

# 集装箱运输船队低碳转型策略多目标优化研究

计明军\*, 王雨欣, 匡政霖, 方婉薇  
(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**随着国家“双碳”目标的不断推进和国际海事组织(IMO)减排规定的日益趋严,航运业正面临愈发严苛的减排考验,迫切需要明确绿色转型路径。当前研究大多聚焦于替代燃料的选择,较少从船队角度进行减排策略的研究。为弥补当前研究不足,针对船队绿色转型策略选择这一问题,梳理转型过程中的核心影响因素,基于此建立考虑经济与环境的双目标线性规划模型,并结合 $\epsilon$ -约束法构建遗传算法对模型进行求解。以中远海运集团10 000 TEU~11 000 TEU 集装箱船队为例,求解规划期内该船队的绿色转型策略,包括各船舶的燃料使用方案和船舶操作方案。通过灵敏度分析,发现燃料价格的变动会对船舶更新改造时发动机的类型选择产生影响,减排目标的强度会影响船队转型成本进而影响企业对船队进行低碳转型的积极性。因此,政府应制定合理的减排目标和激励政策,促进相关低碳技术发展,降低船队转型成本,尽早实现航运业减排目标。

**关键词:**绿色航运;船队转型;替代燃料;双目标规划

中图分类号:U169.6 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.01.016

## Multi-objective optimization of low-carbon transition strategies for container ship fleets

JI Mingjun\*, WANG Yuxin, KUAN Zhenglin, FANG Wanwei

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** With the continued advancement of China "dual-carbon" goals and the increasingly stringent emission reduction regulations of the International Maritime Organization(IMO), the shipping industry is facing more severe emission reduction challenges and urgently needs to clarify the green transition pathways. Most of the existing research focuses on the selection of alternative fuels, while there is relatively little research on emission reduction strategies from the perspective of the fleet. To address the shortcomings of the existing research, this study identifies the key factors influencing fleet green transition decisions. Based on this, a bi-objective linear programming model jointly considering economic and environmental objectives is established, and a genetic algorithm combined with the  $\epsilon$ -constraint method is constructed to solve the model. Finally, taking the 10,000-11,000 TEU container fleet of COSCO Shipping Group as a case study, this research derives the optimal green transition strategy for the fleet during the planning horizon, encompassing fuel choices and operational configurations for individual vessels. Sensitivity analysis reveals that fluctuations in fuel prices significantly affect the selection of engine types during vessel retrofitting and renewal decisions, while the stringency of emission reduction targets directly influences fleet transition costs, thereby affecting corporate proactiveness in pursuing decarbonization initiatives. Consequently, policymakers should establish appropriately calibrated emission reduction targets and incentive mechanisms to accelerate the advancement of low-carbon technologies, reduce fleet transition costs, and expedite the achievement of decarbonization objectives in the shipping industry.

**Key words:** green shipping; fleet transformation; alternative fuels; bi-objective optimization

收稿日期:2025-02-27

基金项目:水路交通控制全国重点实验室开放课题资助项目(QZ2022-Z004);国家自然科学基金项目(71971035);中央高校基本科研业务费专项(3132024623)资助

作者简介:计明军(1973—),男,教授,博士,研究方向为物流工程与管理。\*通信作者:jmj@dlmu.edu.cn

引用格式:计明军,王雨欣,匡政霖,等.集装箱运输船队低碳转型策略多目标优化研究[J].中国航海,2026,49(1):155-164.

JI M J, WANG Y X, KUAN Z L, et al. Multi-objective optimization of low-carbon transition strategies for container ship fleets[J]. Navigation of China, 2026, 49(1): 155-164. (in Chinese)

近年来,全球对可持续发展的关注不断加深,航运业作为温室气体排放的重要来源,面临着巨大的转型压力,如何实现航运业绿色转型备受各界关注。国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)海上环境保护委员会(Marine Environment Protection Committee, MEPC)第80届会议通过的《2023年IMO船舶温室气体减排战略》修订了航运业温室气体的减排目标,提出约在2050年达到净零排放。这督促着全球各大船舶营运商制定合理的船队绿色转型策略,以实现减排目标。

为应对IMO所提出的减排要求,航运业可通过多种节能措施推进绿色转型过程,船舶的节能措施包括船体设计优化、动力推进系统改进、替代燃料使用和船舶降速等。<sup>[1]</sup>其中,替代燃料使用是减少碳排放最直接、最有效的方式。<sup>[2]</sup>替代燃料可分为两大类:一是低碳燃料,如液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)、液化石油气(Liquefied Petroleum Gas, LPG)和甲醇与乙醇等醇类燃料;二是利用可再生能源合成的零碳燃料,如绿色甲醇、绿氨和绿氢等。<sup>[3]</sup>替代燃料的使用需配合相应类型发动机,因此,在考虑使用替代燃料时,还需要考虑新造替代燃料船舶购入和发动机改造。目前,相关零碳航运的研究,诸多学者只聚焦于航运替代燃料的选择,并未同时考虑相应动力船舶的选择。例如,诸多研究通过模糊层次分析法<sup>[4]</sup>和多标准决策分析法<sup>[5]</sup>等方法,从技术、经济、环境和社会等多个维度对替代燃料的前景进行评价,给出替代燃料的优劣排序,为企业提供燃料选择作参考。

对于各企业来说,从船队角度考虑航运业绿色转型策略是十分重要也是非常迫切的。为实现IMO提出的减排目标,企业通过参考船队整体的绿色转型策略,便于其从整体上把握绿色转型所带来的影响,从而做好相关资金、管理等方面的规划调整,使企业的战略规划更加科学合理。但目前针对绿色转型背景下船队更新策略的研究较少,且多以经济效益为单一目标<sup>[6]</sup>,以船舶接近报废年限、市场条件改变或补贴政策等因素为研究背景进行展开。在考虑减污降碳方面的船队更新研究中,文献[7]考虑不同的减排措施,针对班轮运输建立混合整数非线性规划模型,以最小化航运路线的总运营成本。LAGEMANN等<sup>[8]</sup>从单船的角度考虑不确定的燃料、碳配额和船舶节能改造的价格,通过两阶段随机最优优化模型得出甲醇和LNG是相对稳健的初始选择。

目前,已有文献虽然考虑绿色航运背景下的船队更新问题,但仅从局部航线或单船的角度展开,没有从船队的整体视角切入,无法为船舶所有者公司提供宏观上的船队绿色转型策略。

通过梳理航运绿色转型问题的研究现状,根据当前不足及该问题的现实紧迫性,从船队的角度切入,深入探讨船队的绿色转型策略问题就显得尤为重要,研究思路见图1。首先从政府与行业组织、造船业、新能源产业和航运企业等多个角度出发,系统地识别船队绿色转型的核心影响因素。在此基础上,构建以转型成本最小为主要目标、以CO<sub>2</sub>总排放量最少为次要目标的双目标优化模型,采用遗传算法和 $\epsilon$ -约束法相结合的方法进行优化求解。

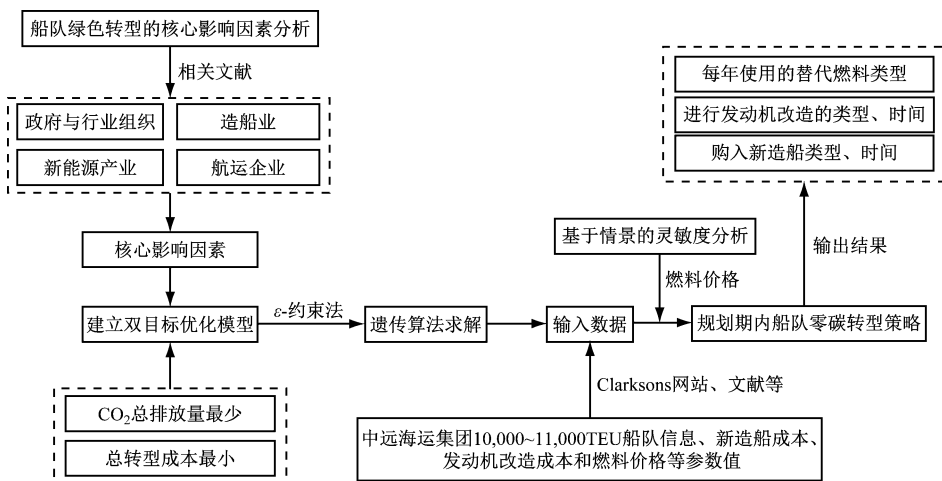


图1 研究思路

Fig. 1 Research framework

# 1 船队绿色转型的影响因素分析

结合当前既有的研究成果,初步建立包含政府与行业组织、造船业、航运企业和新能源产业等4个维度,共计7个因数的船队绿色转型核心影响因素体系,见表1。

表1 船队绿色转型核心影响因素体系

Tab.1 Key influencing factors of fleet green transition

维度	影响因素	来源
政府与行业组织	航运业减排目标	文献[9]
	碳排放交易体系	文献[10]
造船业	新造替代燃料船价格	文献[11]
	船舶发动机节能改造价格	文献[12]
航运企业	企业绿色转型需要资本投入	文献[9]和文献[13]
	替代燃料特性、减排效果	文献[14]
新能源产业	替代燃料价格	文献[12]和文献[14]

## 1.1 政府与行业组织维度

政府与行业组织依据当前全球严峻的减排形势,设定航运业减排目标,对各航运企业高污染、高排放的行为进行约束,同时出台一系列指标和标准,配合减排目标达成。碳排放交易体系作为降碳的经济手段,要求航运公司为其碳排放行为买单。以上2个因素从总体目标和经济措施2大角度描述航运业的绿色转型。

## 1.2 造船业维度

作为航运业重要的下游产业,造船业在绿色转型过程中扮演着不可或缺的角色。由于当前部分替

代燃料发动机、替代燃料生产和船舶节能改造技术等存在较大不确定性,使造船厂的新造船供应与改造能力难以预测。根据供需理论,需求、供应情况最终总会反映在市场价格上。因此,使用新造船价格、船舶发动机节能改造价格来描述造船业的市场情况。

## 1.3 航运企业维度

企业根据自身规模、市场份额和社会责任意识进行综合评估,确定绿色转型方案。而在其决策过程中,通常依据资本投入的规模来制定具体策略。因此,该维度可由企业资本投入来描述。

## 1.4 新能源相关产业维度

对于替代燃料的选择,关键考虑其特性、减排效果及产储技术成熟度和能源的供应情况。后两者主要依赖于相关技术的成熟度,根据经验曲线理论<sup>[15]</sup>,价格能够代表对应技术的发展水平。因此,该维度可由替代燃料特性、减排效果和价格等方面进行描述。

# 2 问题描述

针对航运企业的绿色转型需求,建立考虑转型成本、碳排放量的双目标线性规划模型。其中,转型成本指航运企业在船队绿色转型过程中,在维持某一船型的船队运力规模不变的情况下,由于进行新船购入、发动机改造和碳交易机制等产生的成本,即为实现IMO的减排目标,企业对船队进行绿色转型,相比不进行转型所产生的额外成本。

针对现有船队绿色转型考虑船舶淘汰、船舶发动机改造和进行碳交易机制等3种操作方式,船队在绿色转型过程中的操作及成本见图2。

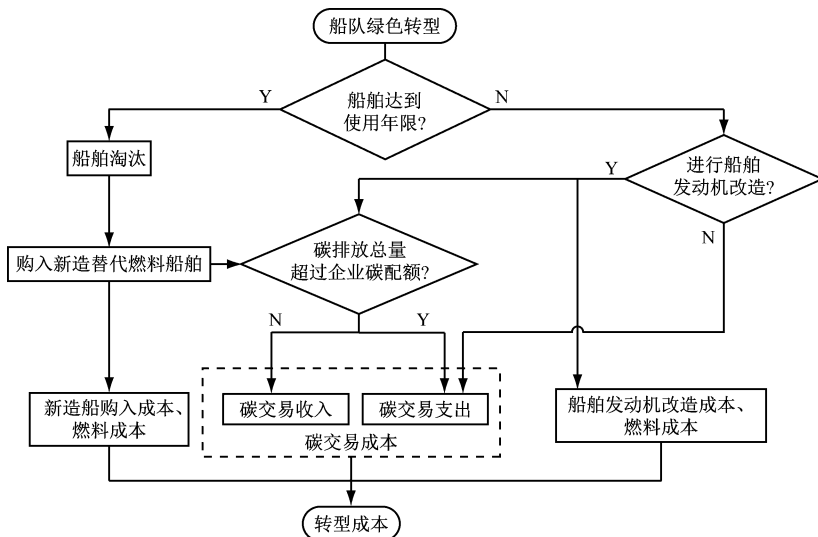


图2 船队在绿色转型过程中的操作及成本

Fig.2 Operation and cost in the process of fleet green transition

### 3 模型构建

#### 3.1 模型假设

1) 假设船队运力在规划期内不受其他因素影响,仅保持期初运力,即船队规模在规划期内不变。

2) 假设新造船建造周期为 3 a, 发动机改造周期为 1 a, 两次发动机改造间隔时间至少 5 a。

#### 3.2 模型变量和参数

模型集合和参数分别见表 2 和表 3。

表 2 模型集合  
Tab.2 Model sets

参数	解释
$T$	离散的时间集
$S$	船舶动力系统类型
$V$	船队中所有船舶的集合
$F$	船舶燃料类型

表 3 模型参数  
Tab.3 Model parameters

参数	解释
$C_{st}^N$	在第 $t$ 年某类型集装箱船 $s$ 动力系统的新造船价格
$C_{s'st}^R$	在第 $t$ 年某类型船舶从动力系统改造为动力系统的成本
$C_{ft}^F$	在第 $t$ 年集装箱船使用 $f$ 燃料的燃料成本
$B_{ft}$	在第 $t$ 年集装箱船使用 $f$ 燃料船舶的总碳排放量
$C_{Bt}$	政府在第 $t$ 年给集装箱船队定的碳排放配额
$C_P$	碳交易市场的碳单价
$K_{fs}$	如果燃料 $f$ 与 $s$ 动力系统兼容则为 1, 否则为 0
$E_t$	集装箱船队在第 $t$ 年可排放的碳排放量上限
$R_{tv}$	船舶 $v$ 在第 $t$ 年到达使用年限必须被淘汰则为 1, 否则为 0
$C_E$	2008 年船队的基准碳排放量

#### 3.3 目标函数

1) 转型成本最小,模型决策变量见表 4。

$$\min C \tag{1}$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \tag{2}$$

式(1)和式(2)中: $C_1$  为新造船购入成本; $C_2$  为发动机改造成本; $C_3$  为燃料成本; $C_4$  为碳交易成本。

$$C_1 = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} (C_{st,N} \cdot q_{stv}) \tag{3}$$

表 4 模型决策变量

Tab.4 Model decision variables

决策变量	解释
$x_{ftv}$	对于船 $v$ , 第 $t$ 年时使用 $f$ 燃料则等于 1, 否则为 0
$y_{stv}$	对于船 $v$ , 第 $t$ 年时为 $s$ 动力系统则等于 1, 否则为 0
$r_{s'stv}$	对于船 $v$ , 第 $t$ 年时将改造为 $s$ 动力系统则为 1, 否则为 0
$P_{stv}$	$s$ 动力系统的船舶 $v$ 在第 $t$ 年时必须被淘汰则为 1, 否则为 0
$q_{stv}$	第 $t$ 年时新购的船舶替代被淘汰船舶的 $v$ 编号为 1, 否则为 0

$$C_2 = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} (C_{s'st,R} \cdot r_{s'stv}) \tag{4}$$

$$C_3 = \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} ((C_{ft,F} - C_{t,F}) \cdot x_{ftv} \cdot B_{ft}) \tag{5}$$

$$C_4 = \sum_{t \in T} (E_t - C_{Bt}) \cdot C_P \tag{6}$$

2) 碳排放量最小。

$$\min E \tag{7}$$

$$E = \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} B_{ft} \cdot x_{ftv} \tag{8}$$

根据约束结果依次进行帕累托均衡,即不断调整船队总的碳排放量要求,以找到碳排放量和转型成本的一个均衡解。

$$\sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} B_{ft} \cdot x_{ftv} \leq \varepsilon \tag{9}$$

#### 3.4 约束条件

1) 每艘船的燃料类型和动力系统都只能为一种。

$$\sum_{f \in F} x_{ftv} = 1, t \in T; v \in V \tag{10}$$

$$\sum_{s \in S} y_{stv} = 1, t \in T \tag{11}$$

2) 船舶的动力系统与燃料必须要和动力系统兼容。

$$x_{ftv} + y_{stv} \leq 1 + K_{fs}, t \in T; s \in S; f \in F \tag{12}$$

3) 当发动机类型由  $s'$  改造为  $s$  时由变量  $r_{s'stv}$  控制,需满足式(13)和式(14)的数学关系。

$$y_{s'v} + y_{stv} - 1 = r_{s'stv}, s', s \in S; t \in \{2, 3, 4, \dots, T\} \tag{13}$$

$$y_{s'(t-1)} + y_{stv} \geq 2r_{s'stv}, s', s \in S; t \in \{2, 3, 4, \dots, T\} \tag{14}$$

4) 新造船建造周期为 3 a。

$$\sum_{v \in V} x_{fv} = 0, t = 0, 1, 2; f \in F \setminus \{2, 3, 4\} \quad (15)$$

5) 船队新购入船舶和淘汰船舶必须同时进行建造。

$$\sum_{s \in S} p_{stv} = \sum_{s \in S} q_{stv}, t \in T \quad (16)$$

6) 确保在对某动力类型的目标船舶进行淘汰和发动机改造时,船队中有该目标船。

$$\sum_{s' \in S} r_{ss'tv} + p_{stv} \leq y_{stv}, t \in T \quad (17)$$

7) 每艘船的发动机类型保持不变,除非进行改造、淘汰和购入。

$$y_{stv} - y_{s(t-1)} = \sum_{s' \in S} (r_{s's'tv} - r_{ss'tv}) - p_{stv} + q_{stv}, \\ s \in S; t \in T \quad (18)$$

8) 确保船舶在达到船舶使用年限时必须被淘汰。

$$\sum_{s \in S} p_{stv} = R_{tv}, t \in T \quad (19)$$

9) 船队每年的碳排放总量必须逐年减少。

$$\sum_{f \in F} \sum_{v \in V} B_{f(t+1)} \cdot x_{f(t+1)} \leq \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} B_{ft} \cdot x_{fv}, \\ t \in [0, 1, \dots, T-1] \quad (20)$$

10) 船舶发动机改造的间隔时间至少为 5 a。

$$\sum_{s \in S} \sum_{s' \in S} \sum_{k=0}^4 r_{ss'(t+k)v} = 1, \\ t \in (0, 1, 2, \dots, T-4) \quad (21)$$

11) 船队转型策略需满足 IMO 提出的 2030 年、2040 年航运业减排目标,即:2030 年实现国际海运温室气体年度排放总量比 2008 年至少降低 20%,到 2040 年至少降低 70%。

$$\sum_{f \in F} \sum_{v \in V} B_{f5} \cdot x_{fv} \leq (1 - 20\%) \times C_E \quad (22)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{v \in V} B_{f15} \cdot x_{fv} \leq (1 - 70\%) \times C_E \quad (23)$$

12) 决策变量都是 0-1 变量。

$$x_{fv\omega} \in \{0, 1\}, f \in F; t \in T; \omega \in \Omega \quad (24)$$

$$y_{stv} \in \{0, 1\}, s \in S; t \in T \quad (25)$$

$$r_{s's'tv} \in \{0, 1\}, s', s \in S; t \in T \quad (26)$$

$$q_{stv} \in \{0, 1\}, s \in S \quad (27)$$

$$p_{stv} \in \{0, 1\}, s \in S; v \in V; t \in T \quad (28)$$

## 4 算法设计

该模型是参数众多的双目标规划,随着算例中船舶数量增加、规划期延长,精确求解难度加大,难以利用商用求解器求解。为高效获取模型近似最优解,在传统遗传算法的基础上结合  $\varepsilon$ -约束法,将双目标优化转化为带有若干约束的单目标优化模型。

模型中涉及的决策变量为燃料类型  $F_i$  和操作

选择  $O_i$ 。算法中的个体(即整个船队的绿色转型策略)用 Sol 表示,由  $V$  个染色体组成,每个染色体包含  $2 \times T$  个变量(基因),其中: $T$  为规划期时间;PS 为种群规模。

算法流程见图 3。具体的求解过程如下:

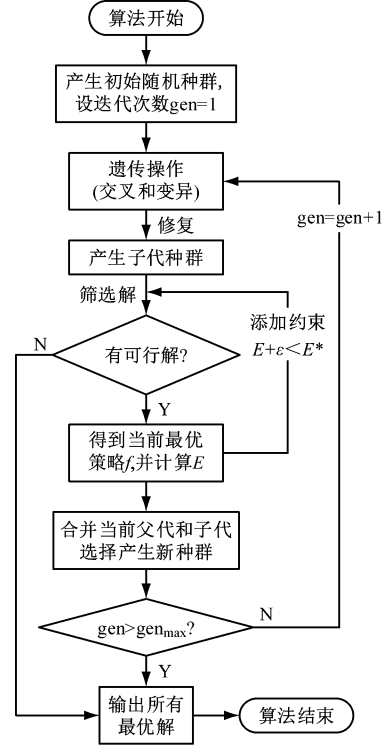


图 3 算法流程

Fig. 3 Algorithm flowchart

1) 种群初始化:根据图 3 所示的解结构,结合各约束条件,采用随机数法随机产生规模为 100 的初始化种群,并初始化迭代次数,  $gen = 1$ 。

2) 交叉、变异:在种群中随机选择 2 个个体,并分别随机确定一个交叉点,进行两点交叉,具体操作过程见图 4。交叉操作完成后,依据预设的变异度进行变异操作。为避免进行变异操作后的新解不满足对船舶改造周期、船舶使用年限等条件的约束,本文设计检查和修复函数,以确保新解的可行性。

3) 筛选:通过解码函数计算解的适应度(即总转型成本),依据适应度排序,得到当前最优解  $f^*$ 。

4) 生成新种群:本文采用拥挤度和精英策略。<sup>[16]</sup>合并当前父代和子代,进而选择产生新的种群,保留适应度高的个体,以确保优良解不会丢失。

5) 添加约束:根据当前的最优解,根据解码函数计算其对应的碳排放总量  $E^* = \text{Emission}(f^*)$ ,添加约束  $E + \varepsilon < E^*$ ,其中, $E$  指下一次迭代过程中各个策略的碳排放总量。

6) 判断操作:本文使用的算法中有 2 个终止触发条件,一个是  $gen$  迭代至最大次数;另外一个

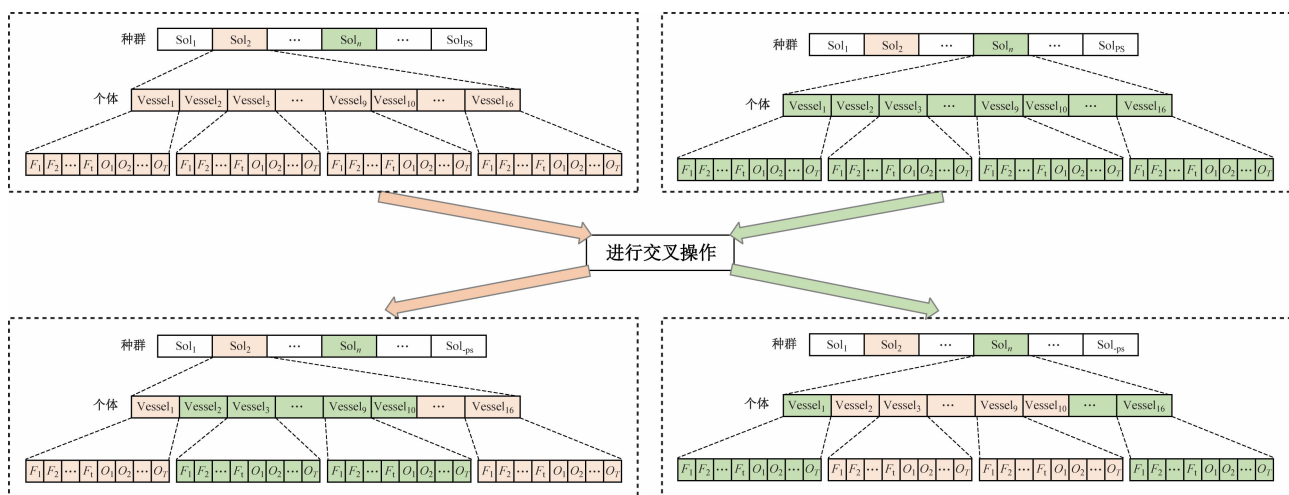


图4 两点交叉操作过程

Fig. 4 Two-point-based crossover operation process

着逐步收紧的  $\varepsilon$ -约束导致种群无法找到当前约束条件下的可行解。

## 5 实例分析——以中远海运 10 000 TEU ~ 11 000 TEU 集装箱船队为例

### 5.1 数据来源

1) 新造船价格。选取 SARIMA 模型进行预测。新造船的材料费、设备费和人工费的变化是影响新造船价格变化的主要原因,其中:材料费取决于钢材用量,通过经验公式计算可获得;设备费包括船舶设备、动力设备和自动化设备;人工费取决于船舶配备船员人数和工资行情,通过经验公式计算可获得。从这 3 个方面对新造船价格的变化趋势建立预测模型,并使用运价指数来进行新造船价格模型的修正。

2) 发动机改造价格。根据挪威船级社 (Det Norske Veritas, DNV) 和 SINTEF 能源研究部 (SINTEF Energy Research, MEAN) 的评估,超出新造船成本的 1/4 则不具备经济性,假设进行船舶发动机改造的价格为对应新造船价格的 20%。

3) 船舶淘汰的年限参考我国发布的《关于实施运输船舶强制报废制度的意见》,集装箱船为 34 a。

4) 各类型燃料的价格、燃料年消耗量和减排潜力见表 5。燃料单价与燃料年消耗量的乘积为年燃料价格。对于燃料单价,柴油和 LNG 使用 Clarksons 网站 2019—2024 年的平均加注价格;甲醇和氨的价格数据根据文献[17]和文献[18]确定;对于燃料年消耗量,单船每年的柴油消耗量来源于 Clarksons 网站,替代燃料的年消耗量是依据各类型燃料的热值进行换算得出。

5) 碳配额价格。碳配额价格数据使用的是 Clarksons 网站提供的 2021 年 1 月—2024 年 4 月的

表 5 各类型燃料的价格、年消耗量和减排潜力

Tab. 5 Price, annual consumption and emission reduction potential of different fuel types

燃料类型	柴油	LNG	绿色甲醇	绿氨
热值/(兆焦/kg)	42.70	50.00	19.90	18.60
燃料价格/(美元/t)	699.37	853.35	507.64	309.79
燃料年消耗量/万 t	9.13	7.79	16.72	38.35
年燃料费用/百万美元	63.82	66.50	84.89	118.82
减排潜力	0	0.30	0.90	0.90
碳排放量/t	7.55	5.28	0.75	0.75

注:1 美元 = 7.088 1 人民币。

平均欧盟碳配额价格,为 78.18 美元/t。

6) 碳排放量、减排潜力如表 5 所示。碳排放量数据来源于 Clarksons 网站公布的 10 000 TEU ~ 11 000 TEU 船舶 2022—2024 年 9 月日均 CO<sub>2</sub> 排放量的平均值。替代燃料的减排潜力,即 CO<sub>2</sub> 排放量的减少率,参考文献[13]和文献[19]。

7) 碳排放量指示性校核点基准值。根据《2023 年 IMO 船舶温室气体减排战略》,2008 年相比到 2030 年温室气体排放减少 20%、到 2040 年减少 70%。

### 5.2 结果分析

算例船队在规划期 2025—2050 年的燃料类型选择和操作的策略方案分别见图 5 和图 6。规划期内使用柴油的船舶数量逐年降低直至为 0;使用 LNG 燃料的船舶数量先增多后减少;使用绿色甲醇

燃料的船舶数量一直呈现增多趋势;使用绿氨燃料的船舶数量波动增长直至稳定。规划期内 5 250 TEU 船队绿色转型的燃料选择方案见图 7。图 7 中:进行 LNG 动力发动机的次数最多,为 8 次;甲醇动力次之,为 7 次;氨动力最少,为 3 次。针对新造替代燃料船舶购入,甲醇动力船舶购入艘数为 12,高于艘数为 4 的氨动力船舶。

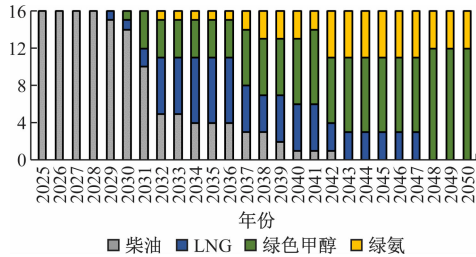


图 5 规划期内船队绿色转型的燃料选择方案

Fig.5 Fuel options for fleet green transformation during the planning horizon

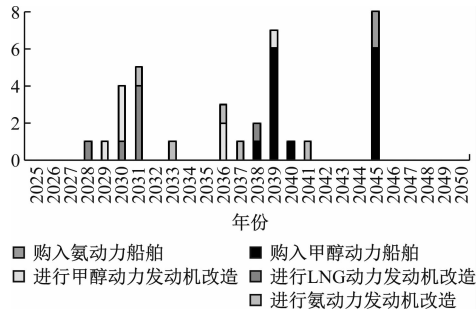


图 6 规划期内船队绿色转型的操作方案数量

Fig.6 Number of operation schemes for fleet green transition during the planning horizon

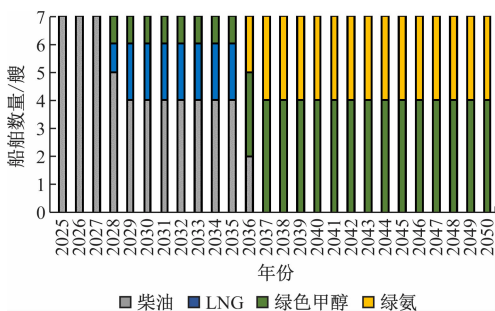


图 7 规划期内 5 250 TEU 船队绿色转型的燃料选择方案

Fig.7 Fuel selection schemes for the 5,250 TEU fleet green transition during the planning horizon

因为只有在进行发动机改造、新造替代燃料船舶购入后,船舶燃料的类型才可以发生改变,所以图 5 和图 6 的结果具有一定的对应关系。由图 6 所知:94% 的改造操作都集中于 2041 年及之前,所有新造替代燃料船舶的购入操作都是在 2038 年及之后,这主要是由于算例船队的船龄结构以及 2040 年需要实现新的减排目标导致的。

综上,为不断降低碳排放,实现船队绿色转型的目标,柴油发动机逐渐被改造,柴油燃料也随之逐渐退出;LNG 是零碳航运过程中短期最具经济效益和减排效益的过渡选择,但由于 LNG 在减排潜力方面不如绿色甲醇、绿氨燃料,要实现转型目标,最终的燃料使用方案仍将是绿色甲醇、绿氨等具有高减排潜力的替代燃料,规划后期阶段零碳燃料的相关改造和新造船购入成为主流。

### 5.3 灵敏度分析

#### 5.3.1 船队规模

为探究船队规模的改变对船队绿色转型策略的影响,并进一步检验模型有效性、普适性,选取中远海运集团 5 250 TEU 船队和 13 500 TEU 船队进行转型策略求解并进行对比。通过将船队数据代入模型,所得结果见图 7 和图 8。这两类船队的策略方案规律与 10 000 TEU ~ 11 000 TEU 的船队转型策略方案规律一致,柴油燃料逐渐淘汰,LNG 燃料作为中期过渡燃料,先增多后减少,后期的燃料选择为绿色甲醇、绿氨这类高减排潜力的替代燃料。

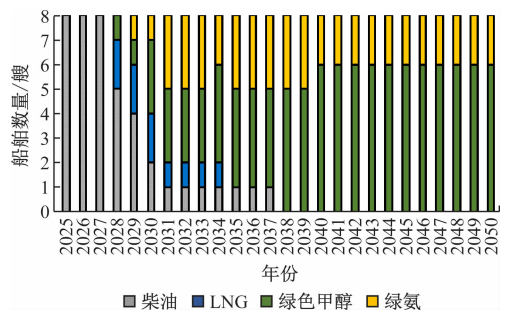


图 8 规划期内 13 500 TEU 船队绿色转型的燃料选择方案

Fig.8 Fuel selection schemes for the 13,500 TEU fleet green transition during the planning horizon

#### 5.3.2 新造船价格

新造船价格是船队转型成本中的重要组成部分,通过调节新造船预测模型中相关设备费的参数,观察其对船队转型策略的影响。

分别将甲醇燃料新造船设备费参数设置为 1.05、1.00、0.95,对比观察规划期内各燃料使用总次数见表 6。表 6 中:基准情况中,氨动力船舶比绿色甲醇船舶具有价格优势,氨燃料的使用总次数大于甲醇燃料;当甲醇动力船舶设备费参数调至 1.05 时,甲醇船舶价格整体增长,氨动力船舶价格优势更加明显;当参数调至 0.95 时,甲醇动力船舶的价格总体下降,与氨动力船舶价格不相上下,甲醇燃料与氨燃料的使用总次数差值出现大幅缩减。因此,相关参数值设置是否科学会对策略方案产生一定影响,需紧跟市场的发展现状及趋势进行确定。

表6 不同甲醇动力船舶设备费参数下燃料选择总次数

Tab.6 Total fuel selection frequency under different equipment cost parameters for methanol-powered vessels

(单位:次)

参数值	柴油	LNG	绿色甲醇	绿氨
1.05	121	59	64	172
1.00	142	62	62	150
0.95	139	58	107	112

### 5.3.3 燃料价格

考虑未来低碳技术的发展会带来相关产品价格的变化,例如燃料价格等。因此,为进一步探究其对结果的影响,进行基于不同燃料价格情景的灵敏度分析。根据经验曲线理论<sup>[15]</sup>,新兴阶段的产品未来价格将呈现先降低后稳定的趋势,而绿色甲醇、绿氨属于新兴燃料产品,符合上述经验曲线理论。因此,分别设立以各燃料当前价格为基准,分别降低10%、30%和50%为例的6种情景进行分析,见表7。

表7 3类替代燃料在不同情景下的年燃料费用

Tab.7 Annual fuel costs of three alternative fuels under different scenarios

(单位:百万美元)

燃料类型	LNG	绿色甲醇	绿氨
基准情景	66.50	84.89	118.82
情景1-绿色甲醇降价10%	66.50	76.40	118.82
情景2-绿色甲醇降价30%	66.50	59.42	118.82
情景3-绿色甲醇降价50%	66.50	42.44	118.82
情景4-绿氨降价10%	66.50	84.89	106.93
情景5-绿氨降价30%	66.50	84.89	83.17
情景6-绿氨降价50%	66.50	84.89	59.41

规划期内船队绿色转型的燃料选择方案见图9~图11。由图9~图11可知:从情景1~情景3,随着绿色甲醇燃料价格的降低,整个船队使用绿色甲醇燃料的总次数不断升高,进行甲醇动力发动机改造和购入甲醇动力船舶的数量在增加,且时间在不断提前;使用绿氨燃料的总次数、购入氨动力船舶的数量呈下降趋势,进行氨动力发动机改造次数较为平稳;相关柴油、LNG燃料的策略变动不大。

规划期内船队绿色转型的燃料选择方案见图12~图14。由图12~图14可知:从情景4~情景6,随着绿氨燃料价格的降低,所得转型策略变化趋势与绿色甲醇基本一致。与绿色甲醇不同的是,绿

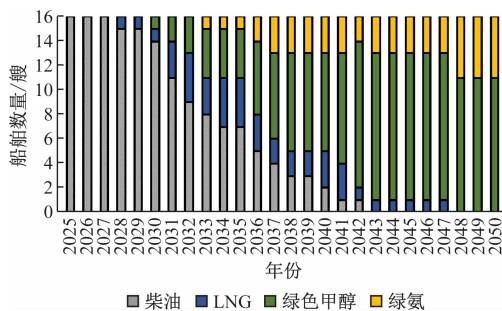


图9 规划期内船队绿色转型的燃料选择方案(情景1)

Fig.9 Fuel options for fleet green transformation during the planning period (scenario 1)

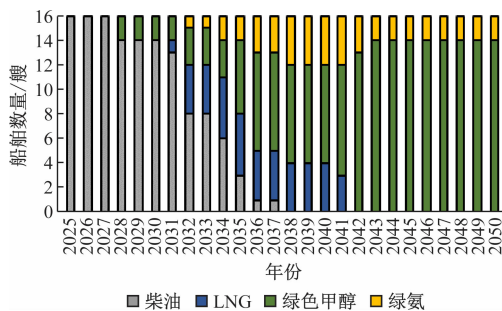


图10 规划期内船队绿色转型的燃料选择方案(情景2)

Fig.10 Fuel options for fleet green transformation during the planning period (scenario 2)

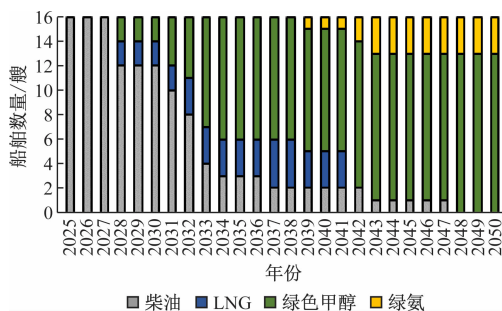


图11 规划期内船队绿色转型的燃料选择方案(情景3)

Fig.11 Fuel options for fleet green transformation during the planning period (scenario 3)

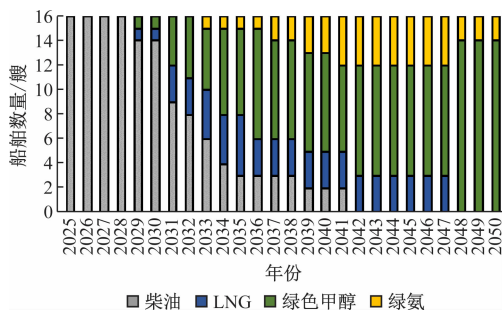


图12 规划期内船队绿色转型的燃料选择方案(情景4)

Fig.12 Fuel options for fleet green transformation during the planning period (scenario 4)

氨受价格变动的影响更显著,随着价格降低幅度的增大,使用各类燃料的总次数变化幅度较大。这是由于2类燃料减排效果一致,基准情景下氨动力船

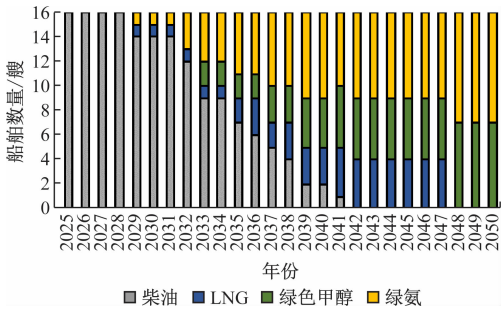


图 13 规划期内船队绿色转型的燃料选择方案(情景 5)

Fig. 13 Fuel options for fleet green transformation during the planning period (scenario 5)

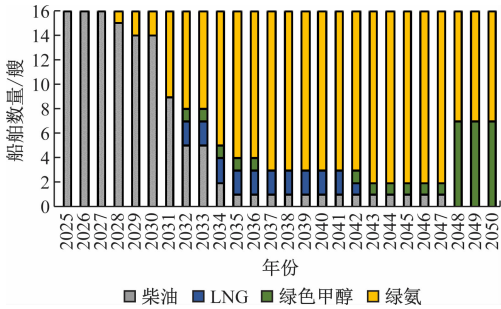


图 14 规划期内船队绿色转型的燃料选择方案(情景 6)

Fig. 14 Fuel options for fleet green transformation during the planning period (scenario 6)

船年燃料费高于甲醇动力船舶,当绿氨价格降低至对于绿色甲醇有竞争力的价格时,绿氨具有价格优势,在成本最小化的优化目标下,对转型策略产生较大影响。因此,在各替代燃料减排效果一致时,是否具有价格竞争力对于船队的绿色转型策略有较大影响。

情景 1 ~ 情景 3 的碳排放总量、转型成本情况见图 15。由图 15 可知:随着价格的降低总转型成本呈现降低趋势,规划期内碳排放总量呈现先下降后略微上升又大幅下降的趋势。情景 4 ~ 情景 6 的碳排放总量、转型成本情况见图 16。由图 16 可知:随着价格的降低总转型成本呈现先略微上升又降低的趋势,规划期内碳排放总量呈现先下降后上升又大幅下降的趋势。综上,随着燃料价格的降低,转型成本的整体趋势是下降的,而碳排放总量并不是一直呈降低趋势。碳排放量的波动趋势是因为决策方案的得出是由总转型成本、碳排放总量两个目标决定的,还会受到碳排放量约束和各燃料之间的价格优势等因素的影响。

### 5.3.4 碳排放总量

由于本文利用  $\varepsilon$ -约束法将双目标优化模型转化为带有若干约束的单目标优化模型,即通过不断调整次目标碳排放总量  $\varepsilon$  的值,以寻找兼顾成本主目标与碳排放量次目标的最优解。

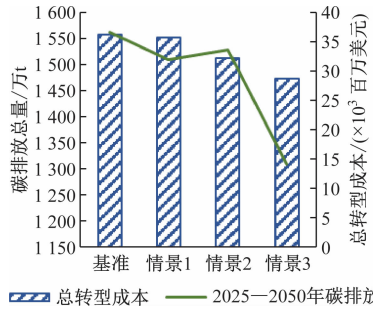


图 15 情景 1 ~ 情景 3 的碳排放总量、转型成本情况

Fig. 15 Total carbon emissions and transition costs in scenarios 1 to scenarios 3

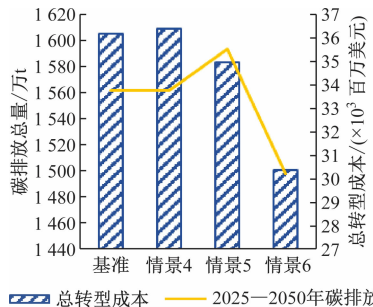


图 16 情景 4 ~ 情景 6 的碳排放总量、转型成本情况

Fig. 16 Total carbon emissions and transition costs in scenario 4 to scenario 6

碳排放总量  $\varepsilon$  与总转型成本变化情况见图 17,随着规划期内碳排放总量  $\varepsilon$  的不断减小,总转型成本整体呈上升趋势。这说明在特定的各成本和燃料减排潜力的条件下,减排的要求越严格,企业所负担的转型成本越高。

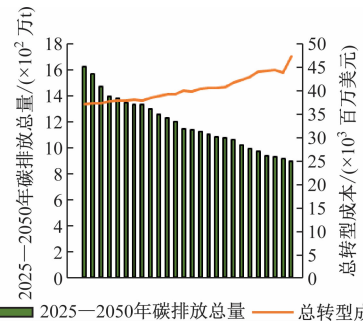


图 17 不同碳排放总量约束情景下的转型成本情况

Fig. 17 Transition costs under different total carbon emission constraints

## 6 结束语

船队绿色转型的核心影响因素有减排战略目标、碳排放交易体系、新造替代燃料船价格、船舶发动机节能改造价格、企业资本投入、燃料特性、减排效果和价格。船队的转型策略及总成本不仅受以上因素的综合影响,还受各替代燃料之间的价格竞争力影响。本文给出船队中每艘船舶在规划期内的绿

色转型策略,并根据所得结果进行分析,发现在只考虑 LNG、绿色甲醇、绿氨等 3 种替代燃料的情况下,LNG 是最合适的过渡燃料,但最终实现航运业绿色转型仍然需使用绿色甲醇、绿氨等具有高减排潜力的替代燃料。为能够顺利实现航运业绿色转型,政府与行业组织应当制定合理减排目标并配合相关激励政策,与企业协力实现航运业绿色转型。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 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 ( Part A ): 408-421.
- [ 2 ] WANG Z, DONG B, LI M, et al. Configuration of low-carbon fuels green marine power systems in diverse ship types and applications [ J ]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 302 : 118139.
- [ 3 ] AMPAH J D, YUSUF A A, AFRANE S, et al. Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector [ J ]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 320 : 128871.
- [ 4 ] REN J, LÜTZEN M. Fuzzy multi-criteria decision-making method for technology selection for emissions reduction from shipping under uncertainties [ J ]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 40 : 43-60.
- [ 5 ] TURCANU A L, GASPAROTTI C, RUSU E. Green fuels—a new challenge for marine industry [ J ]. *Energy Reports*, 2021, 7 ( 3 ): 127-132.
- [ 6 ] DUAN G, FAN T, CHEN L, et al. Floating marine debris mitigation by vessel routing modeling and optimization considering carbon emission and travel time [ J ]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 133 : 1-22.
- [ 7 ] ZHUGE D, WANG S, WANG D Z W. A joint liner ship path, speed and deployment problem under emission reduction measures [ J ]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 144 : 155-173.
- [ 8 ] LAGEMANN B, LAGOUVARDOU S, LINDSTAD E, et al. Optimal ship lifetime fuel and power system selection under uncertainty [ J ]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, 119 : 1-18.
- [ 9 ] CHISALE S W, LEE H S. Evaluation of barriers and solutions to renewable energy acceleration in Malawi, Africa, using AHP and fuzzy TOPSIS approach [ J ]. *Energy for Sustainable Development*, 2023, 76 : 1-13.
- [ 10 ] 张晓, 胡竟男. 基于 D-ANP 模型的绿色物流发展影响因素分析 [ J ]. *商业经济研究*, 2024, 11 : 89-92.  
ZHANG X, HU J N. Analysis of influencing factors of green logistics development based on D-ANP model [ J ]. *Journal of Commercial Economics*, 2024, 11 : 89-92. ( in Chinese )
- [ 11 ] FAN A, XIONG Y, YANG L, et al. Carbon footprint model and low-carbon pathway of inland shipping based on micro-macro analysis [ J ]. *Energy*, 2023, 263 : 1-16.
- [ 12 ] BARREIRO J, ZARAGOZA S, DIAZ-CASAS V. Review of ship energy efficiency [ J ]. *Ocean Engineering*, 2022, 257 : 1-15.
- [ 13 ] AMPAH J D, YUSUF A A, AFRANE S, et al. Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector [ J ]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 320 : 1-25.
- [ 14 ] SOLAKIVI T, PAIMANDER A, OJALA L. Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework [ J ]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 113 : 1-19.
- [ 15 ] STEFFEN B, BEUSE M, TAUTORAT P, et al. Experience curves for operations and maintenance costs of renewable energy technologies [ J ]. *Joule*, 2020, 4 ( 2 ): 359-375.
- [ 16 ] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [ J ]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6 ( 2 ): 182-197.
- [ 17 ] 张轩, 历一平. 绿色甲醇生产工艺技术经济分析 [ J ]. *现代化工*, 2023, 43 ( 3 ): 209-212.  
ZHANG X, LI Y P. Technological economic analysis on green methanol production process [ J ]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43 ( 3 ): 209-212. ( in Chinese )
- [ 18 ] 曾悦, 王月, 张学瑞, 等. 可再生能源合成绿氨研究进展及氢-氨储运经济性分析 [ J ]. *化工进展*, 2024, 43 ( 1 ): 376-389.  
ZENG Y, WANG Y, ZHANG X R, et al. Research progress of green ammonia synthesis from renewable energy and economic analysis of hydrogen-ammonia storage and transportation [ J ]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43 ( 1 ): 376-389. ( in Chinese )
- [ 19 ] 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 ( Part A ): 408-421.