

文章编号:1000-4653(2025)02-0136-08

基于系统动力学的广东省内河航运绿色发展策略分析

李佳航¹, 马爱兴^{1,2}, 曹民雄^{1,2}, 邓涯^{1,2}, 胡颖^{1,2}, 郑景琦¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024;

2. 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 航运绿色发展是内河航运高质量发展的重要基础,通过分析广东经济、航运、能源和环境间的关系,运用系统动力学方法构建广东内河绿色航运系统模型并进行情景仿真,分析不同绿色情景对广东内河航运能耗和污染物排放的作用效果。结果表明:至2030年,降低运输工具单位能耗对航运业绿色效果优于能源结构;组合情景绿色效果优于单一情景,内河航运系统组合情景两种方案的节能效果分别为18.25%和36.39%;减排效果分别22.42%和50.93%;内河航运系统船舶转用低硫油情景平均降低大气污染物SO₂和NO_x的排放量约4.93万吨和6.05万吨。长期来看,广东内河航运绿色发展可基于优化产业结构,从改变能源结构、技术手段等多种策略综合实施。

关键词: 绿色航运;内河航运;系统动力学;情景仿真

中图分类号:F552.7 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.017

Analysis of green development strategy for inland navigation in Guangdong Province based on system dynamics

LI Jiahang¹, MA Aixing^{1,2}, CAO Minxiong^{1,2}, DENG Ya^{1,2}, HU Ying^{1,2}, ZHENG Jingqi¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Port,

Waterway & Sedimentation Engineering Ministry of Communications, Nanjing 210029, China)

Abstract: The green development of shipping is an important foundation for the high-quality development of inland shipping. By analysing the relationship between Guangdong's economy, shipping, energy and the environment, a model of the Guangdong inland green shipping system was constructed using the system dynamics method. Scenarios were simulated and the effect of different green scenarios on the energy consumption and pollutant emissions of Guangdong inland shipping was analysed. The results show that, by 2030, reducing the energy consumption of transport vehicles will have a greater positive impact on the shipping industry than changing the energy structure. The green effect of the combined scenario was better than that of the single scenario, with an energy-saving effect of 18.25% and 36.39% respectively for the inland navigation system. The emission reduction effect was 22.42% and 50.93% respectively. Switching to low-sulphur oil for inland shipping system ships would reduce air pollutant emissions (SO₂ and NO_x) by an average of around 49 300 and 60 500 tonnes, respectively. In the long term, green development in Guangdong's inland shipping sector can be based on optimising the industrial structure and implementing various strategies, such as changing the energy structure and technical means.

Key words: green shipping; inland water transport; system dynamics; scenario simulation

收稿日期:2024-01-24

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3200403);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y220011;Y221013;Y222011)

作者简介:李佳航(1998—),女,硕士研究生,研究方向为内河绿色航运政策分析与仿真。E-mail:1196022257@qq.com

通信作者:马爱兴(1982—),男,正高级工程师,博士,研究方向为内河水运工程研究。E-mail:axma@nhri.cn

引用格式:李佳航,马爱兴,曹民雄,等.基于系统动力学的广东省内河航运绿色发展策略分析[J].中国航海,2025,48(2):136-143.

LI J H, MA A X, CAO M X, et al. Analysis of green development strategy for inland navigation in Guangdong Province based on system dynamics[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 136-143. (in Chinese)

2019年9月,《交通强国建设纲要》提出构建安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化综合交通体系。内河航运作为一种低成本交通运输方式,在经济发展中起着重要的作用。作为内河航运交通大省,广东省陆续出台《广东省航道发展规划》《广东省内河航运能力提升实施方案》等,以提升内河航运能力,推动内河航运业发展。随着航运能耗和环境污染日益增加,国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)研究报告显示,如果不采取任何措施,全球航运碳排放将增至2018年全球航运碳排放量的100%~140%^[1]。因此,绿色航运受到各个国家和相关行业的关注。

国内外学者对绿色航运措施进行了大量研究。PATRICKSSON等^[2]以2 000 TEU集装箱船为例,采用Xpress-MP软件确定最优船用柴油机配置。HU等^[3]考虑航运减排措施间的相关性,采用边际减排成本曲线对措施进行比较和优选。吴俊妮等^[4]分析使用岸电对环境和经济效益的影响,得出使用岸电设施会大幅降低碳排放,具有很好的环境效益。杨顺益等^[5]构建以生态港口和航道以及新型船舶制造为核心,以行业标准、环境监测网和科学研究为支撑的一套完整的绿色航运体系。鄢佳聪等^[6]从系统的角度构建水运与国内国际双循环的因果关系模型,得出扩大水运投入政策、绿色环保政策及均衡发展政策下均能较为显著地促进水运国内国际双循环。

系统动力学最初由Forrester教授在1956年提出^[7],是研究动态的、非线性的、具有多因果反馈回路的复杂系统^[8]。孙久文等^[9]构建了包含水环境、经济、人口等多个子系统的系统动力学模型,模拟了黄河流域各省份的水资源供需状况。胡晓伟等^[10]利用系统动力学方法建立城市交通减排治理决策模型,以哈尔滨市为例进行策略仿真。文元桥等^[11]基于系统动力学,对不同情景区域船舶废气排放的航运收益变化趋势进行预测。郭振峰等^[12]分析港城互动构建绿色低碳港口城市系统结构,结果显示调整城市产业结构并辅以减排措施,可以实现港城经济发展与绿色低碳建设目标。

综上,现有文献对绿色航运研究已有一定成果。在此基础上,本文从系统动力学角度出发,分析城市经济、产业结构、航运货运需求、港口吞吐量、环保水平等政策变量对广东内河航运的影响,构建广东内河绿色航运系统模型并仿真模拟,从产业结构、清洁能源、船舶单耗等角度考虑如何减轻广东内河航运大气污染,以便对广东未来内河航运规划考虑航运

业绿色发展提供一定支撑,并为广东内河航运高质量发展提供一定的科学依据。

1 系统动力学模型构建

1.1 研究区域

广东省是我国的经济和运输大省,2021年广东省国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)约为12万亿元,占全国GDP比重超过10%,交通运输业占全国交通运输业比重约10%。2021年全省水货运周转量24 688.52亿吨公里,占全省综合交通运输体系货物周转量的87%,其中内河运输承担了水陆交通运输周转量的24%。在交通运输工具中,公路、铁路、水运每千公里运输周转量能耗比是6.9:1.5:1^[13],内河航运具有运量大、能耗低、污染小等特点,但伴随着内河航运业需求快速增长,其能源消耗和污染物排放也在快速增长。提升内河航运能力、推动内河航运绿色发展,是广东交通运输系统发力“碳达峰、碳中和”的重要方向。本文拟以广东省为研究对象,运用系统动力学模型,对广东经济、航运、能源和环境间的关系进行模拟分析。

1.2 系统边界

为构建内河绿色航运系统模型,首先确立经济、航运、能源和环境四个子系统作为系统边界,其中经济与航运子系统为输出系统,能源与环境子系统为考察目标的输出系统和成效的表现形式^[14],形成如图1所示的耦合作用分析框架。经济子系统包括GDP、产业结构、环保投入、环境污染损失等;航运子系统包括交通货物周转量、航运货物周转量、港口吞吐量等;能源子系统包括能源结构、能源消耗量等;环境子系统包括CO₂排放量、SO₂排放量、NO_x排放量等。各子系统间相互作用从而实现内河绿色航运系统的平衡,城市经济发展推动交通运输行业,进而

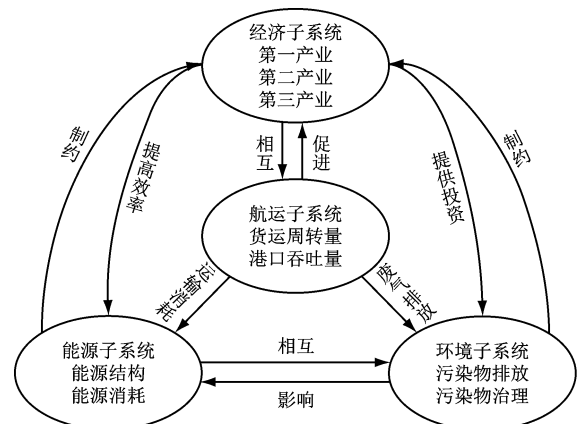


图1 各系统间的耦合关系

Fig. 1 Coupling diagram between systems

态变量、速率变量、辅助变量等要素,包括3个状态变量和5个速率变量,共63个指标。涉及的重要变量包括GDP、货物周转量、航运货物周转量、内河航运货物周转量、各类运输工具能耗、各类污染物排放量、环境污染造成的经济损失、不同运输工具对污染气体排放量的影响系数及所占比重等。

2 参数确定与模型检验

本文使用Vensim-PLE软件进行模型仿真,模型运行以2012年和2030年为起始年和终止年,仿真时间间隔为1年。其中,2012年~2021年为检验年

限,可根据实际情况对模型进行修正和调试;2022年~2030年为系统政策仿真的预测年限,模拟广东内河航运未来几年节能减排趋势。

2.1 系统模型主要方程与参数

经过系统因果分析和建立系统动力学流图后,需对系统各变量建立方程和输入初始值。数据来源于《广东统计年鉴》《中国港口年鉴》和相关航运规划以及政府官网等。依据系统流图,系统中的主要方程,如表1所示。对于部分年份缺失或者统计口径不一致的数据,根据相关文献采用数学计算法、公式推导法、回归分析法、专家估计法等推导生成。

表1 内河航运系统模型主要方程

Tab.1 Inland water transport system model main equations

变量	方程	单位
GDP	INTEG(GDP增加量 - GDP阻碍量, GDP初始值)	亿元
交通运输业投入	GDP · 交通运输业投入系数(Time, 表函数)	亿元
货物周转量	EXP[第一产业货运生成系数 · ln(第一产业GDP) + 第二产业货运生成系数 · ln(第二产业GDP) + 第三产业货运生成系数 · ln(第三产业GDP) + 6.659]	万吨
航运货物周转量	货物周转量 · 航运分担系数(Time, 表函数)	万吨
内河航运货物周转量	航运货物周转量 · 内河航运占比	万吨
内河吞吐量增加量	内河港口货物吞吐量 · 吞吐量增加率 + 内河港口通过能力	万吨
内河港口货物吞吐量	INTEG(内河港口吞吐量增加量, 内河港口货物吞吐量初始值)	万吨
液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)船货运能源消耗量	LNG船货运能耗 · LNG标煤折算系数	万吨标准煤
燃油船货运能源消耗量	燃油船货运能耗 · 燃油标煤折算系数	万吨标准煤
CO ₂ 增加量	LNG船货运能耗 · LNG船碳排放系数 + 燃油船货运能耗 · 燃油船碳排放系数	万吨
CO ₂ 减少量	环境治理投入 · 治理效率 + 内河港口岸电节省的燃料	万吨
CO ₂ 排放量	INTEG(CO ₂ 增加量 - CO ₂ 减少量, CO ₂ 初始值)	万吨
SO ₂ 排放量	燃油船货运能耗 · 船舶辅机功率 · 航行时间 · SO ₂ 排放系数 · 船舶燃油含硫量	万吨
NO _x 排放量	燃油船货运能耗 · 船舶辅机功率 · 航行时间 · NO _x 排放系数 · 船舶燃油含硫量	万吨
环境污染造成的经济损失	废气排放量 · 废气损失系数	亿元

2.2 系统有效性检验

本文选取历史检验法来检验模型的有效性。其中广东省GDP和内河港口吞吐量检验结果,见表2。

检验结果表明,GDP和内河港口吞吐量最大误差分别为3.87%和9.21%,误差均在10%以内,证明该模型模拟效果较好,具有一定的有效性和合理性。

3 情景模拟与分析

3.1 情景分析

为分析广东内河航运绿色情景对能源消耗和污

染物排放的影响,广东内河航运绿色系统从优化产业结构、降低运输工具单耗、调整能源结构、船舶转用低硫油和组合情景五个情景出发,对其进行模拟仿真。在其他政策情景(变量)不变的情况下,对其中一个或多个政策进行定量调整,每一政策情景分别设立两个方案,如表3所示。通过与基础情景比较,模拟仿真得到各系统的仿真曲线图。因受疫情防控影响,这期间广东省GDP和货物周转量等变量均有不同程度的降低,各仿真曲线图在2020年前后有随时间先下降后上升或污染物排放强度降低的趋势。

表2 广东省GDP与内河港口吞吐量历史检验结果

Tab.2 Historical test results of GDP and inland port throughput in Guangdong Province

年份	实际		模拟		误差	
	GDP/亿元	内河港口吞吐量/万吨	GDP/亿元	港口吞吐量/万吨	GDP/%	内河港口吞吐量/%
2012	53 073	21 592	53 073	21 592	0.00	0.00
2013	57 007	25 542	57 342	23 999	0.59	-6.04
2014	62 503	27 824	62 411	25 925	-0.15	-6.83
2015	68 173	29 050	68 292	27 389	0.17	-5.72
2016	74 732	30 890	74 893	28 242	0.22	-8.57
2017	82 163	33 607	82 127	29 283	-0.04	-6.92
2018	91 649	36 030	89 877	28 804	-1.93	-3.40
2019	99 945	23 948	98 180	27 653	-1.77	9.21
2020	107 987	26 727	106 747	27 303	-1.15	2.15
2021	111 152	27 996	115 451	28 292	3.87	1.06

表3 模拟仿真方案设置

Tab.3 Simulation scenario settings

情景	方案	方案参数设定
优化产业结构	方案一	第二产业比重增加3%、第三产业比重降低3%
	方案二	第二产业比重降低3%、第三产业比重增加3%
降低运输工具单耗	方案三	燃油船单耗降低2%
	方案四	燃油船单耗降低5%
调整能源结构	方案五	燃油船比重降低10%、LNG船比重增加10%
	方案六	燃油船比重降低20%、LNG船比重增加20%
组合情景	方案七	方案三+方案五+治理效率增加5%
	方案八	方案四+方案六+治理效率增加10%
船舶转用低硫油	方案九	船舶燃油含硫量为0.5%
	方案十	船舶燃油含硫量为0.1%

3.2 情景模拟

3.2.1 内河航运系统优化产业结构情景

广东省2021年第一、二、三产业占GDP比重分别为4:40.4:55.6。参照赵珊珊^[15]通过调节各产业比重,形成第二产业比重增加3%、第三产业比重降低3%(方案一)和第二产业比重降低3%、第三产业比重增加3%(方案二)两种方案,模拟仿真结果如图4所示。模拟仿真结果显示,广东省第二、三产业GDP逐年上升,最终第三产业GDP将超过第二产业GDP;增加第二产业比重降低第三产业比重(方案一),能源消耗和二氧化碳排放量相比基础情景均有增加,至2030年内河航运能耗和二氧化碳排放增加率为21.74%和31.58%;降低第二产业比重

增加第三产业比重(方案二),至2030年内河航运节能率和减排率为28.06%和31.64%;随着第二产业的增加,能源消耗量与二氧化碳排放量均有所增加,第三产业则相反。

3.2.2 内河航运系统降低运输工具单耗情景

内河航运中的能耗以及二氧化碳的排放量通常由运输工具的单位能耗表征。设置燃油船单耗降低2%(方案三)和5%(方案四)两种方案,仿真结果如图5所示,结果表明,当运输工具单耗降低2%时,至2030年内河航运节能率和减排率为16.46%和17.84%;当运输工具单耗降低5%时,至2030年内河航运节能率和减排率为32.92%和35.69%;当应用技术手段降低内河船舶单耗时,节省其燃料油

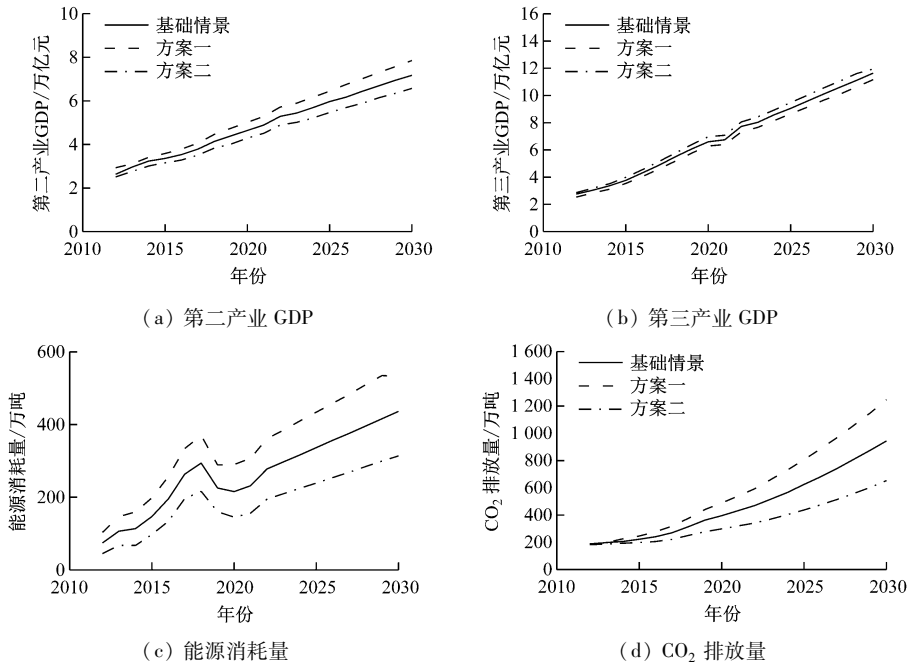


图4 内河航运系统优化产业结构情景仿真

Fig. 4 Scenario simulation diagram of inland navigation system optimization industrial structure

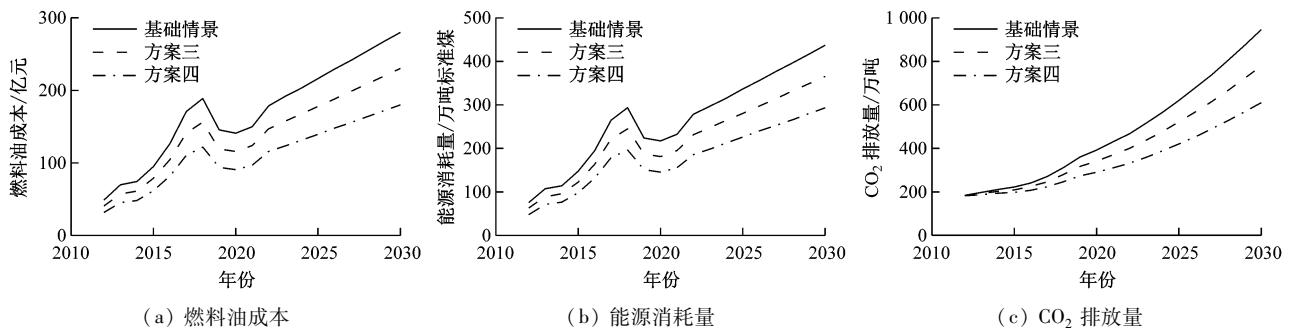


图5 内河航运系统降低运输工具单耗情景仿真

Fig. 5 Simulation diagram of inland waterway system reducing unit consumption of means of transport

成本,具有一定经济效益。

3.2.3 内河航运系统调整能源结构情景

现今船舶的能源主要以柴油和重燃料油为主,产生的二氧化碳相较于其他能源较多^[16],LNG 船舶燃料主要成分是甲烷,是一种清洁、高效的能源,LNG 的能耗系数和碳排放系数明显低于传统的燃料。通过调整能源结构降低能耗和 CO₂ 排放量,设置燃油船比重降低 10%、LNG 船比重增加 10% (方案五)和燃油船比重降低 20%、LNG 船比重增加 20% (方案六)两种方案。模拟效果如图 6 所示,仿真模拟结果表明,在 LNG 动力船比重增加 10%、燃油船比重降低 10% 时,至 2030 年内河航运节能率和减排率为 3.84% 和 6.40%;在 LNG 动力船比重增加 20%、燃油船比重降低 20% 时,至 2030 年内河航运节能率和减排率为 7.68% 和 12.80%;LNG 船能耗远低于燃油船,长远来看,调整能源结构是内河航运绿色发展的有效措施。

3.2.4 内河航运系统组合情景

单一变量变化情景下,降低燃油船单耗和调整能源结构均起到了不同程度的节能减排作用,但内河航运二氧化碳排放量均未在 2030 年达到峰值。因此,设置同时考虑经济、航运、能源和环境子系统的绿色情景,即 LNG 船舶比例增加 10%、燃油船舶比例降低 10%、燃油船单耗降低 2%,碳排放治理效率增加 5% (方案七)和 LNG 船舶比例增加 20%、燃油船舶比例降低 20%、燃油船单耗降低 5%、碳排放治理效率增加 10% (方案八)两种方案。模拟效果如图 7。模拟仿真结果表明,当采取方案七时,至 2030 年内河航运节能率和减排率为 18.25% 和 22.42%;当采取方案八时,至 2030 年内河航运节能率和减排率为 36.39% 和 50.93%,其内河航运的二氧化碳排放量与环境污染造成的经济损失在 2028 年达到峰值,二氧化碳排放量由 491 万吨下降到 462 万吨,环境污染造成的经济损失由 2028 年的

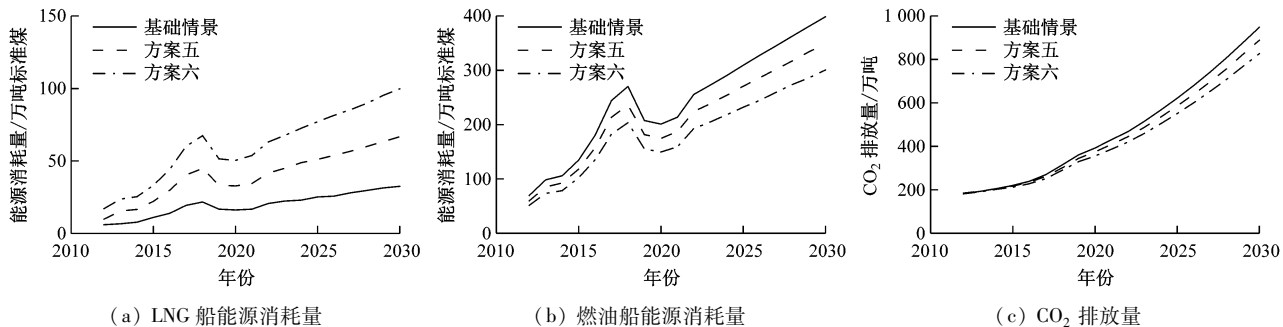


图6 内河航运系统调整能源结构情景仿真

Fig. 6 Scenario simulation diagram of energy structure adjustment of inland navigation system

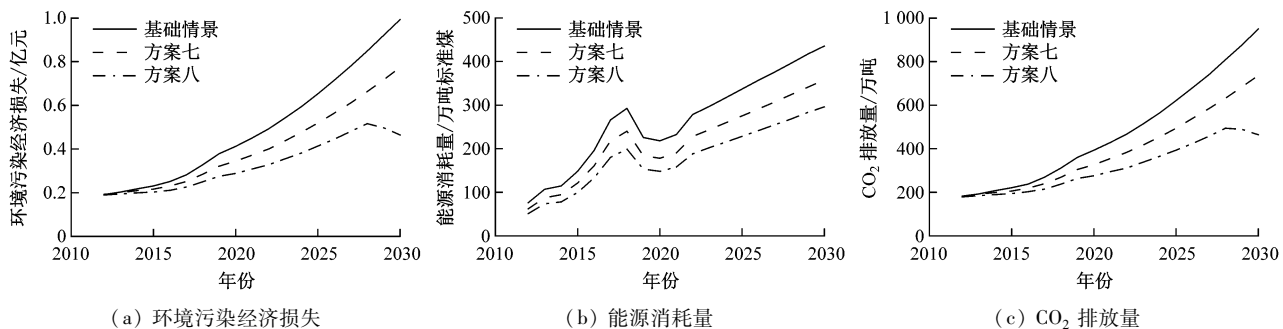


图7 内河航运系统组合情景仿真

Fig. 7 Scenario simulation diagram of inland navigation system combination

0.52 亿元下降到 0.46 亿元。

3.2.5 内河航运系统船舶转用低硫油情景

研究船舶转用低硫油对大气污染物 SO_2 和 NO_x 的影响,设置船舶燃油含硫量 0.5% (方案九)与船舶燃油含硫量 0.1% (方案十)两种方案,模拟效果

如图 8 所示。仿真结果表明,船舶燃油含硫量为 0.5% 时,至 2030 年内河航运 SO_2 排放量和 NO_x 排放量分别降低了 4.52 万吨和 5.55 万吨;船舶燃油含硫量为 0.1% 时,至 2030 年内河航运 SO_2 排放量和 NO_x 排放量分别降低了 5.34 万吨和 6.55 万吨。

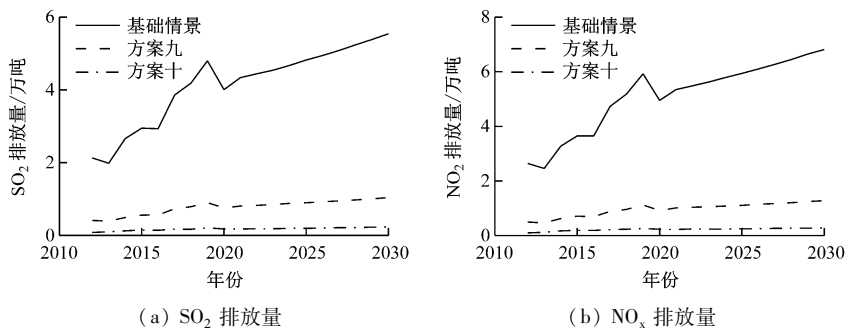


图8 内河航运系统船舶转用低硫油情景仿真

Fig. 8 Scenario simulation diagram of ship switching to low-sulfur oil in inland waterway system

3.3 模拟效果分析

本文模拟仿真结果表明,调节第二产业和第三产业比重可以改变内河航运能耗与二氧化碳排放量,第二产业是能耗和二氧化碳排放的主要方面,而第三产业能耗和二氧化碳排放相对较低。降低运输工具单位能耗绿色效果优于调整能源结构,可以看出调整能源结构是一项长期性工作,但从长远来看,广东内河航运能源结构调整不容忽视。将内河航运系统组合情景与降低运输工具单耗和调整能源结构

情景对比,即到 2030 年方案七比方案三和方案五节能效果增加 1.79% 和 14.41%;减排效果增加 4.58% 和 16.02%;到 2030 年方案八比方案四和方案六节能效果增加 3.47% 和 28.71%;减排效果增加 15.24% 和 38.10%。通过提高二氧化碳的治理效率,到 2030 年前内河二氧化碳排放量将有下降趋势,可实现内河航运业 2030 年前“碳达峰”的目标。船舶使用低硫油可以极大地降低内河航运大气污染物 SO_2 和 NO_x 排放。基于此,可不断提高内河航运

环保水平并基于优化产业结构,从改变能源结构、技术手段等多种策略综合实施,实现广东内河航运绿色发展。

4 结束语

本文通过建立广东内河绿色航运系统动力学模型,分析优化产业结构、降低运输工具单耗、调整能源结构、组合情景、船舶转用低硫油五种政策十种方案的实施对内河绿色航运系统的绿色作用效果。主要结论如下。

1) 广东省第三产业对推动经济发展及降低航运能耗和污染物排放有正向促进作用,可在保障产业结构合理化的基础上推进第三产业。

2) 船舶转用低硫油显著降低大气污染物 SO_2 和 NO_x 排放量,船舶使用含硫量 0.1% 的燃油,比使用含硫量 0.5% 的燃油在降低大气污染物 SO_2 和 NO_x 排放量方面效果更好,约提高 14.81%。降低运输工具单耗和调整能源结构两种政策在 2022 年~2030 年平均累计节能 790.77 万吨标准煤和 184.93 万吨标准煤,平均累计二氧化碳减排量为 1 559.15 万吨和 559.61 万吨。

3) 从短期来看,降低运输工具单耗是有效的航运绿色措施。长远来看,应加大对航运业的环境治理投入及出台相关政策鼓励发展清洁能源,逐步推进船舶转用低硫油,促进航运基础设施绿色发展,增加布置绿色服务区、LNG 加注站和码头岸电等。建议政府采取相关措施,逐步推进船舶转用低硫油。

参 考 文 献

- [1] International Maritime Organization (IMO). The fourth IMO GHG study 2020 [R/OL]. (2021-01-25) [2021-05-10]. <http://www.maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2021/03/4-th-IMO-GHG-Study-2020.pdf>.
- [2] PATRICKSSON, ERIKSTAD. A two-stage optimization approach for sulphur emission regulation compliance [J]. *Maritime Policy & Management*, 2017, 44(1): 94-111.
- [3] HU H T, YUAN J, NIAN V. Development of a multi-objective decision-making method to evaluate correlated decarbonization measures under uncertainty-the example of international shipping [J]. *Transport Policy*, 2019, 82: 148-157.
- [4] 吴俊妮,吕靖,林驿. 基于三阶段博弈模型的船舶使用岸电条件下港口减排策略研究 [J]. *数学的实践与认识*, 2020, 50(7):27-37.
- WU J N, LV J, LIN Y. Research on port emission reduction strategy for ships using shore power based on three-phase game model [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2020, 50(7):27-37. (in Chinese)
- [5] 杨顺益,罗宏伟,刘燕婕,等. 航运对长江生态环境的影响和绿色航运体系研究 [J]. *水运工程*, 2017(2):33-38.
- YANG S Y, LUO H W, LIU Y J, et al. Impact of waterway transport on ecological environment and green waterway transport system in the Yangtze River [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2017(2): 33-38. (in Chinese)
- [6] 鄢佳聪,蒋惠园,田小勇,等. 水运在国内国际双循环中的作用机理研究 [J]. *中国航海*, 2022, 45(3): 80-86.
- YAN J C, JIANG H Y, TIAN X Y, et al. Mechanism of water transport in domestic and international double circulation [J]. *Navigation of China*, 2022, 45(3):80-86. (in Chinese)
- [7] 钟永光,贾晓菁,钱颖. 系统动力学(第二版) [M]. 北京:科学出版社,2015.
- ZHONG Y G, JIA X Q, QIAN Y. *System dynamics (second edition)* [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [8] 王其藩. 系统动力学(修订版) [M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- WANG Q P. *System dynamics (revision)* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese)
- [9] 孙久文,高宇杰. 黄河流域水资源供需平衡的动态仿真与模拟 [J]. *系统工程*, 2023, 41(2):1-14.
- SUN J W, GAO Y J. Dynamic simulation of water resources supply and demand balance in the Yellow River basin [J]. *Systems Engineering*, 2023, 41(2):1-14. (in Chinese)
- [10] 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]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(6):244-256. (in Chinese)
- [11] 文元桥,耿晓巧,吴贝,等. 区域船舶废气减排的系统动力学建模研究 [J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(7):193-199.
- WEN Y Q, GENG X Q, WU B, et al. Research on system dynamics modeling for mitigation of regional vessel exhausts emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(7):193-199. (in Chinese)

- [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 136:101895.
- [12] 何枫,刘荣,陈丽莉. 履行环境责任是否会提高企业经济效益? ——基于利益相关者视角[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2020, 22(6):32-42.
- HE F, LIU R, CHEN L L. Does fulfilling environmental responsibility improve corporate economic performance? —From the perspective of stakeholders [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2020, 22(6):32-42.
-
- (上接第 143 页)
- [12] 郭振峰, 范厚明, 崔文罡, 等. 港城互动构建绿色低碳港口城市系统仿真[J]. *生态经济*, 2016, 32(6): 98-102.
- GUO Z F, FAN H M, CUI W G, et al. Dynamic simulation of green and low-carbon port city system co-built by port and city[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(6):98-102. (in Chinese)
- [13] 杨栋, 翁振松, 王龙. 充分发挥铁路作用, 推进运输结构调整[J]. *铁道经济研究*, 2018(6):17-21.
- YANG D, WNEG Z S, WANG L. Give full play to the role of railways and promote the adjustment of transport structure[J]. *Railway Economics Research*, 2018(6): 17-21. (in Chinese)
- [14] 周雄勇, 许志端, 郗永勤. 中国节能减排系统动力学模型及政策优化仿真[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(6):1422-1444.
- ZHOU X Y, XU Z D, XI Y Q. The system dynamic model and policy optimized simulation of energy conservation and emission reduction in China [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2018, 38(6): 1422-1444. (in Chinese)
- [15] 赵珊珊. 武汉港碳排放分析及系统动力学仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- ZHAO S S. Analysis and system dynamics simulation of carbon emissions in Wuhan Port [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] 张卓, 徐国平, 李兴华, 等. 航运碳减排措施及我国航运碳减排情景分析[J]. *工业安全与环保*, 2021, 47(增刊1):63-69.
- ZHANG Z, XU G P, LI X H, et al. Analysis of shipping carbon reduction measures and the scenarios of shipping carbon reduction in China[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2021, 47(Suppl. 1):63-69. (in Chinese)