

文章编号:1671-1637(2022)01-0240-10

基于显示性偏好数据的航运承运人应对全球 限硫令的选择偏好研究

白茜文¹, 侯尧¹, 杨冬²

(1. 清华大学 工业工程系, 北京 100084; 2. 香港理工大学 工商管理学院, 香港 999077)

摘 要: 建立了一个基于显示性偏好数据的航运承运人减排方案决策建模框架, 从实证角度研究了承运人的实际减硫方案选择机制; 基于 AIS 数据和其他相关数据库, 采用数据挖掘方法与计量经济模型, 综合考虑船舶特征、承运人特征和外部市场情况等方面共 11 个因素, 克服了已有文献关注经济因素、忽视非经济因素的局限, 系统分析了限硫令下承运人的应对措施选择。研究结果表明: 11 个因素均有助于解释承运人的能源选择, 但其影响程度各不相同; 各因素的修正效应量排序依次为距离新规实行的年限(3.957)、载重吨位(2.270)、船龄(1.711)、公司规模(1.579)、每吨燃料价差(1.456)、运价指数(1.442)、环保意识指数(1.353)、航速(1.243)、航程(1.172)、排放控制区航行占比(1.127)、贸易路线固定程度(1.108); 对于承运人的能源方案选择, 距离新规实行的年限和载重吨位对承运人决策产生了非常重要的影响, 修正效应量均大于 2.0; 船龄、公司规模、每吨燃料价差、运价指数和环保意识指数 5 个因素对于决策的影响程度适中, 修正效应量为 1.3~1.8; 其余 4 个与承运人运营模式相关因素虽然对于决策有一定影响, 但影响程度较小, 其修正效应量均小于 1.3。

关键词: 水路运输经济; IMO 排放监管; 离散选择模型; 能源选择; AIS 数据; 船舶行为

中图分类号: U6-9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19818/j.cnki.1671-1637.2022.01.020

A study on shipowners' selection preferences in response to global sulfur restrictions based on revealed preference data

BAI Xi-wen¹, HOU Yao¹, YANG Dong²

(1. Department of Industrial Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Faculty of Business, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: A decision-making modeling framework for the shipowners' emissions reduction plan based on the revealed preference (RP) data was established, and the selection mechanism for the shipowners' practically feasible plan for reducing the sulfur emissions was empirically investigated. Based on the AIS data and the data from other related databases, 11 factors from ship particulars, shipowner characteristics, and external market conditions were comprehensively considered. The limitations of existing literatures focusing on economic factors and ignoring non-economic factors were overcome, and the shipowners' selection of countermeasures under sulfur

收稿日期: 2021-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(72001123, 71971185); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2021A1515010699)

作者简介: 白茜文(1991-), 女, 山东济南人, 清华大学助理教授, 工学博士, 从事航运经济与航运大数据研究。

通讯简介: 杨冬(1980-), 男, 贵州贵阳人, 香港理工大学助理教授, 工学博士。

引用格式: 白茜文, 侯尧, 杨冬. 基于显示性偏好数据的航运承运人应对全球限硫令的选择偏好研究[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(1): 240-249.

Citation: BAI Xi-wen, HOU Yao, YANG Dong. A study on shipowners' selection preferences in response to global sulfur restrictions based on revealed preference data[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 240-249.

restrictions was systematically analyzed. Analysis results show that the 11 factors considered in this study, which exhibit varying degrees of effects, contribute to the interpretation of the shipowners' energy selection. In terms of the modified effect sizes, the factors are sequentially presented: the time period away from the implementation of the global sulfur restrictions (3.957), the deadweight tonnage (2.270), the ship age (1.711), the company size (1.579), the price difference per ton of the fuel (1.456), the freight rate index (1.442), the environmental awareness index (1.353), the speed of the ship (1.243), the voyage length (1.172), the proportion of sailing distance in the emission control area (1.127), and the trading route diversity (1.108). With regards to the shipowners' selection of an energy plan, the time period away from the implementation of the global sulfur restrictions and the deadweight tonnage significantly affect their decisions, and the modified effect sizes are more than 2.0. The five factors (i.e., the ship age, the company size, the price difference per ton of the fuel, the freight rate index, and the environmental awareness index) moderately affect their decisions, and the modified effect sizes are within 1.3-1.8. The other four factors related to the shipowners' operation patterns marginally affect their decisions, and the modified effect sizes are less than 1.3. 3 tabs, 30 refs.

Key words: economics of waterway transportation; IMO emission regulation; discrete selection model; energy choice; AIS data; ship behavior

Author resumes: BAI Xi-wen(1991-), female, assistant professor, PhD, xiwenbai@tsinghua.edu.cn; YANG Dong(1980-), male, assistant professor, PhD, dong.yang@polyu.edu.hk.

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (72001123, 71971185); Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (2021A1515010699)

0 引言

为减少日益严重的船舶废气污染,国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)要求自2020年1月1日起,全球海域内的船舶燃料最大含硫量从3.5%下降至0.5%。为满足更严格的排放规定,承运人需选择合适的船舶燃料减硫方案。IMO 2020新规将对航运市场和相关行业产生深远影响。据Yost^[1]估计,新规将给集装箱航运业带来高达100亿美元的额外成本。目前,可行的方案主要有3种:(1)使用硫含量低于0.5%的低硫燃油,承运人可全部使用低硫油(硫含量不大于0.5%)或者使用超低硫油和高硫油的混合物(混合燃料的总含硫量不大于0.5%);(2)使用液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)等替代燃料,LNG是清洁能源,可显著减少硫氧化物、氮氧化物和颗粒物的排放;(3)安装脱硫塔,脱硫塔能够从废气中除硫,因此,安装脱硫塔的船舶可继续使用硫含量较高的燃油。对于承运人自身而言,不同方案的成本差别很大,其能源决策将对其长期运营收入产生巨大影响,承运人的选择也将深刻影响燃料供应、加工、仓储以及脱硫塔制造、维护等相关行业的市场需求。

关于承运人的减排方案选择的相关研究有很多,其中多数采用成本收益分析法,从承运人的经济收益和成本视角来对比不同的减排方案^[2-4]。另有学者建立了减排方案选择的优化模型^[5-6]。此外,多准则决策模型(Multi-Criteria Decision Model, MCDM)也常用来解决航运能源选择问题^[7-9]。

然而,以上3种研究方法均存在局限性,这可能导致理论分析所考虑的情形与实际场景偏差较大,得出的结论很难正确指导业界实践。例如,优化模型或成本效益分析常需要对参数的取值或概率分布进行一定的假设和估计,若估计不精确会得到误导性的结果。此外,正如Balland等^[6]指出,大多数基于成本效益分析的研究忽略了非经济因素的作用,而实际上非经济因素对决策有重要影响。尽管MCDM方法可纳入非经济准则来解决这个问题,但Ren等^[9]指出,由于各准则的权重和各备选方案在某一准则上的评分通常是根据专家经验来确定的,该方法所得结论往往因为人为判断的模糊和主观性而不准确。另外,以往研究大多聚焦特定类型的货船或在特定区域航行的货船,如排放控制区(Emission Control Area, ECA)。但IMO 2020硫排放新规适用于全球海域,因此,这类研究无法反映

全球概况。现有研究主要基于叙述性偏好 (Stated Preference, SP) 数据, 而非显示性偏好 (Revealed Preference, RP) 数据。RP 和 SP 数据是交通领域中分析出行偏好时广泛使用的 2 个主要数据来源。RP 数据可以揭示研究对象的实际行为, 而 SP 数据侧重收集研究对象在假设选择场景下的行为。与 RP 数据相比, SP 数据通常涉及更多的偏差或会忽略现实情况, 因而现有研究很难客观、定量地反映各种影响因素对于承运人决策的实际相对影响大小和相对重要性, 但这实际是目前产业界和政策制定者非常关注的问题。

为克服现有研究的局限性, 本文旨在构建一个基于 RP 数据的承运人减排方案决策建模框架, 可以在全球尺度更客观全面地反映承运人的减排方案选择机制。该建模框架结合了 AIS 大数据处理、数据挖掘与统计分析和计量分析方法, 实证地揭示承运人的能源方案选择偏好。这种研究方法从因素选取、研究范围和研究客观性 3 个角度克服了已有研究的局限。在因素选取方面, 本文结合已有研究, 全面总结了船舶特征、承运人特征、市场与外部环境等影响承运人选择的各方面潜在因素, 并运用数据挖掘方法将运营模式等难以从传统数据库直接获得的因素量化, 克服了已有文献关注经济因素、忽视非经济因素的局限; 在研究范围方面, 不同于聚焦特定船型或特定区域的研究, 本文考虑全球尺度, 包括了各主要船型, 能够从总体上揭示全球承运人的选择机制; 在研究客观性方面, 本文对各因素在承运人能源方案决策中的相对重要性评估建立在 RP 数据和实证分析基础之上。与 MCDM、成本收益分析方法相比, 本文的模型参数更客观反映实际。

本文还拓展了 AIS 在船舶行为分析领域的应用。AIS 是航运研究的重要数据源, 被广泛应用于航运研究的各领域^[10], 如船舶航行^[11]、港口绩效分析^[12]、船舶排放^[13]、国际贸易统计与预测^[14]。目前, 在船舶行为特别是运营模式分析领域, AIS 相关应用仍然非常有限。基于此, 本文将 AIS 大数据处理与数据挖掘方法结合, 提出了一系列识别运营模式的新算法, 为今后该领域的研究提供了新的方法和工具。

1 研究方法

本文提出了一个由 3 个模块构成的综合分析框架。

模块 1 为因素选择。因素选择是相关研究的必

需步骤, 但以往研究存在因素选取不全面的问题。为此, 整合了已有文献、业界报告、新闻报道、行业经验等多方面信息源, 从船舶特征、承运人特征和市场与外部环境三大方面比较全面地归纳了决策可能涉及的因素。承运人特征进一步包含承运人运营模式、公司规模与环保意识三方面因素。

模块 2 为 AIS 数据挖掘。这一模块的主要目的是通过 AIS 数据提取承运人运营模式因素, 以便在模块 3 将这些因素纳入统计模型的考虑中。为了实现这一目的, 需要进行 2 项工作: 其一是数据处理, 与一般研究相比, 本文所使用的 AIS 数据具有噪声和异常值出现频率较高等特点, 因此, 有必要设计噪声和异常识别处理程序, 以解决离群值问题; 其二是数据挖掘, 即根据 AIS 数据提供的信息、结合数据挖掘算法, 来设计因素度量的算法, 从而提取出这些因素。

模块 3 为统计模型。使用了在交通研究领域广泛应用的离散选择模型并结合随机过抽样方法解决样本不平衡问题。

1.1 因素选择

1.1.1 船舶特征因素

船舶特征因素主要是指船舶的物理特征, 如船龄和载重吨位 (Dead Weight Tonnage, DWT), 这些特征可能会影响承运人的选择。Jiang 等^[15]指出, 当承运人面临安装脱硫塔还是使用低硫燃料的选择时, 船舶的剩余寿命越长, 承运人越可能安装脱硫塔, 因为安装的净收益会随剩余寿命的增加呈现指数增长; Lindstad 等^[2]则指出, 船舶越大, 承运人越愿意安装脱硫塔, 因为大船会消耗更多燃料, 使其更容易收回安装脱硫塔所投入的巨额初始资金, 因此, 本文提出如下假设。

假设 1: 承运人安装脱硫塔的概率随船龄增大而减小。

假设 2: 承运人安装脱硫塔的概率随船舶 DWT 增大而增大。

1.1.2 承运人特征因素

承运人特征因素主要分为三方面: 运营模式、公司规模和环保意识。

在本文中, 以下 4 个运营模式相关的因素可能会对承运人决策产生影响: 航速、航程、ECA 中航行占比与贸易路线固定程度。Norstad 等^[16]指出, 由于船舶燃料消耗量可以近似为航速的三次函数, 因此, 船速提升将显著增加船舶每年的燃料消耗量。同时高航速也将带来更高的硫排放^[17]。与传统的

高硫燃料相比,低硫燃料价格更高。在这种情形下,安装脱硫塔并且继续使用高硫燃料的方案变得更有吸引力。类似的,年平均航程越长意味着船舶每年花在航行而非停泊修整的时间越长,此类船舶每年消耗的燃料很多,因而安装脱硫塔更经济。Lindstad 等^[2]还指出,是否常在 ECA 内航行也是值得关注的一个因素。由于 ECA 区域对船舶排放有着非常严格的管制和惩罚机制,船舶在 ECA 区域内航行期间一般需要严格遵守排放规定,或安装脱硫塔,或使用低硫燃料。如果选择低硫燃料方案,那么在 ECA 区域内航行时间越久,所需要消耗的低硫燃料越多,成本也越高,因此,这类船舶的承运人可能更愿意安装脱硫塔。最后,Grimmer 等^[18]指出,脱硫塔设备是需要定期维修的,由于目前全球脱硫塔维修设施数量有限,且集中分布在北美、欧洲等几个区域,有固定航线的船舶可能比航线不固定的船舶更愿意安装脱硫塔。有固定航线的船舶有未来何时到达何地的时间表,可以合理地提前规划设备维护的时间和地点;而航线不固定的船舶无法提前规划设备维修,如果脱硫塔在航行途中出现故障,将很难就近找到合适的维修点,使用较为不便。由此,本文给出假设 3~6。

假设 3:承运人安装脱硫塔的概率随航速增大而增大。

假设 4:承运人安装脱硫塔的概率随航程增大而增大。

假设 5:船舶越频繁地在 ECA 中航行,承运人越有可能安装脱硫塔。

假设 6:船舶的贸易路线越固定,承运人越有可能安装脱硫塔。

公司规模也是需要考虑的一个因素。根据 Grimmer 等^[18]的研究,安装脱硫塔需要平均 400~500 万美元的初始投资。这意味着选择安装脱硫塔的承运人拥有较为充足的现金流量。对于一家小公司而言,投入这样一笔大额资金是难以做到且极具风险的。例如,如果船舶在安装脱硫塔后的短期内因一些偶发原因而报废,那么这笔初始投资将无法回本,这对于小公司而言是一笔巨额损失,甚至可能导致公司的现金流断裂及破产,因此,本文有理由假设:大公司有更强的资金管理能力,能够承担高额投资的风险,才更有可能安装脱硫塔。由此,本文给出假设 7。

假设 7:承运人安装脱硫塔的概率随承运人所在公司规模增大而增大。

此外,本文也将承运人的环保意识纳入了考虑。Le Fevre^[19]指出,承运人的环保意识和政府对环保的支持力度也会影响承运人的选择。环保意识的量化方式可详见 2.1 节。由此,本文给出假设 8。

假设 8:承运人安装脱硫塔的概率随承运人环保意识增强而增大。

1.1.3 市场与外部环境

除了船舶和承运人所具有的特征因素,市场与外部环境也可能影响承运人决策。

研究表明,高硫燃料与低硫燃料之间的价差在承运人的决策过程中起着非常关键的作用^[3]。价差较低时,选择低硫燃料方案的成本降低,该方案将更具有吸引力。此外,运价对承运人选择的影响也不容忽视。安装脱硫塔通常需要近一个月的时间,在此期间船舶停靠在船坞,无法装运货物,因此,高运价将导致船舶在安装期间蒙受重大的收入损失。在这种情况下,承运人往往会推迟其安装脱硫塔的计划。例如,根据 Khasawneh^[20]的研究,在 IMO 2020 硫排放新规(全球海域内的船舶燃料最大含硫量从 3.5%下降至 0.5%)实施之前,已有大量油轮计划安装脱硫塔,但由于 2019 年下半年运价意外飙升,这些油轮推迟了改造。由此,本文给出假设 9 和 10。

假设 9:承运人安装脱硫塔的概率随高硫燃料和低硫燃料的价差增大而增大。

假设 10:承运人安装脱硫塔的概率随运价增大而减小。

除 2 个市场相关的因素以外,距离 IMO 2020 硫排放新规实施的时间也可能是承运人决策时所考虑的因素。新规于 2020 年 1 月 1 日起正式实施,在此之后,仍未满足限排要求的船舶将被受到惩罚。与使用低硫燃料这一权宜策略相比,安装脱硫塔是减少船舶硫排放的长效措施。在新规实施日期临近的压力下,越来越多的承运人可能选择安装脱硫塔,以长效地解决硫排放问题。由此,本文加入距离新规实行的年限作为控制变量。

1.2 AIS 数据处理与挖掘

1.2.1 AIS 数据处理

本文使用 2017 年全年的 AIS 数据提取船舶的运营模式因素。船舶 AIS 收发机(A 类)发出的信息可分为 11 个数据字段,数据字段又可分为 3 类:静态信息、动态信息和航行相关信息。静态信息包括海上移动业务识别码、船舶 IMO 编号、船舶大小;动态数据包括船舶经纬度坐标、航速、转弯速度、航向、时间戳、航行状态;航线相关信息包括目的地、预期到达时

间和吃水。根据统计,本文所使用的 2017 年 AIS 数据的总存储规模达到约 4 TB,折算为数据条目约为 370 亿条。因为原始 AIS 数据存在大量噪声和错误信息,直接使用会导致估计结果不可靠^[21-22]。例如,AIS 设备可能存在报告异常的情况,当设备异常时,AIS 可能报告错误的经纬度坐标和航速。为此,本文设计了异常识别规则。

在处理航速异常问题时,由于绝大多数货船的航速不高于 20 kn,本文设定异常识别阈值为 20 kn,航速高于此阈值的观测视为异常,将从数据集中去除;处理经纬度异常问题时,本文采用如下识别机制。当报告的经纬度存在异常时,一般会出现经纬度突变的情况,即该观测报告的经纬度与该船报告的前一个观测明显不同。本文识别突变的方式如下:计算该观测与该船前一次观测的经纬度坐标间的距离,再计算该观测与该船前一次观测的时间差,二者相除算得该船在 2 次 AIS 报告之间的平均航速,如果航速超过了航速异常识别的阈值,则可以判断出这种位移在现实中不可能发生,从而确定该观测的经纬度报告存在异常,去除该观测。通过以上 2 种异常识别机制,数据质量、数据处理的精度和可靠性得到了保证。

1.2.2 AIS 数据挖掘

虽然有文献根据船舶运动轨迹的特征识别船舶活动模式^[23],但是模式划分较单一。本文希望利用 AIS 数据获取 4 个运营模式相关的因素,即航速、航程、ECA 中航行占比以及贸易路线固定程度。

为计算船舶航行中的平均速度,去除停靠时的观测,本文参照了 Jia 等^[24]提出的识别方法:当一艘船持续一段时间以低于 1 kn 的速度航行时,可以判断该船进行了一次停靠。本文将时间阈值设为 18 h,即如果一艘船持续 18 h 以上以低于 1 kn 的速度航行,则认为该船正在停靠。船舶平均单次航程的长度估计方法如下:在航速计算中,本文已经识别出了停靠点和航行中点。进一步定义单次航程为在全部 AIS 识别出的停靠点中时间上相邻的 2 个停靠点之间的轨迹,基于此,本文将单次航程中各相邻观测之间的地表距离进行累加,近似得出了这次航程的长度。最终,对各次航程的长度求平均,即可得到船舶长期的平均航程。本文用船舶在 ECA 内的观测在总观测中所占比例作为 ECA 中航行占比的代理。ECA 一般位于相关地区的沿海海域,在这些地区,距离海岸线 200 n mile 以内的海域或者特别规定的海域会列入 ECA。本文所考虑的 ECA 包括了北美

ECA 和欧洲 ECA,其具体范围依照 IMO 发布的 MARPOL Annex VI 第 14 条来确定^[25]。最后,本文提出对停靠点的经纬度坐标进行 K-means 聚类的算法,根据轮廓系数所反映的聚类效果来评估贸易路线固定程度。聚类效果好,则说明船舶的停靠港分布较为集中,即该船有规律地在某几个或某几簇固定的港口进行贸易;聚类效果差,则说明船舶进行贸易的港口较为分散,航路较为多样且不固定。

1.3 统计模型

1.3.1 Logit 离散选择模型

Logit 离散选择模型是刻画消费者偏好的经典模型,本文将其作为刻画承运人决策机制的基本模型。这一模型遵从 McFadden 随机效用理论,在面临多种选择时,消费者针对每个选择有相应的效用,而效用可建模为若干影响因素的函数,最终消费者会选择效用最高的方案。在本文背景下,承运人面临 3 种可行方案。由于使用 LNG 作为燃料的货船非常少,在 AIS 系统中报告数据的船舶更是不足 30 艘,难以用统计模型对其进行实证分析,因此,本文构建的 Logit 模型没有考虑 LNG 作为替代燃料这一方案,仅考虑使用低硫燃料和安装脱硫塔并继续使用高硫燃料这 2 种方案。

本文构建的 Logit 模型为面板 Logit 模型,该面板以各承运人为横截面、以月为时间序列的时间单位。由于在承运人尚未选择脱硫塔方案前,承运人每月都会面临使用低硫燃料和安装脱硫塔 2 种方案之间的选择,该承运人在该月所产生的数据点即被纳入为 Logit 模型的一个观测。但如果在某月,承运人决定安装脱硫塔,那么在该月之后的各月,该承运人产生的数据点都将不再被纳入为 Logit 模型的观测,因为其已经决定安装脱硫塔,不再面临 2 种方案间的选择。

模型的具体设定如下。假设在月份 t ,承运人 i 面临这样的决策:在方案 1(使用低硫燃料)和方案 2(安装脱硫塔并继续使用高硫燃料)之间选择。承运人将从每个方案中获得一定的效用。在 Logit 模型中,承运人 i 在月份 t 对方案 $j(j=1,2)$ 的效用 U_{ijt} 为

$$U_{ijt} = V_{ijt} + \epsilon_{ijt} \quad (1)$$

式中: V_{ijt} 为承运人 i 在月份 t 对方案 j 的确定性效用; ϵ_{ijt} 为随机误差项,代表了消费者效用中不确定、随机的部分,它满足独立同分布条件。

在这种形式的效用函数下,承运人 i 在月份 t 选择方案 j 的概率 P_{ijt} 为

$$P_{ijt} = \frac{e^{V_{ijt}}}{\sum_{j=1}^2 e^{V_{ijt}}} \quad (2)$$

其中,确定性效用 V_{ijt} 通常被假定为若干可观测变量的线性函数,即

$$V_{ijt} = \beta' X_{ijt}$$

式中: X_{ijt} 为承运人 i 在月份 t 对方案 j 的可观测变量矩阵; β' 为观测变量矩阵对应的参数向量。

在这一假设下,承运人 i 在月份 t 选择方案 j 的概率可以进一步表示为

$$P_{ijt} = \frac{e^{\beta' X_{ijt}}}{\sum_{j=1}^2 e^{\beta' X_{ijt}}} \quad (3)$$

1.3.2 随机过抽样

通过面板数据构造,本文构造的数据集包含 10 020 艘船及 216 331 个观测的面板数据集。而在全样本的 216 331 个观测值中,只有 686 个观测值选择安装脱硫塔。选择安装脱硫塔的观测远少于选择低硫燃料的观测,两类样本在数目上极不平衡。Wasikowski 等^[26]指出,样本不平衡可能导致预测精度下降、估计结果存在偏差。为解决这一问题,本文采用了 Menardi 等^[27]提出的随机过抽样(Random Over-Sampling Examples, ROSE)方法。ROSE 与传统的几种用于处理样本不平衡的过采样方法相比,具有一些数学性质上的优势。例如,简单过采样通过随机复制一些少数类样本、补充到少数类中,以实现样本平衡,但可能存在过拟合的缺陷。而 ROSE 基于核密度函数生成新样本,一方面使得新样本不会与原样本重复,缓解了简单过抽样的过拟合问题;另一方面,由于核密度函数是根据实际观测得出的,因此核密度函数较为接近真实的分布函数,所得到的补充后少数类样本也较为接近原本少数类的真实分布。

2 数据及描述性统计

2.1 数据

本文使用面板数据,该面板数据的横截面为各承运人,时间单位为月。关于横截面范围,本文的选择机制如下。首先,根据 Lloyd's List 数据库,能够获得全球范围内在营的全部船舶的详细信息。其次,本文根据研究需要对这些船舶进行预筛选,仅保留:海上移动业务识别码的船舶;集装箱船、散货船、原油油轮 3 类主流的货船船型;载重吨位大于 8 000 t 的船舶。因为安装脱硫塔需要一定空间,根据克拉克森研究服务^[28]所提供的脱硫塔安装信息,本文判

断吨位小于 8 000 t 的船舶可能因空间不足而无法安装脱硫塔。经过上述筛选,本文得到了 17 311 艘符合条件的船舶。但这些船舶中的一部分在 2017 年 AIS 数据中没有报告记录;也有一部分船虽有报告记录,但总记录条目少于 100 条,因而无法根据算法有效获取其运营模式因素;还有一部分船舶被算法识别出的停靠点小于 3 个,无法有效执行停靠点聚类算法。这些船舶都无法纳入研究范围内,因此去除。最终,本文得到了 10 020 艘满足条件的船舶。

关于时间范围,绝大多数承运人决定在 2018 年 1 月至 2019 年 10 月安装脱硫塔^[28],因此,本文的时间范围设定为 2018 年 1 月至 2019 年 10 月间的 22 个时间点。最终,10 020 艘船舶在 22 个时间点的决策共同构成了样本数为 216 331 的总样本。

总样本中的每一个观测都是一个 12 维向量,由承运人当期的能源选择和 11 维解释变量共同构成。被解释变量具体定义为:如果承运人当月决定安装脱硫塔,则记为 1,否则记为 0。需要注意的是,该数据源提供的是安装脱硫塔的时间,而非决定安装的时间。本文的处理方法是根据安装时间反推承运人决策的时间。根据 Kalyanaraman^[29]的研究,从承运人决定安装到实际安装脱硫塔,通常需要 6 个月,因此,本文将克拉克森研究服务^[28]所提供的安装时间前推 6 个月,来确定承运人决定安装脱硫塔的时间。船舶特征因素来源于 Lloyd's List 数据库,该数据库提供了船龄、载重吨位等详细的船舶信息。承运人特征因素中,4 个运营模式因素是从 2017 年 AIS 数据库获取的。公司规模是一个二值变量,如果公司为大公司,则记为 1,否则记为 0。该数据来源于 Bloomberg 数据库,该数据库提供了上市公司的市值信息,本文将航运业市值前 50 的公司定义为大公司。但需要注意的是,一些大公司没有上市,如果将这些公司误判为小公司,会导致该变量的系数估计结果有偏,因此,有必要将这些公司补充进大公司清单里。本文通过下面的方法对大公司列表进行了补充:由于公司规模与所拥有的船舶数量强相关,本文计算了各公司所拥有的总船数,如果其拥有船数多于市值前 50 的上市公司拥有船数的中位数,则将其视为大公司。通过上述方法,本文得到了相对合理的公司规模变量。承运人的环保意识则使用其所属船旗国的环保表现来代理。Hsu 等^[30]提出的环境绩效指数(Environmental Performance Index, EPI)是一种被广泛认可的评估国家环境绩效的方法,本文使用它作为体现环保意识的指标。市场与

外部环境因素中,高硫燃料(High Sulfur Fuel Oil, HSFO)与低硫燃料(Marine Gas Oil, MGO)之间的价差是从 Ship and Bunker 数据库得到的。由于全球范围内存在多个燃油市场,各市场的燃油价格有一定差异,本文选取了交易量较大的新加坡市场的燃油价格作为基准,具体来说,即计算了新加坡船用燃料油 BK380-B-SIN 和船用轻柴油 MGO-B-SIN 日价差的月平均值。货船运价由波罗的海干散货运价指数来代表,该指标从波罗的海交易(Baltic Exchange)所获得。各市场变量在统计模型中均取滞后一期值。

2.2 描述性统计

表 1 按照承运人的能源方案选择,分类报告了各因素的均值和标准差。可以看出,多数因素均存在较明显的组间差异,且这些差异与上节给出的 11 个假设基本吻合。

表 1 描述性统计
Table 1 Descriptive statistics

因素	均值		标准差	
	使用低硫燃料	安装脱硫塔	使用低硫燃料	安装脱硫塔
船龄/年	11.205	8.475	6.607	4.013
载重吨位/百万吨	0.076	0.132	0.061	0.073
航速/kn	11.307	11.917	2.317	2.625
航程/ 10^3 km	2.374	2.935	1.487	1.538
ECA 中航行占比/%	0.098	0.130	0.262	0.291
贸易路线固定程度	0.732	0.739	0.145	0.140
公司规模	0.416	0.694	0.493	0.461
环保意识指数	60.504	64.874	12.523	13.220
每吨燃料价差/美元	211.158	207.380	32.845	25.401
运价指数	1.327	1.179	0.395	0.397
距离新规实行的年限	1.137	0.749	0.526	0.312

3 实证结果

表 2 给出了 Logit 模型的回归结果。其中,模型 1 为包含全样本的回归结果,模型 2 则使用了结合 ROSE 和随机抽样技术得到的平衡后样本,样本数为 20 000。这些样本中,选择安装脱硫塔的样本数与选择使用低硫燃料的样本数之比约为 1:1。

表 2 中,***、** 和 * 分别表示在 1%、5% 和 10% 的显著性水平下显著,括号内报告了标准差。相比模型 1,模型 2 的总增益(与常数概率模型相比,现模型在预测正确率上的提高幅度)、百分比增益(在常数概率模型预测错误的全部观测中,被现

表 2 模型估计结果

Table 2 Model estimation results

因素	模型 1	模型 2
船龄/年	-0.094 3*** (0.009 3)	-0.097 7*** (0.004 0)
载重吨位/百万吨	8.30*** (0.45)	11.38*** (0.31)
航速/kn	0.046 5** (0.018 0)	0.087 5*** (0.008 6)
航程/ 10^3 km	0.067 6** (0.028 3)	0.103 5*** (0.013 9)
ECA 中航行占比/%	0.311** (0.135)	0.432*** (0.067)
贸易路线固定程度	0.441 (0.277)	0.716*** (0.133)
公司规模	0.882*** (0.086)	0.919*** (0.038)
环保意识指数	0.025 9*** (0.003 1)	0.023 1*** (0.001 4)
每吨燃料价差/美元	0.017 5*** (0.001 8)	0.012 9*** (0.000 7)
运价指数	-0.715*** (0.095)	-0.911*** (0.046)
距离新规实行的年限	-2.817*** (0.124)	-2.907*** (0.054)
常数项	-9.047*** (0.532)	-2.951*** (0.232)
观测数	216 331	20 000
麦克法登可决系数	0.160 4	0.356 7
预测正确率/%	99.68	78.88
预测错误率/%	0.32	21.12
总增益/%	0.00	28.68
百分比增益/%	0.00	80.07
AUC 值	0.500	0.789

模型正确预测的观测所占的百分比)均得到了大幅度提升。

可以看出,2 个模型得到的回归结果均符合前面所作出的全部假设,且各因素系数均较为显著。随着船龄增大,承运人越来越难以在剩余的生命周期内收回脱硫塔所需的巨额初始投资,因此不倾向于安装脱硫塔,这验证了假设 1。随着载重吨位、航速、航程的增加,船舶每年的燃油消耗增加。与高硫燃料相比,低硫燃料的价格更高,因此,当燃料消耗较大时,与使用低硫燃料相比,安装脱硫塔并继续使用高硫燃料变得具有吸引力,这证实了假设 2~4。由于船舶在 ECA 中航行时将受到非常严格的硫排放监管,船舶在这些区域内一般需要严格遵守排放规定,或安装脱硫塔,或使用低硫燃料。而如果选择

低硫燃料方案,那么在 ECA 区域内航行时间占总航行时间的比例越大,所需要消耗的低硫燃料就越多,选择该方案的成本越高,因此,这类船舶的承运人可能更愿意安装脱硫塔。统计模型中 ECA 中航行占比系数显著为正,则验证了这一点,符合假设 5。与贸易路线多样的船舶相比,路线固定的船舶可以更方便地规划脱硫塔维护的时间地点,因此更倾向于安装脱硫塔,验证了假设 6。公司规模越大,资金管理能力越强,越能够承担脱硫塔所需的大额初始投资,因此更倾向于安装脱硫塔,验证了假设 7。与使用低硫燃料这一权宜策略相比,安装脱硫塔是解决硫排放问题的长效措施,因此环保意识越强的承运人往往更倾向于积极采取措施、安装脱硫塔,以应对限排新规,验证了假设 8。当高硫油和低硫油的价差增大时,使用低硫燃料这一方案的成本增加,承运人转而选择安装脱硫塔并继续使用高硫油,验证了假设 9。安装脱硫塔需要一段时间,期间船舶无法运货,当近期运价升高时,承运人会认为安装脱硫塔会造成高额的营收损失,因而不愿选择在当期安装脱硫塔,验证了假设 10。最后,随着新规实行日期的临近,承运人会感受到越来越大的减排压力,在这种压力的推动下,承运人更有可能决定安装脱硫塔,以长效地解决该船的硫排放问题,验证了假设 11。综上,1.1 节提出的全部假设已均得到实证证据的支持,研究结论符合预期。

与模型 1 相比,模型 2 系数显著性、反映模型解释效力的麦克法登可决系数(表示与仅保留截距项的模型相比,现模型的对数似然值的改进程度,其值越高,模型的解释效力越强)、反映模型预测能力的 AUC 值(反映分类器预测能力的常用指标,取值在 0.5~1.0,取值越高,模型预测效果越好,一般认为 AUC 值达到 0.7 以上时,分类效果达标)均有较大提升,麦克法登可决系数提高约 0.2,AUC 值提高约 0.3,这说明了样本平衡处理的必要性和有效性。

根据表 2 已经可以得出,回归结果满足 1.1 节提出的假设,但通过 t 检验,只能拒绝系数为 0 的假设,即只能判断出该因素对承运人决策有显著影响,并可以得到影响的方向,但无法定量地得到各因素的相对重要性,即各因素对承运人决策的影响大小。本文采用了效应量这一指标来评估各因素的相对重要性。设承运人选择安装脱硫塔的概率为 p ,记该承运人相对于参照方案的胜算比为 $\frac{p}{1-p}$ 。效应量用来计算每增加 1 单位标准差,胜算比的倍数变化。

例如,船龄的标准差为 5.497 年,效应量为 0.585,则表示船龄每增加 5.497 年,胜算比变为原来的 0.585 倍。在效应量计算过程中,各因素单位不统一的问题通过引入标准差得到了解决。但由于一些因素对于因素呈负向影响,其效应量小于 1,而呈正向影响的因素,其效应量大于 1,2 组因素的相对重要性无法通过数值直观比较。为了使相对重要性的比较更为直观,本文进一步对呈负向影响的因素进行了取负操作,重新进行效应量估计,从而得到了修正效应量,本文可以直接根据修正效应量的数值大小来判断该因素的影响大小。最终估计结果如表 3 所示。

表 3 模型 2 中各因素的效应量与修正效应量
Table 3 Effect sizes and modified effect sizes of factors in model 2

因素	标准差	效应量	修正效应量
船龄/年	5.497	0.585	1.711
载重吨位/百万吨	0.072	2.270	2.270
航速/kn	2.489	1.243	1.243
航程/ 10^3 km	1.532	1.172	1.172
ECA 中航行占比/%	0.277	1.127	1.127
贸易路线固定程度	0.143	1.108	1.108
公司规模	0.497	1.579	1.579
环保意识指数	13.087	1.353	1.353
每吨燃料价差/美元	29.252	1.456	1.456
运价指数	0.402	0.694	1.442
距离新规实行的年限	0.473	0.253	3.957

从表 3 中的修正效应量可以看出:对于承运人的能源方案选择,各因素的相对重要性排序依次为距离新规实行的年限(3.957)、载重吨位(2.270)、船龄(1.711)、公司规模(1.579)、每吨燃料价差(1.456)、运价指数(1.442)、环保意识指数(1.353)、航速(1.243)、航程(1.172)、ECA 中航行占比(1.127)、贸易路线固定程度(1.108)。其中,距离新规实行的年限和载重吨位对承运人决策产生了非常重要的影响;船龄、公司规模、每吨燃料价差、运价指数和环保意识指数 5 个因素对于决策的影响程度适中;4 个运营模式相关因素包括航速、航程、ECA 中航行占比、贸易路线固定程度虽然对于决策有一定影响,但影响程度较小。

本文的实证结果从承运人自身、上下游产业和政策制定 3 个角度为业界实践提供了启示。首先,对于承运人个人而言,本文为其提供了完整的能源方案决策框架,承运人可以根据本文提供的统计模型预测出最适合自身处境的能源方案,以应对 IMO 2020 硫排放新规。在实际决策中,承运人往往会基

于各方面因素判断应选择哪一种能源方案,但这种判断更多是基于经验和直觉的,缺乏客观、量的方法和标准。本文则为其提供了一个决策框架,承运人可以根据自身的船舶特征因素、承运人特征因素和当时所处的市场与外部环境,确定因素的取值。不同于以往的主观和经验判断,这一决策是基于实证证据和定量计算而得到的,较为客观可靠。

其次,本文可以让航运业上下游产业的各利益相关方了解到承运人能源决策时的关键影响因素,这些产业的从业者可以据此制定相应的策略,以增加其经济收益。例如,脱硫塔供应商可根据当月市场上处于在营船舶的特征、承运人特征、当月的燃油价格和运价指数等市场因素,对各船舶安装脱硫塔的可能性进行评估,以预测当期航运市场对脱硫塔安装的总需求及其变化趋势,从而更合理地编制其生产计划和物料采购安排,降低成本、提高收益。再例如,本文提供的实证结果还为相关产业从业者提供精确的用户画像,相关从业者可以通过这些实证结果更清晰地了解其主要的消费者群体所具有的共同特征,从而挖掘潜在的客户、进行精准营销或为目标群体提供更符合其偏好、满意度更高的服务。比如,实证结果表明,安装脱硫塔的船舶一般具有小船龄、大载重吨位、高航速、长航程、相对固定的航线,更可能来自高环保表现的国家、归属于大公司,供应商可以据此制定一系列相应的策略。

最后,研究结果为政策制定提供参考。船舶硫排放具有明显的负外部性,某一船舶的排放虽然方便了船舶自身,但破坏了环境,造成了其他人的福利损失,导致社会总福利的损失。为了使社会福利最大化,决策者需要制定政策以减少排放。但政策的出台往往需要一定成本,比如环保燃料补贴政策即需要政府提供补贴。因此,政策制定者需要制定有效的政策,以尽量小的代价换取尽量多的减排,从而实现社会福利最大化。而只有真正了解承运人决策的偏好,才能够制定出有效的政策。本文的实证结果能够定量地给出承运人决策时各因素的相对重要性大小,从而帮助政策制定者了解承运人真正关心的因素、制定更有针对性的政策。例如,如果政府希望推广安装脱硫塔以长效地解决船舶减排问题,那么对小船龄、大吨位、属于大公司的船舶给予定向的安装补贴,则可能会收到可观的政策效果。实证结果也表明,载重吨位、航速、航程等燃油消耗相关因素是承运人在选择能源方案时主要考虑的因素之一,对于致力于推广使用清洁能源的国家而言,这一

结果启示提供低硫燃料补贴可能是一项有效的激励政策。此外,贸易路线不固定的船舶安装脱硫塔的可能性较小,这表明目前脱硫塔维护设施有限的数量和集中分布于少数地区的特点,可能已经阻碍了越来越多的船只安装脱硫塔。如果政府希望以安装脱硫塔为限制船舶排放的主要应对措施,那么政府应为脱硫塔维护基础设施的发展提供更多政策支持,以帮助建立更方便的全球脱硫塔维护网络。此外,如果所在国家在环保政策和环境保护方面表现良好,那么承运人也往往会积极采取减排措施,政府可以通过增强环保相关的政策支持和环保宣传,帮助承运人形成环境意识,从而更有效地控制排放。

4 结 语

(1)本文结合 AIS 数据处理、数据挖掘、统计分析等跨学科的方法,提取显示性偏好数据,从船舶特征、承运人特征和市场与外部环境 3 个层面的 11 个因素中揭示了承运人应对排放控制政策不同战略选择的影响。

(2)船舶的卫星数据覆盖面大,数据粒度高,合理地卫星数据进行分析 and 有效提取,并结合其他相关数据库,可极大地丰富国际航运和贸易实证研究的可能性,有助于提升中国航运业管理水平。

(3)随着更多的船舶使用清洁能源作为燃料,后续研究可以将更多清洁能源方案纳入模型中;另一方面,承运人存在背景,运营方式的不同,后续研究也可以将承运人的异质性考虑到模型中去,从而更精确地揭示承运人的选择行为。

参 考 文 献 :

References :

- [1] YOST T. Container-shipping industry needs to offset \$ 10 billion[R]. New York: AlixPartners, 2019.
- [2] LINDSTAD H, SANDAAS I, STRØMMAN A H. Assessment of cost as a function of abatement options in maritime emission control areas[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 38: 41-48.
- [3] ZIS T, ANGELOUDIS P, BELL M G H, et al. Payback period for emissions abatement alternatives: role of regulation and fuel prices[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2549(1): 37-44.
- [4] ZHU M, LI K X, LIN K C, et al. How can shipowners comply with the 2020 global sulphur limit economically? [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 79: 102234.
- [5] PATRICKSSON Ø, ERIKSTAD S O. A two-stage optimization approach for sulphur emission regulation compliance[J].

- Maritime Policy and Management, 2017, 44(1): 94-111.
- [6] BALLAND O, GIRARD C, ERIKSTAD S O, et al. Optimized selection of vessel air emission controls—moving beyond cost-efficiency[J]. Maritime Policy and Management, 2015, 42(4): 362-376.
- [7] YANG Zai-li, ZHANG Di, CAGLAYAN O, et al. Selection of techniques for reducing shipping NO_x and SO_x emissions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2012, 17(6): 478-486.
- [8] SCHINAS O, STEFANAKOS C N. Selecting technologies towards compliance with MARPOL Annex VI: the perspective of operators[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2014, 28: 28-40.
- [9] REN J Z, 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.
- [10] YANG Dong, WU Ling-xiao, WANG Shuai-an, et al. How big data enriches maritime research—a critical review of automatic identification system (AIS) data applications[J]. Transport Reviews, 2019, 39(6): 755-773.
- [11] HANSEN M G, JENSEN T K, LEHN-SCHJØLER T, et al. Empirical ship domain based on AIS data[J]. Journal of Navigation, 2013, 66(6): 931-940.
- [12] 廖诗管, 杨冬, 白茜文, 等. 基于船舶大数据的港口装卸效率值计算方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(2): 217-223.
- LIAO Shi-guan, YANG Dong, BAI Xi-wen, et al. Estimation method of port handling efficiency value based on ship big data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(2): 217-223. (in Chinese)
- [13] WINTHER M, CHRISTENSEN J H, PLEJDRUP M S, et al. Emission inventories for ships in the Arctic based on satellite sampled AIS data[J]. Atmospheric Environment, 2014, 91: 1-14.
- [14] ADLAND R, JIA Hai-ying, STRANDENES S P. Are AIS-based trade volume estimates reliable? the case of crude oil exports[J]. Maritime Policy and Management, 2017, 44(5): 657-665.
- [15] JIANG Li-ping, KRONBAK J, CHRISTENSEN L P. The costs and benefits of sulphur reduction measures: sulphur scrubbers versus marine gas oil[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2014, 28: 19-27.
- [16] NORSTAD I, FAGERHOLT K, LAPORTE G. Tramp ship routing and scheduling with speed optimization[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2011, 19(5): 853-865.
- [17] 楼狄明, 包松杰, 胡志远, 等. 基于实船油耗与排放的拖轮航速优化[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(1): 93-100.
- LOU Di-ming, BAO Song-jie, HU Zhi-yuan, et al. Cruise speed optimization of tugboat based on real fuel consumption and emission[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(1): 93-100. (in Chinese)
- [18] GRIMMER R, MYERS M. IMO 2020, Part 2: shipowners' perspective[R]. London: IMO, 2019.
- [19] LE FEVRE C. A review of demand prospects for LNG as a marine transport fuel[R]. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies, 2018.
- [20] KHASAWNEH R. Tankers defer retrofits to cash in on record freight rates[R]. Singapore: Reuters, 2019.
- [21] YANG Dong, WU Ling-xiao, WANG Shuai-an. Can we trust the AIS destination port information for bulkships? — Implications for shipping policy and practice[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 149: 102308.
- [22] 刘兴龙, 初秀民, 马枫, 等. AIS报文异常动态信息甄别方法[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(5): 142-150.
- LIU Xing-long, CHU Xiu-min, MA Feng, et al. Discriminating method of abnormal dynamic information in AIS messages[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(5): 142-150. (in Chinese)
- [23] 魏照坤, 周康, 魏明, 等. 基于AIS数据的船舶运动模式识别与应用[J]. 上海海事大学学报, 2016, 37(2): 17-22, 71.
- WEI Zhao-kun, ZHOU Kang, WEI Ming, et al. Ship motion pattern recognition and application based on AIS data[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2016, 37(2): 17-22, 71. (in Chinese)
- [24] JIA H Y, ADLAND R, PRAKASH V, et al. Energy efficiency with the application of Virtual Arrival policy[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 54: 50-60.
- [25] IMO. Prevention of air pollution from ships[R]. London: IMO, 2011.
- [26] WASIKOWSKI M, CHEN X W. Combating the small sample class imbalance problem using feature selection[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2010, 22(10): 1388-1400.
- [27] MENARDI G, TORELLI N. Training and assessing classification rules with imbalanced data[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2014, 28(1): 92-122.
- [28] MARTINSEN C. Alternative fuels insight platform[R]. Oslo: DNV, 2019.
- [29] KALYANARAMAN M. Cutting time and cost on a scrubber retrofit[R]. London: Riviera Maritime Media, 2019.
- [30] HSU A, ZOMER A. Environmental performance index (EPI)[J]. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online, DOI: 10.1002/9781118445112.stat03789.pub2.