

文章编号:1000-4653(2025)02-0127-09

内河船舶营运碳排放强度预测方法研究

刘清^{1,2,3}, 聂凤铭², 王磊^{2,3}

1. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430000;
2. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430000;
3. 广东省内河港航产业研究有限公司, 广东 韶关 512000)

摘要:“公转水”是内陆运输减排路径之一,内河航运业的低碳减排受到广泛关注,内河船舶碳排放强度指标既能反映内河航运绿色化进程,也能一定程度上反映“公转水”效果,开展内河船舶碳排放强度预测也是制定内河航运新能源政策的基础。文章针对国内外前沿研究中探讨的内河航运业绿色转型问题,在分析内河船舶营运碳排放影响因素及其相互关系的基础上,运用系统动力学(SD)模型提出了内河船舶营运碳排放强度预测方法,并以长江集装箱船舶为案例验证对象,分析各情景下长江集装箱船舶碳排放强度变化趋势。论文结论显示:1)文章构建的内河船舶营运碳排放强度预测模型通过了有效性检验,能够较为真实地反映现实系统。2)提高船舶能效情景下,2030年和2060年碳排放强度相较于基准情景分别下降到94.04%、64.40%;优化能源结构情景下,与基准情景相比,2030年和2060年碳排放强度分别下降到92.62%、44.59%。3)在提高船舶能效措施、优化能源结构措施、加速淘汰船舶措施和征收碳税措施的多重作用下,2030年和2060年碳排放强度分别下降到同年基准情景的87.47%、29.35%。

关键词:内河;船舶营运;碳排放强度;系统动力学;预测

中图分类号:U698.7

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.016

Research on prediction method of carbon emission intensity for inland waterway vessel operations

LIU Qing^{1,2,3}, NIE Fengming², WANG Lei^{2,3}

1. State Key Laboratory of Waterway Traffic Control, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China;
2. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China;
3. Guangdong Inland Waterway Port and Maritime Industry Research Co., Shaoguan 512000, China)

Abstract: "The road to water" is one of the emission reduction pathways for inland transportation. The low carbon emission reduction of the inland waterway shipping industry has received widespread attention. The carbon emission intensity index is the core issue in the process of greening the inland waterway shipping industry. Developing a prediction model for the carbon emission intensity of inland vessels is the basis for formulating new energy policies for inland shipping. This paper discusses the green transformation of the inland waterway shipping industry, drawing on cutting-edge domestic and international research. First, it analyses the factors influencing inland waterway shipping carbon emissions and their interrelationships. Based on this analysis, a system dynamics model was used to construct a prediction method for carbon emission intensity. This method was then used to analyse the changing trend of carbon emission intensity for container vessels, using the Yangtze River as a case study under various scenarios. The results show that: i. The system dynamics

收稿日期:2024-01-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3001500);绿色智能内河船舶创新专项(2019(358))

作者简介:刘清(1966—),女,教授,博士,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:673633005@qq.com

通信作者:王磊(1986—),男,讲师,博士,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:w1175345973@whut.edu.cn

引用格式:刘清,聂凤铭,王磊.内河船舶营运碳排放强度预测方法研究[J].中国航海,2025,48(2):127-135.

LIU Q, NIE F M, WANG L. Research on prediction method of carbon emission intensity for inland waterway vessel operations[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 127-135. (in Chinese)

model for predicting carbon emission intensity in inland river operations is valid and reflects the real system more accurately. ii. Under the vessel energy efficiency improvement scenario, the carbon emission intensity decreases to 94.04% and 64.40% in 2030 and 2060 respectively, compared with the baseline scenario. iii. The carbon emission intensity in 2030 and 2060 decreases to 87.47% and 29.35% of the baseline scenario for the same year respectively when multiple measures are implemented to improve ship energy efficiency, optimise energy structure, accelerate the elimination of vessels, and levy a carbon tax.

Key words: inland river; vessel operation; carbon emission intensity; system dynamics; forecast

水路运输是交通运输体系中较为绿色的运输方式,近年来为加速内陆运输绿色低碳转型,“公转水”作为优化运输结构和实现内陆运输减排路径之一,使内河航运业的低碳绿色发展问题受到广泛关注。在内河航运绿色化进程中,碳排放强度是衡量航运业高质量低碳发展的重要指标,航运碳排放强度由于使用不同运输工作量计算方法和数据收集机制的限制,有多种表现形式^[1],合理定义碳排放强度及预测其在内河航运营过程中的变化规律,是合理制定内河航运新能源政策、实现绿色化营运的基础。内河船舶营运碳排放强度受到船舶技术条件、航运运输组织、经济社会发展水平、绿色航运政策等众多内、外部因素的影响,其发展变化具有复杂性。在系统考虑各影响因素及其相互关系的基础上,从行业角度提出内河船舶营运碳排放强度的预测方法,可为内河船舶营运碳排放强度变化规律的分析提供理论依据,在科学地进行航运碳减排决策方面具有重要的现实意义。

国内外学者对航运业碳排放问题都进行了广泛研究。HALIM等^[2]对2035年国际货运碳排放总量进行了基准情景预测,并对2035年全球海运脱碳障碍进行分析,且研究了相关减排政策。LEE等^[3]分析了亚洲经济一体化对海运碳排放的影响,在测算亚洲整体海运业碳排放总量的基础上,探究贸易自由化等因素对海运碳排放的影响。BOUMAN等^[4]通过量化各项航运减排措施的减排潜力,推论通过一系列组合措施的实施,到2050年有望实现全球海运碳排放总量减少75%以上。HAO等^[5]和邢辉等^[6]以中国航运为对象,估算了中国航运业的碳排放总量变化趋势,并对中国航运业碳减排提出了建议。孙婧^[7]和XING等^[8]均测算了中国国际海运的历史碳排放总量,前者认为货运量增加是海运碳排放上升的主要原因,新技术、新能源的推广会对海运碳排放有抑制作用,后者得到能源强度因子和货类结构是航运碳减排的强力驱动因素,以及实施组合减排政策可以实现碳减排目标的结论。电力^[9-11]、交通^[12-13]、金融^[14]等行业均广泛应用系统动力学(System Dynamics, SD),其中王玥玥^[10]和王伟德^[11]

利用SD模型预测不同情景下电力行业碳排放总量,并提出减排建议。陈影^[12]结合技术、营运、市场三种营运措施建立中国航运业低碳发展系统动力学模型,预测中国航运业碳排放总量变化趋势,并进行不同组合的政策模拟,提出政策建议。胡晓伟等^[13]以城市交通为对象,利用SD方法,对城市交通能耗与污染排放进行策略仿真,评估不同交通减排治理策略的实施效果。

综合前沿文献,航运碳排放研究多为海运,且海运碳排放研究集中于碳排放总量测算及变化趋势预测和碳排放研究模型的构建等方向,内河航运的研究比较缺乏,究其原因,一是海运受国外规则制约且我国远洋船队规模大,二是内河船型、航区等复杂难以统一量化,三是未来内河船舶节能场景不清晰,难以选择合适方法。

针对以往内河航运研究的不足,文章在剖析内河船舶营运碳排放影响因素的基础上,以SD理论为基础建立内河船舶营运碳排放预测SD模型,定性和定量地分析系统的内部结构,以长江集装箱营运船舶为例标定模型参数,预测各类减排措施下的碳排放强度变化趋势。

1 内河船舶营运碳排放来源与影响因素提取

内河船舶营运碳排放强度是指内河船舶在营运过程中生产单位货运总产值所排放的二氧化碳量。分析内河船舶营运过程中的碳排放来源并提取影响因素是建立系统动力学模型的基础。

内河船舶营运过程中的碳排放来源分为船舶主辅机的能源消耗和船员的生活消耗(制冷剂的使用和锅炉的热水生产)。内河航运的长距离运输需要大量的密集能源来保证,目前化石能源占据内河船舶营运能源结构的主要位置,随着内河航运业加速低碳转型,船舶向电动化、智能化方向发展,能源结构也将向绿色化、零碳化转变。

船舶是内河航运业的主体,船舶在货运活动过程中的能源消耗是产生碳排放的直接原因,船舶能耗量的大小和船舶应用的能源形式对航运业碳排放

的变化有重要影响。船舶的货运活动受到国家经济和航运规模的影响,国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)发展会引起货运量等航运规模的扩大,不可避免地导致能源消耗和碳排放量增多,但同时又会使船舶货运总产值增加。随着航运业新技术和新能源发展等政策的出台,船舶绿色技术和环境治理技术得到发展,高效、低能耗的先进船舶绿色技术通过降低主机能耗等直接减少航运业能源消耗,同时新能源的推广应用,可以提高新能源船舶在船舶总体中的占比,船舶能源结构、运力结构发生改变,引领内河航运走向绿色发展。

分析归纳获得船舶营运需求、船舶、政策三个类别的预测参数,如图1所示。

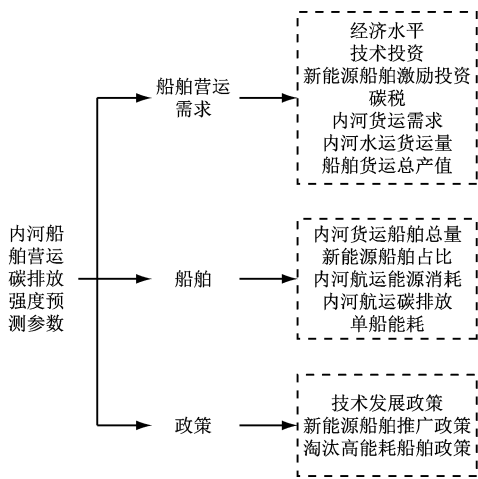


图1 内河船舶营运碳排放强度预测参数

Fig. 1 Predicted parameters for the carbon emissions intensity of inland vessels operations

2 内河船舶碳排放强度预测 SD 模型构建

内河船舶营运碳排放强度预测参数较多,且各参数之间存在相互联系和影响,使得内河船舶营运碳排放强度的预测较为复杂。SD方法采用定性与定量相结合的方法,能准确且完整地解释内河船舶碳排放系统中的所有变量,适合处理复杂的碳排放问题。该方法以现实系统为前提,根据历史数据和系统内在的结构关系构建动态模型,仿真模拟各影响因素可能引起的内河船舶碳排放系统变化。

根据SD方法的建模流程,建立内河船舶营运碳排放强度预测SD模型的步骤为:1)确定内河船舶碳排放系统的边界;2)分析内河船舶碳排放系统结构,根据系统影响因素之间的因果关系,建立系统反馈机制;3)构建系统流图并编写模型方程;4)检验和评估模型;5)依据模型对碳排放强度进行

预测。

2.1 系统边界

根据SD的建模流程,首先确定系统边界,船舶碳排放系统是一个高阶次、多回路且内部复杂的非线性系统,涉及多个影响因素,要将所有因素考虑在内具有很大难度,因此本文只考虑代表性因素进行分析建模。所以对模型进行如下假设。

- 1) 模型研究期内,我国经济态势良好,不考虑疫情防控或其他不可控因素的影响。
- 2) 只考虑船舶主机能耗,不考虑辅机。
- 3) 船舶能源形式考虑柴油、汽油、轻燃油、甲醇、液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)、零碳燃料,其中零碳燃料包含氢燃料、可再生能源、纯电动等。

通过分析和提取内河船舶营运碳排放强度影响因素,将船舶碳排放系统分为三个子系统,各子系统及主要影响因素如下。

- 1) 船舶营运需求子系统:经济水平、技术投资、新能源船舶激励投资、碳税、内河货运需求、内河水运货运量、船舶货运总产值。
- 2) 船舶子系统:内河货运船舶总量、新能源船舶占比、内河航运能源消耗、内河航运碳排放、单船能耗。
- 3) 政策子系统:技术发展政策、新能源船舶推广政策、淘汰老旧船舶政策。

2.2 因果关系图

采用因果关系图呈现内河船舶营运碳排放强度影响因素之间的相互作用和反馈途径,能直观地描述内河船舶碳排放系统,清楚地反映子系统内部各影响因素之间的关系,是构建系统流图的基础。船舶碳排放系统因果关系图,如图2所示。

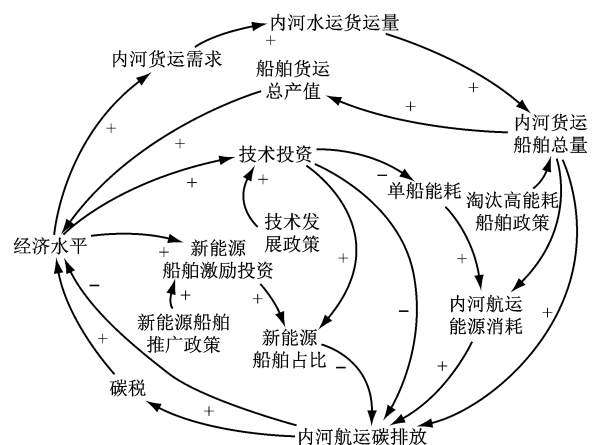


图2 船舶碳排放系统因果关系图

Fig. 2 Causal relationship diagram of vessel carbon emission system

经济是航运发展的重要驱动力,经济水平的上升推动内河航运加速发展,使内河货运需求增加,同时使船舶减排技术投资和环境治理投资增加,推动能源结构转型、降低船舶能耗和直接减少空气中的碳排放量。然而航运快速发展的同时,航运业能源消耗也急剧增加,加剧内河航运碳排放。长远来看,内河航运业碳排放的增加会导致环境污染加剧,进而会对经济水平产生负面影响。

2.3 模型流图

在系统因果关系图的基础之上,建立内河船舶

碳排放系统流图,详细地分析模型变量,显示不同性质变量间的区别,能清晰地描述内河船舶碳排放系统的积累效应。

模型流图包含 49 个变量。其中,GDP、碳排放总量和船舶总量共 3 个状态变量,GDP 增长量、船舶增长量和碳排放增加量等 6 个速率变量,14 个常量,26 个辅助变量。船舶碳排放系统模型流图,如图 3 所示。

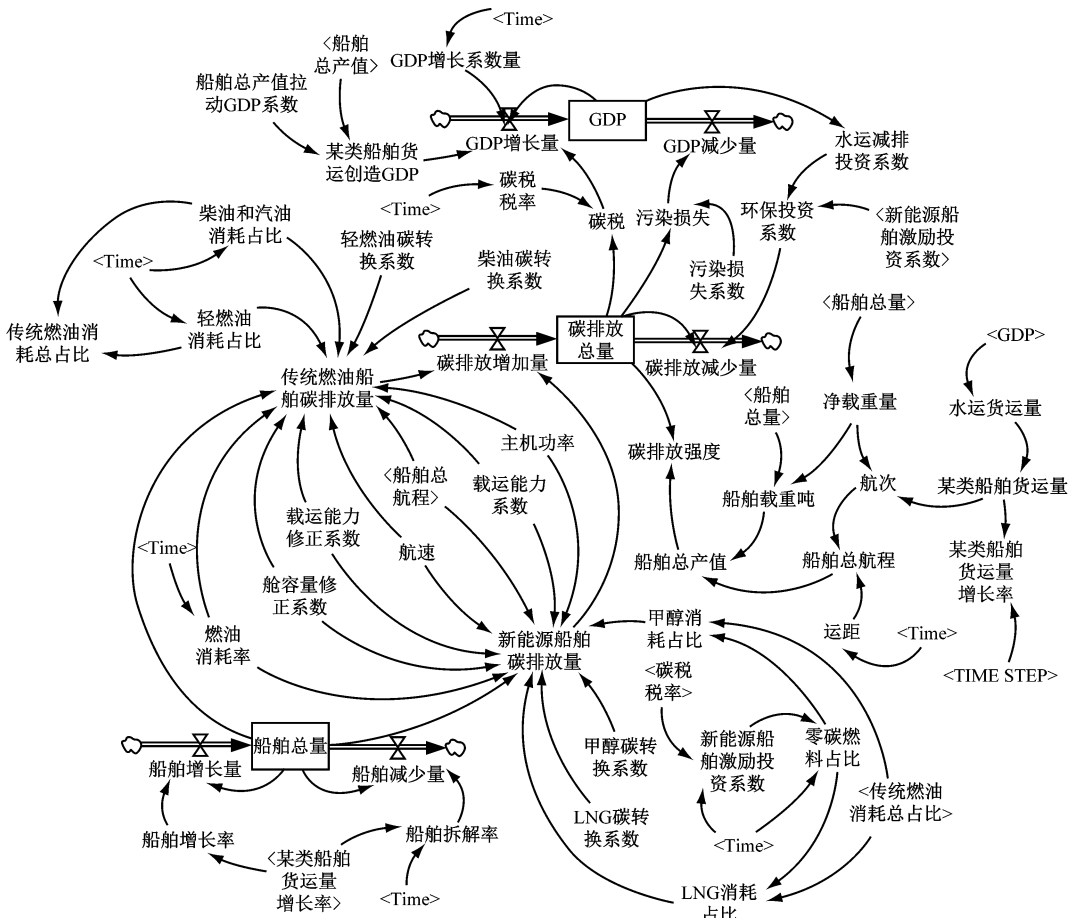


图3 船舶碳排放系统动力学模型流图

Fig. 3 Flow diagram of vessel carbon emission system dynamic model

2.4 参数相互关系的量化

2.4.1 主要方程

内河船舶碳排放系统动力学模型中,各变量之间通过构建正确的方程来连接。通过以下三种方式构建方程,一是借助回归分析构建回归方程;二是参考权威报告、统计年鉴或专业论文;三是通过变量之间的数学关系进行推导。由于方程太多,本文只展示出主要方程,如表 1 所示。

2.4.2 重要方程推导

本文以船舶能效设计指数公式为基础,对公式进行变形和展开推导得到碳排放强度和碳排放总量的计算公式,是所建立模型中的核心方程,也是使用 SD 模型预测碳排放强度的基础。

船舶能效设计指数公式如式(1)所示。式(1)及其变量相关解释均来源于中国船级社《内河绿色船舶规范 2020》。

表1 模型主要方程
Tab.1 Main equation of model

方程	单位
GDP = INTEG(GDP 增长量 - GDP 减少量, 初始值)	亿元
GDP 增长量 = GDP × GDP 增长系数 + 碳税 + 集装箱货运创造 GDP	亿元
GDP 减少量 = SMOOTH3(污染损失, 3)	亿元
碳税 = 碳排放总量 × 碳税税率	亿元
船舶总量 = INTEG(船舶增长量 - 船舶减少量, 初始值)	艘
船舶增长量 = INTEGER(船舶总量 × 船舶增长率)	艘
船舶减少量 = INTEGER(船舶总量 × 船舶拆解率)	艘
集装箱货运量增长率 = 集装箱货运量/DELAY1(集装箱货运量, TIMESTEP)	
船舶总产值 = 船舶载重吨 × 船舶总航程	万吨 · 海里
碳排放总量 = INTEG(碳排放增加量 - 碳排放减少量, 初始值)	万吨
传统燃油船舶碳排放量 = (柴油和汽油碳转换系数 × 柴油和汽油消耗占比 + 轻燃油碳转换系数 × 轻燃油消耗占比) × 主机功率 × 燃油消耗率 S_{FC} × 船舶总航程 × 船舶总量 × 10^{-10} / (舱容量修正系数 f_c × 载运能力修正系数 f_i × 载运能力系数 $C_{capacity}$ × 航速 v_{ref})	万吨
新能源船舶碳排放量 = (LNG 碳转换系数 × LNG 消耗占比 + 甲醇碳转换系数 × 甲醇消耗占比) × 主机功率 × 燃油消耗率 S_{FC} × 船舶总航程 × 船舶总量 × 10^{-10} / (舱容量修正系数 f_c × 载运能力修正系数 f_i × 载运能力系数 $C_{capacity}$ × 航速 v_{ref})	万吨
碳排放增加量 = 传统燃油船舶碳排放量 + 新能源船舶碳排放量	万吨
碳排放减少量 = 碳排放总量 × 环保投资系数	万吨
某类船舶货运创造 GDP = 船舶总产值拉动 GDP 系数 × 船舶总产值	亿元
污染损失量 = 碳排放总量 × 污染损失系数	亿元
航次 = 某类船舶货运量/净载重量	次
船舶总航程 = 航次 × 运距 × 0.54	海里
船舶载重吨 = 净载重量 + 船舶总量 × 0.14	万吨
碳排放强度 = 碳排放总量 × 10^4 / 船舶总产值	吨/万吨 · 海里

表1中, DELAY1 为系统动力学中的延迟函数。

$$I_{EEDI} = \left[f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot (S_{FC, YME(i)} \cdot C_{FME(i)} + S_{FC, QME(i)} \cdot C_{FME(i)}) + \sum_{i=1}^{n_{AE}} P_{AE(i)} \cdot (S_{FC, YAE(i)} \cdot C_{FAE(i)} + S_{FC, QAE(i)} \cdot C_{FAE(i)}) - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot S_{FC, ME(i)} \cdot C_{FME(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)} \cdot S_{FC, AE} \cdot C_{FAE} \right] / (f_i \cdot f_c \cdot C_{capacity} \cdot v_{ref}) \quad (1)$$

式(1)中, f_j 为主推进装置功率修正系数; $S_{FC, ME(i)}$ 为船舶主机在单位时间、单位功率下的燃油消耗量; $S_{FC, AE}$ 为船舶辅机在单位时间、单位功率下的燃油消耗量; C_{FAE} 为船舶辅机的碳转换系数; n_{ME} 为主机台

数; $P_{ME(i)}$ 为第 i 台主机功率的值; $S_{FC, YAE(i)}$ 为第 i 台主机在 75% 额定功率下的燃油消耗率, 对单一气体燃料发动机此值为 0; $C_{FME(i)}$ 为第 i 台主机所用燃料的 CO_2 转换系数; $S_{FC, QME(i)}$ 为第 i 台主机在 75% 额定功率下的气体燃料消耗率, 对单一燃油发动机此值为 0; n_{AE} 为在网辅机台数; $P_{AE(i)}$ 为船舶辅机功率的值; $S_{FC, YAE(i)}$ 为相对应的辅机的燃油消耗率, 对单一气体燃料辅机此值为 0; $S_{FC, QAE(i)}$ 为辅机的气体燃料消耗率, 对单一燃油辅机此值为 0; $C_{FAE(i)}$ 为第 i 台辅机所用燃油料的 CO_2 转换系数; n_{eff} 为船舶所采用的新能源、新技术的种数; $f_{eff(i)}$ 为第 i 种新能源、新技术的可获得性; $P_{eff(i)}$ 为由于采用第 i 种能效创新技术而减少的主机功率; $P_{AEeff(i)}$ 由于采用第 i 种电力能效技术而产生的船舶电站功率可以减少的辅机功率; f_i 为载运能力 Capacity 修正系数; f_c 舱容量修正

系数; C_{capacity} 为载运能力; v_{ref} 为航速。

根据船舶能效设计指数公式(1)得到单船碳排放量公式如式(2)所示。

$$i = I_{\text{EEDI}} \cdot D_{\text{WT}} \cdot S \quad (2)$$

式(2)中, i 为单船碳排放量, D_{WT} 代表船舶载重吨, S 为船舶总航程。

船型会影响载运能力系数的选取,船舶使用的燃油类型也会影响二氧化碳转换系数 $C_{\text{F}(j)}$ 的选取,所以本文将船舶按照船型 a 、燃油类型 j 分类得到船舶碳排放总量公式如式(3)所示。

$$i_{(a)} = \sum_j \frac{\sum P \cdot S_{\text{FC}} \cdot C_{\text{F}(j)}}{f_i \cdot f_c \cdot C_{\text{capacity}} \cdot v_{\text{ref}}} \cdot D_{\text{WT}} \cdot S \cdot Q \cdot \theta_{(j)} \quad (3)$$

式(3)中, $i_{(a)}$ 为某船型碳排放总量, P 为主机功率, S_{FC} 为燃油消耗率, $C_{\text{F}(j)}$ 为二氧化碳转换系数, f_i 为载运能力修正系数, f_c 为舱容量修正系数, C_{capacity} 为载运能力, v_{ref} 为航速, Q 为该船型的船舶总量, $\theta_{(j)}$ 为某类型燃油消耗占比。

其中, C_{capacity} 为载运能力系数 β 与载重量 D_{WT} 的乘积,如式(4)所示,代入式(3)中得到某船型碳排放总量公式,如式(5)所示。

$$C_{\text{capacity}} = \beta \cdot D_{\text{WT}} \quad (4)$$

$$i_{(a)} = \sum_j \frac{\sum P \cdot S_{\text{FC}} \cdot C_{\text{F}(j)}}{f_i \cdot f_c \cdot \beta \cdot v_{\text{ref}}} \cdot S \cdot Q \cdot \theta_{(j)} \quad (5)$$

以集装箱船舶为例, f_c 为1, f_i 为1, β 为0.7,集装箱船舶碳排放总量公式如式(6)所示。

$$i_{(\text{container})} = \sum_j \frac{\sum P \cdot S_{\text{FC}} \cdot C_{\text{F}(j)}}{0.7 \times v_{\text{ref}}} \cdot S \cdot Q \cdot \theta_{(j)} \quad (6)$$

将所有船型的碳排放总量求和得到船舶碳排放总量公式如式(7)所示。船舶总产值公式如式(8)所示。总体船舶碳排放强度公式如式(9)所示。

$$I = \sum_a i_{(a)} \quad (7)$$

$$G_{\text{DP,ship}} = \sum_Q D_{\text{WT}} \cdot S \quad (8)$$

$$I_{\text{ship}} = \frac{I}{G_{\text{DP,ship}}} \quad (9)$$

式(7)(8)(9)中, I 为船舶碳排放总量; $G_{\text{DP,ship}}$ 为船舶货运总产值; I_{ship} 为船舶营运碳排放强度。

3 实例分析

选取长江集装箱船舶为实例对所建立的内河船舶碳排放系统动力学模型进行检验及后续预测。

3.1 参数估计

选取长江2014年~2022年集装箱船舶统计数据仿真模拟和有效性检验。模型中的统计数据来源于《长江航运发展报告》《内河绿色船舶规范2020》、长江干线11省市统计年鉴,模型中参数初始值,见表2。

表2 模型参数初始值

Tab.2 Initial values of model parameters

参数	取值	单位	参数	取值	单位
碳排放总量初始值	136.627	万吨	f_i	1.0	
GDP初始值	289.165	亿元	f_c	1.0	
船舶总量初值	317	艘	v_{ref}	7.99	节
碳税税率	0	亿元/万吨	载运能力系数	0.7	
柴油和汽油转换系数	3.206	吨二氧化碳/吨物质	燃油消耗率	400	克/千瓦时
轻燃油转换系数	3.151	吨二氧化碳/吨物质	主机功率	1200	千瓦
甲醇转换系数	1.375	吨二氧化碳/吨物质	污染损失系数	1.528×10^{-5}	亿元/万吨
LNG转换系数	2.750	吨二氧化碳/吨物质	船舶总产值拉动GDP系数	0.38×10^{-5}	亿元/万吨·海里

3.2 模型检验

为了研究模型的适用性、模型与现实系统的一致性。采用量纲一致性检验、极端条件检验和行为适合性检验3种检验方式对模型进行有效性检验。

量纲一致性检验保证方程式前后量纲一致,检验模型结构的合理性,在Vensim软件中运行显示

通过。

极端条件检验显示在极端条件下模型行为是否合理。采用GDP增长系数为零和运力为零两个极端条件,检验结果分别如图4a、图4b所示,图4a中实线表示碳排放总量变化趋势,虚线表示船舶总量变化趋势,可知在GDP增长系数为零条件下,碳排

放总量和船舶总量均呈现持续下降趋势;图4b中实线表示碳排放总量变化趋势,虚线表示GDP变化趋势,图4b显示在运力为零的极端条件下,碳排放总

量为零,GDP有小幅度下降。检验结果显示,在极端条件下模型行为合理,模型信度提升。

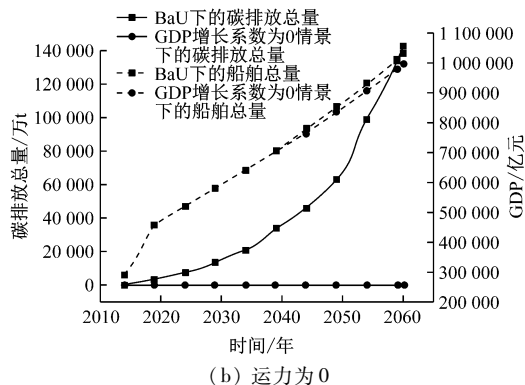
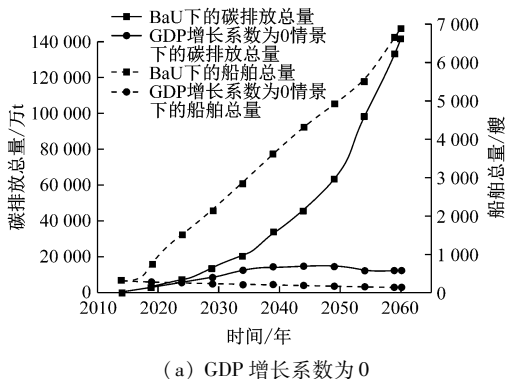


图4 极端条件检验

Fig. 4 Extreme condition test

行为适合性检验又称为参数灵敏度检验,检验模型行为模式是否因为某些参数的微小变动而改变。通过时间步长变动时相关变量的敏感程度来体现,检验结果,如图5所示。各情况下碳排放总量和碳排放强度的变化总体趋势未发生改变,时间步长

为0.5年时,碳排放总量和碳排放强度变动百分比平均值分别为12.60%、8.73%;时间步长为0.25年时,各参数变动百分比平均值为24.43%、14.97%。结果显示参数在合理范围内变动时,模型行为模式也在合理范围内变动。

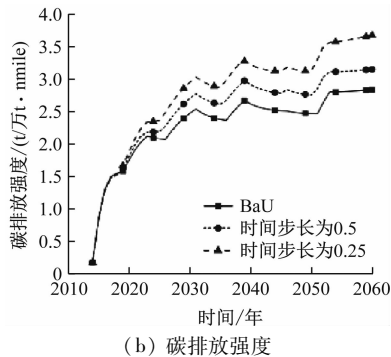
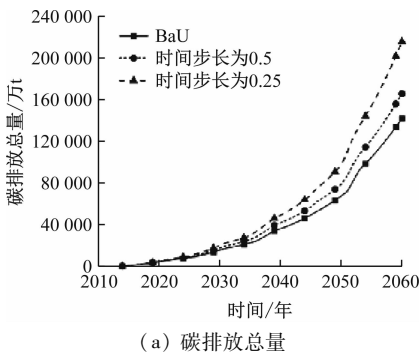


图5 行为适合性检验

Fig. 5 Behavioral fitness test

各检验运行量化结果与定性一致,模型通过检验,能较为真实地反映现实系统,可用于后续预测。

3.3 预测结果分析

本文基于情景分析法对长江集装箱船舶营运碳排放强度的变化趋势进行预测和分析。参考目前燃油船舶现状和颜明东等^[15]的研究,对提高船舶能效(Improve Ship energy Efficiency, IEE)情景进行参数设置;结合集装箱船舶营运现状和张梦瑶^[16]对市场运力的研究,对加速淘汰老旧船舶(Accelerate the Elimination of Old Ships, AES)情景进行参数设置;从航运业碳税机制实施现状出发,结合研究对开始征收碳税(Carbon Tax, CT)情景进行参数设置;根据长江船舶绿色发展路线框架设置优化能源结构(Optimize the Energy Structure, OES)情景参数,如表

3所示。

设置预测初始时间为2023年,结束时间为2060年,时间步长为1年。

在Vensim软件中调整相关变量,仿真预测4种单一减排措施情境下长江集装箱船舶碳排放强度变化趋势,如图6所示。

图6中显示,基准情景BaU下碳排放强度呈波动持续上升;AES情景和CT情景下碳排放强度相较于基准情景略微下降;IEE情景下,碳排放强度在2031年达到峰值,2030年和2060年碳排放强度分别下降到基准情景同年的94.04%、64.40%;OES情景下,碳排放强度在2031年达到最大值,之后呈现快速波动下降趋势,相较于基准情景,2030年和2060年碳排放强度分别下降到92.62%、44.59%。

表3 船舶减排措施情景设置

Tab.3 Scenario of vessel emission reduction measures

情景	简称	内容
基准情景	BaU	无措施干预
提高船舶能效	IEE	燃油消耗率逐年以1%的速率下降至200克/千瓦时后不变
加速淘汰老旧船舶	AES	将船舶拆解率提高至6%
开始征收碳税	CT	2030年开始征收碳税为30元/吨
优化能源结构	OES	柴油、轻燃油等化石能源消耗比例逐年降低至2060年消耗为零 2023年~2035年进行低碳和零碳燃料的研发试点和示范工作 2035年之后推广应用低碳和零碳燃料,至2060年应用占比达到100%

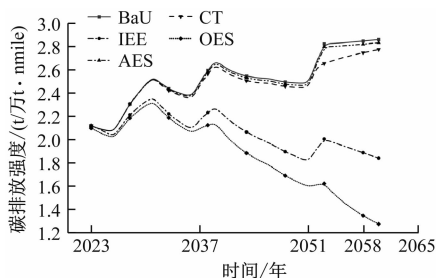


图6 单一措施情景下长江集装箱船舶碳排放强度变化趋势

Fig.6 Variation trend of carbon emission intensity of container vessels in the Yangtze River under single measure scenario

根据4种单一措施的减排效果,设置5种组合措施方案,变化趋势,如图7所示。

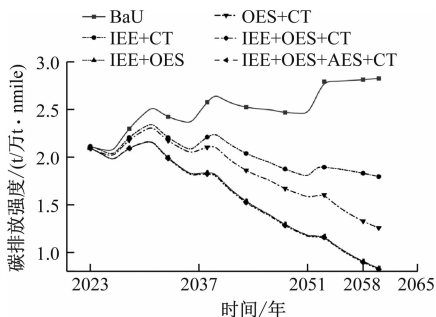


图7 组合措施情景下长江集装箱船舶碳排放强度变化趋势

Fig.7 Variation trend of carbon emission intensity of container vessels in the Yangtze River under combined measures scenario

如图7仿真结果显示,实施组合措施的减排效果相比于单一措施更加显著,各组合情景均在2031年达到峰值。IEE+CT情景下,2030年和2060年碳排放强度分别下降到基准情景84.18%、63.64%;OES+CT情景下,2030年和2060年碳排放强度下降到基准情景同年的92.76%、44.62%;IEE+OES、IEE+OES+CT、IEE+OES+AES+CT

三个情景下碳排放强度预测趋势较为一致,其中IEE+AES+OES+CT情景下的减排效果最为显著,相较于基准情景,碳排放强度分别于2030年和2060年下降到87.47%、29.35%。

4 结束语

在碳达峰碳中和目标的指引下,本文分析内河航运碳排放强度影响因素,应用系统动力学的方法,建立了内河航运碳排放系统动力学仿真模型,模拟并预测了长江集装箱船舶2023年~2060年碳排放强度的变化趋势。取得的研究成果如下。

1) 从船舶营运需求、船舶、政策三个方面提取了内河船舶营运碳排放强度影响因素,构建内河船舶碳排放系统动力学模型,揭示系统内部的反馈和作用机理。

2) 以长江集装箱船舶为案例对象,对系统动力学模型进行有效性检验,检验结果与定性分析一致,认为该模型有效可行,能够真实地反映现实情况。

3) 单一措施情景下,对长江集装箱船舶2023年~2060年碳排放强度进行预测研究发现,基准情景下碳排放强度持续上升;在提高船舶能效情景下碳排放强度在2031年达到峰值,在2060年下降到同年基准情景的64.40%;在优化能源结构情景下,2031年碳排放强度达峰,在2060年下降到同年基准情景的44.59%,减排效果较显著。

4) 各组合措施情景下,长江集装箱船舶碳排放强度均有明显降低,碳排放强度均呈现2031年达峰后波动下降的趋势。其中,IEE+OES+AES+CT情景下包含提高船舶能效措施、优化能源结构措施、加速淘汰老旧船舶措施和征收碳税措施的组合作用,减排效果最为显著,与基准情景同年相比,2030年与2060年碳排放强度均分别下降到87.47%、29.35%。

参 考 文 献

- [1] 薛树业. 国际航运碳强度指标综述[J]. 世界海运, 2022,45(3):20-27.
XUE S Y. Summary of carbon intensity index of international shipping[J]. World Shipping, 2022,45(3):20-27. (in Chinese)
- [2] HALIM R A, KIRSTEIN L, MERK O, et al. Decarbonization pathways for international maritime transport: a model-based policy impact assessment[J]. Sustainability, 2018,10(7):2243.
- [3] LEE T C, LAM J S L, LEE P T W. Asian economic integration and maritime CO₂ emissions [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016,43:226-237.
- [4] BOUMAN E A, LINDSTAD E, RIALLAND A I, et al. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping—a review [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017,52:408-421.
- [5] HAO H, GENG Y, OU X M. Estimating CO₂ emissions from water transportation of freight in China [J]. International Journal of Shipping and Transport Logistics, 2015,7(6):676-694.
- [6] 邢辉, 段树林, 黄连忠, 等. 中国水路运输业能源消耗与废气排放测算[J]. 中国环境科学, 2016,36(6):1913-1920.
XING H, DUAN S L, HUANG L Z, et al. Estimation of energy consumption and exhaust emissions for waterborne transportation sector in China [J]. China Environmental Science, 2016,36(6):1913-1920. (in Chinese)
- [7] 孙婧. 中国出口货物海运碳排放的测度及影响因素实证分析[D]. 南昌:江西财经大学, 2014.
SUN J. The measurement of maritime carbon emissions of China's export goods and empirical analysis of influential factors[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2014. (in Chinese)
- [8] XING Y W, YANG H L, MA X F, et al. Optimization of ship speed and fleet deployment under carbon emissions policies for container shipping[J]. Transport, 2019,34(3):260-274.
- [9] 陈文淑乐, 向月, 彭光博, 等. “双碳”目标下电力系统供给侧形态发展系统动力学建模与分析[J]. 上海交通大学学报, 2021,55(12):1567-1576.
CHEN W X L, XIANG Y, PENG G B, et al. System dynamic modeling and analysis of power system supply side morphological development with dual carbon targets [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019,55(12):1567-1576. (in Chinese)
- [10] 王玥玥. 基于系统动力学的电力行业碳排放预测研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
WANG Y Y. Carbon emission of power industry prediction research based on system dynamics [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)
- [11] 王伟德. 基于系统动力学的新疆热电行业碳排放预测研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2018.
WANG W D. Research on carbon emissions forecast of Xinjiang thermoelectric industry based on system dynamics[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018. (in Chinese)
- [12] 陈影. 国际碳减排机制下我国海运业低碳发展 SD 模型[D]. 大连:大连海事大学, 2015.
CHEN Y. Low carbon development SD model of Chinese shipping industry under international carbon reduction mechanism[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese)
- [13] 胡晓伟, 包家烁, 安实, 等. 碳达峰下城市交通运输减排治理策略研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021,21(6):244-256.
HU X W, BAO J S, AN S, et al. Urban transportation emission reduction governance strategies under peak carbon dioxide emissions [J]. Transportation Systems Engineering and Information, 2021,21(6):244-256. (in Chinese)
- [14] 朱帮助, 唐隽捷, 江民星, 等. 基于系统动力学的碳市场风险模拟与调控研究[J]. 系统工程理论与实践, 2022,42(7):1859-1872.
ZHU B Z, TANG J J, JIANG M X, et al. Simulation and regulation of carbon market risk based on system dynamics [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2022,42(7):1859-1872. (in Chinese)
- [15] 颜明东, 胡旭程, 周颖. 船舶在港岸基供电对节能减排的影响[J]. 机电设备, 2023,40(1):4-7.
YAN M D, HU X C, ZHOU Y. Influence of ship shore-based power supply on energy conservation and emission reduction [J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2023,40(1):4-7. (in Chinese)
- [16] 张梦瑶. 基于系统动力学的干散货航运市场研究[D]. 大连:大连海事大学, 2017.
ZHANG M Y. The research on the bulk shipping market based on the system dynamics [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. (in Chinese)