00	1 367.26	1 365.68	-0.13
2014	643 563.10	643 563.00	0.00	1 376.46	1 373.74	-0.22
2015	688 858.20	688 858.00	0.00	1 383.26	1 382.95	-0.02
2016	746 395.10	746 395.00	0.00	1 392.32	1 389.76	-0.20
2017	832 035.90	832 036.00	0.00	1 400.11	1 398.83	-0.10
2018	919 281.10	919 281.00	0.00	1 405.41	1 406.64	0.10
2019	986 515.20	986 515.00	0.00	1 410.08	1 411.95	0.15
2020	1 013 567.00	1 035 700.00	2.18	1 412.12	1 416.64	0.35
2021	1 149 237.00	1 149 200.00	0.00	1 412.60	1 418.70	0.48

0.00%),表明模型在宏观经济和人口预测方面具有很高的精度。而 2020 年 GDP 的误差为 2.18%,这与全球经济波动有关。总体验证了模型的有效性。

## 2.2 固定资产投资对化工行业总排放的影响分析

固定 1 情景和固定 2 情景分别代表固定资产投资增加 1% 和 2%。通过表 7 可以看出,增加化工行业的固定资产投资强度对减少碳排放量具有积极作用。总体趋势:从表 7 中可以看出,随着固定资产投资的增加,化工行业的总能耗有所下降。无论是增加 1% 还是 2% 的固定资产投资,化工行业的总能耗(固定 1 和固定 2 情景)均比实际耗能(Current)有不同程度的减少。这表明,固定资产投资的增加对减少化工行业的总能耗具有积极的影响。基于情景分析得出:①边际递减效应。尽管增加固定资产投资 1% 能够显著减少能耗,但增加 2% 的固定资产投资时,减碳效果的边际收益有所下降。具体来看,在大多数年份,增加 2% 的投资对二氧化碳减少幅度的影响要低于增加 1% 投资的影响。这表明,随着固定资产投资的继续增加,其对能耗的影响逐渐减弱。②2020 年特例。2020 年数据显示,增加 1% 固定资产投资对能耗的减少效果尤为明显,达到 3.98%,是整个时间序列中最大幅度的能耗减少。分析其原因:疫情所带来的资源需求下降,叠加了固定资产投资对能源效率提升的作用,使得这一年呈现出明显的节能效果。然而,增加 2% 投资对该年的能耗影响较小,仅减少了 0.040 29%,再次体现了边际递减效应。③短期影响。数据表明,短期内增加固定资产投资能够对能耗产生积极影响,但效果较为有限。虽然每年固定资产投资的增加都带来了能耗的下降,但减排效果较为温和。这是因为化工行业在短期内无法迅速转化新增投资为高效的节能技术或设备,技术升级和设备更换需要较长时间才能产生显著的节能效果。④长期影响。长期来看,随着固定资产投资的增加,化工行业碳

排放量呈下降趋势。长期来看,固定资产投资能够推动行业的技术升级和生产效率提升,总体来说对化工行业碳排放减少起着推动作用。

## 2.3 人均消费水平对化工行业总排放的作用分析

除了固定资产投资对碳排放的影响,人均消费支出的变化也对化工行业总排放产生了显著作用。

通过系统动力学模拟了不同人均消费支出情景下化工行业的总耗能。表 8 显示,2010—2021 年,化工行业的总耗能呈现出先上升后下降的趋势,尤其在 2017 年和 2018 年,能耗的急剧下降尤为显著。这表明,随着消费支出的增加,化工行业正在向更节能、更高效的方向转型。在消费支出增加 1% 和 2% 的情景下,总耗能的模拟结果显示出显著的波动,特别是在 2017 年和 2018 年,能耗大幅下降,是由于市场对低碳产品需求增加,推动了技术升级和设备更新。2021 年的轻微反弹表明,经济复苏和消费支出的增长导致了能耗的增加,这与经济活动的增强密切相关。值得注意的是,在消费支出增加 1% 的情景下,总耗能的下降幅度最大可达 10.20%,这表明消费结构优化对降低化工行业的能耗有显著效果。随着社会经济不断发展,人们的消费水平提升会增加化工行业的排放压力。因此,必须重视化工行业的碳减排技术,以应对消费升级带来的挑战,并确保在满足市场需求的同时,持续减少碳排放。

为更直观地展示各影响因素之间的动态关系,通过影响因素机理分析图对化工行业碳排放系统中的各因素进行可视化描述,能够揭示经济、技术进步、市场需求以及供应链管理等因素之间的复杂相互作用,为制定有效的碳减排措施提供更加系统和全面的理论依据。通过系统动力学分析,其作用机理和相互关系如图 3 所示。

表 7 影响程度分析结果

年份	化工行业总耗能(Current)/ 万 t 标准煤	化工行业总耗能(固定 1)/ 万 t 标准煤	化工行业总耗能(固定 2)/ 万 t 标准煤	固定资产投资增加 1%影响程度/%	固定资产投资增加 2%影响程度/%
2010	1 397.20	1 396.81	1 396.43	-0.02	-0.000 55
2011	1 492.36	1 491.87	1 491.37	-0.03	-0.000 66
2012	1 554.34	1 553.84	1 553.34	-0.03	-0.000 64
2013	1 577.65	1 577.11	1 576.55	-0.03	-0.000 70
2014	1 568.23	1 567.64	1 567.05	-0.03	-0.000 75
2015	1 531.24	1 530.62	1 530.00	-0.04	-0.000 81
2016	1 456.08	1 455.43	1 454.77	-0.04	-0.000 90
2017	1 370.47	1 369.47	1 368.09	-0.07	-0.001 74
2018	1 253.94	1 253.22	1 252.50	-0.05	-0.001 15
2019	1 142.58	1 141.85	1 141.12	-0.06	-0.001 28
2020	1 184.05	1 136.86	1 136.35	-3.98	-0.040 29
2021	1 127.47	1 126.73	1 126.01	-0.06	-0.001 29

表 8 人均消费支出变化情景分析结果

年份	化工行业总耗能(Current)/ 万 t 标准煤	化工行业总耗能(人均消费 支出 1)/万 t 标准煤	化工行业总耗能(人均消费 支出 2)/万 t 标准煤	人均消费支出 1 (增加 1%)/%	人均消费支出 2 (增加 2%)/%
2010	1 397.20	1 405.09	1 412.82	0.56	1.11
2011	1 492.36	1 498.38	1 504.14	0.40	0.78
2012	1 554.34	1 557.79	1 560.92	0.22	0.42
2013	1 577.65	1 578.02	1 578.01	0.02	0.02
2014	1 568.23	1 564.76	1 560.88	-0.22	-0.46
2015	1 531.24	1 523.97	1 516.31	-0.47	-0.97
2016	1 456.08	1 444.94	1 433.51	-0.76	-1.55
2017	1 369.47	1 239.94	1 226.27	-9.45	-10.45
2018	1 253.94	1 125.92	1 124.62	-10.20	-10.31
2019	1 142.58	1 133.03	1 124.62	-0.83	-1.57
2020	1 184.05	1 162.92	1 162.92	-1.78	-1.78
2021	1 127.47	1 139.66	1 154.97	1.08	2.43

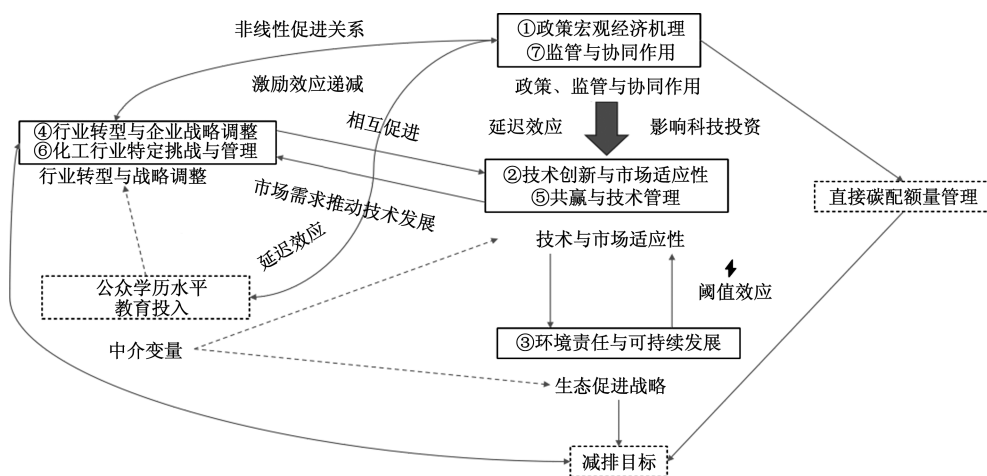


图 3 减排机理分析

### 3 结论与建议

人均消费的增加与化工行业碳排放呈正相关，即随着消费水平的提升，碳排放量随之增加。虽然固定资产投资的增加有助于技术升级和设备更新，但其对直接减少碳排放的效果有限，并且受到边际效应的制约。碳排放受到经济激励、技术进步、市场需求等多因素的动态交互影响。仿真结果表明，经济激励能够推动技术进步，降低碳排放强度；同时，市场对低碳产品的需求也促使企业加速采用绿色技术。因此，化工行业的低碳转型需要多因素协同，不能单一依赖某一因素。

针对研究结论提出以下建议：政府可以通过税收减免或补贴的方式，激励企业生产低碳产品，减少高碳产品的供应。实施绿色标签认证制度，引导消费者识别低碳商品，推广绿色消费文化。分析表明，单靠固定资产投资的增加不足以有效控制碳排放。因此，建议制定并推广碳排放交易体系，通过市场机制为高碳排放企业施加减排压力，同时为进

行低碳转型的企业提供经济激励。此外，鼓励地方政府与企业合作，开展低碳工业园区试点建设，以探索碳排放监控与技术升级同步推进的有效模式。

### 参考文献

- [1] 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 等. 中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 13-26.
- [2] 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.
- [3] 刘含笑, 吴黎明, 林青阳, 等. 碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用[J]. 化工进展, 2023, 42(5): 2201-2218.
- [4] 李乔楚, 陈军华. 集成系统动力学和清单算法的能源结构调整对碳排放影响研究: 以四川省为例[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(4): 1614-1622.
- [5] 田利军, 徐森雨. 基于系统动力学模型的中国民航脱碳路径研究[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(4): 454-464.
- [6] 赵路. 考虑政府补贴的供应链低碳减排策略研究[J]. 科

- 技和产业, 2024, 24(8): 97-101.
- [7] 丁玉龙, 秦尊文. 信息通信技术对绿色经济效率的影响: 基于面板 Tobit 模型的实证研究[J]. 学习与实践, 2021(4): 32-44.
- [8] 关伟, 高鑫, 许淑婷. 中国制造业行业能源效率测度及节能潜力分析[J]. 资源开发与市场, 2023, 39(10): 1264-1270.
- [9] 别晓东, 周德禄. 人力资本赋能经济低碳转型: 理论阐释与实证分析[J]. 山东社会科学, 2024(6): 28-38.
- [10] 张晶晶, 马小龙, 李扬. 新疆准东经济技术开发区二氧化碳排放现状与降碳对策研究[J]. 中国环境监测, 2023, 39(S1): 1-6.
- [11] 金智新, 曹孟涛, 王宏伟. “中等收入”与新“双控”背景下煤炭行业转型发展新机遇[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 45-58.
- [12] 韩泉城, 刘星雨, 孙浩, 等. 山东省交通运输碳排放测算及影响因素[J]. 科技和产业, 2024, 24(14): 260-265.

## Influencing Factors Analysis of Carbon Emission in Chemical Industry Based on System Dynamics

LU Yaning<sup>1,2</sup>, LIAO Cuiping<sup>2</sup>, ZHANG Yulong<sup>3</sup>

(1. College of Economic and Management, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;

2. Guangzhou Energy Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. School of Economics and Management, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** As China's emission reduction efforts continue to advance, the carbon emissions of the chemical industry have shown a gradual downward trend. However, the industry still faces challenges of high energy consumption and high carbon emissions in achieving the carbon neutrality goal. A system dynamics-based carbon emission model was constructed to simulate the carbon emissions of chemical sub-industries from 2010 to 2021. Dynamic effects of factors such as per capita consumption, fixed asset investment, and education level on carbon emissions were analyzed. The simulation results indicate that an increase in consumption levels may put pressure on carbon emissions, but significant reductions can be achieved through increased investment in fixed assets and promotion of green consumption behavior.

**Keywords:** chemical industry; system dynamics; carbon emission; simulation analysis; factor investigation