

绿色港口与航运管理研究综述

镇璐¹, 诸葛丹², 汪小帆¹

(1. 上海大学 管理学院, 上海 200444; 2. 香港理工大学 商学院 物流及航运学系, 香港 999077)

摘要 港口与航运运营活动已经引起严重的环境问题。为了实现港口与航运业减排的目标, 系统地分析如何构建绿色港口和绿色航运运营系统显得尤为重要。本文从绿色港口、绿色航运和绿色海事政策三个方面对港口与航运业节能减排的相关文献进行了总结。绿色港口问题包括港口管理和港口技术; 绿色航运问题包括航运管理和航运技术; 绿色海事政策问题包括一些现有的政策和措施及其对航运业和环境的影响。本文也提出了一些未来的研究方向, 包括绿色港口导向的研究、绿色航运导向的研究和排放政策导向的研究。

关键词 绿色港口; 绿色航运; 海事政策; 减排技术

Researches on green ports and shipping management: An overview

ZHEN Lu¹, ZHUGE Dan², WANG Xiaofan¹

(1. School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Department of Logistics and Maritime Studies, Faculty of Business, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract The frequent shipping activities have caused severe environmental problems. To realize the goal of emission reduction in shipping, it is important to implement a systematic analysis on how to achieve green ports and green shipping. This paper summarizes the literature on energy savings and emission reduction in shipping from three perspectives, i.e., green ports, green shipping, and green maritime policies. The green ports issues include port management and port technologies; the green shipping issues analyze shipping management and shipping technologies; the green maritime policy issues cover some existing policies and measures and their impacts on shipping industry and environment. This paper also identifies some research gaps and outlines some potential research opportunities, including green port oriented studies, green shipping oriented studies, and emission policy oriented studies.

Keywords green ports; green shipping; maritime policy; emission reduction technology

1 引言

航运业在国际贸易的发展中起着重要的作用, 超过 80% 的国际货运量通过海上运输完成^[1]。海运被誉为最清洁和环境友好的运输模式之一, 每千米耗油量只有陆运的 1/7。随着航运业的快速发展, 其在推动经济发展的同时也带来了严重的环境问题。据国际海事组织 (international maritime organization, IMO) 报告^[2], 全球海运每年约消耗 3 亿吨的燃油, 这些燃油在燃烧过程中会排放出大量的尾气, 包括二氧化硫 (sulfur dioxide, SO₂)、氮氧化物 (nitrogen oxide, NO_x)、二氧化碳 (carbon dioxide, CO₂) 和颗粒物 (particulate matter, PM)。

收稿日期: 2019-12-29

作者简介: 镇璐 (1981-), 男, 湖北宜都人, 教授、院长, 博士生导师, 研究方向: 港口与航运物流, E-mail: lzhen@shu.edu.cn; 诸葛丹 (1991-), 女, 浙江金华人, 博士, 研究方向: 绿色航运优化, E-mail: dan.zhuge@connect.polyu.hk; 汪小帆 (1967-), 男, 江苏句容人, 副校长、教授, 博士生导师, 研究方向: 系统工程与复杂网络, E-mail: xfwang@shu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (71831008)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (71831008)

中文引用格式: 镇璐, 诸葛丹, 汪小帆. 绿色港口与航运管理研究综述 [J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(8): 2037-2050.

英文引用格式: Zhen L, Zhuge D, Wang X F. Researches on green ports and shipping management: An overview[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2020, 40(8): 2037-2050.

更为严重的是, 70% 的船舶尾气排放放在距离海岸线 400 千米以内的近海区域, 对沿海居民的身体健康极为不利。其中, 航运业每年产生的 SO_2 占全球总排放量的 13%, 导致全球至少 8 万人早逝; 航运业 CO_2 的排放放在 2007 年和 2012 年分别占全球总排放的 3.5% 和 2.6%^[2]。航运业排放的污染物及其对全球环境的影响已受到广泛的关注, 构建绿色港口和绿色航运网络已成为学术界和航运业的热点话题。

为了实现港口和航运的绿色化, 港口和船舶相关设备的技术研究和创新至关重要, 港口和航运管理方面的优化也是减排和改善环境的重要途径。在管理科学理论和工业实践发展的过程中, 港口和航运管理方面的技术也随之发展, 航运业的生产率和服务水平有了大幅提升, 有利于绿色和高效的港口和航运网络的构建。然而, 在港口和航运的排放控制方面, 相关的研究在学术界和航运业都还没有完整的体系, 意味着目前仍没有完善的运营管理的方法和理论可用于提升运营效率以及节能和减排, 这是一个亟待解决的问题。

近年来, 政府加强了对各行业减排工作的管理, 港口运营商和航运公司在提升服务水平的同时也在逐步实施减排计划。本文结合航运绿色化的目标, 从三个方面归纳航运业节能减排的相关文献, 分别是绿色港口、绿色航运和绿色海事政策。在分析已有文献的基础上, 本文进一步提出了关于绿色港口和航运网络的未来研究方向, 这些提议不仅有利于学者拓展该领域的理论研究和完善航运业排放控制的方案, 而且能够促使港口运营商、航运公司和政府将减排的目标结合到具体的航运活动中。

2 绿色港口

集装箱的装卸、转运和存贮等过程都离不开港口。船舶在港口外部区域的停泊和导航活动也会产生污染物, 因此需要将港口运营效率的提升和绿色港口的管理相结合。本章节对绿色港口管理和绿色港口技术的相关文献进行了分析和评价。

2.1 绿色港口管理

绿色港口的构建是航运业节能减排的关键。目前已有很多学者从不同角度对港口管理问题进行了研究且已获得了一些有意义的成果, 本小节将对这些文献进行总结和梳理, 以便学者们基于现有的成果对绿色港口管理问题进行更深入的探索和研究。通过分析和归纳, 我们将这些文献分为三大类: 港口运营、港口管理和发展战略以及港口绩效评估。

港口运营是航运业中一个典型的研究方向, 其决策包括泊位分配^[3]、岸桥调度和分配^[4,5]、场桥调度和分配^[6,7]以及内卡调度^[8]。在考虑燃油消耗和排放等问题的基础上, 绿色港口运营的相关研究仍沿用与传统港口运营类似的研究思路, 并重点研究了上述决策问题。常用于港口运营研究的建模方法包括混合整数规划 (mixed integer programming, MIP)、混合整数非线性规划 (mixed integer non-linear programming, MINLP) 和混合整数二阶锥规划 (mixed integer second-order cone programming, MISOCP), 常见的求解这些模型的算法有局部分支 (local branching, LB)、粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO)、遗传算法 (genetic algorithm, GA) 等启发式算法和一些精确解算法。大量文献关注泊位作业优化问题。Du 等^[9] 研究泊位分配问题时考虑燃油消耗和船舶尾气排放, 并构建了一个 MISOCP 模型。Venturini 等^[10] 处理多港口间的泊位分配问题并分析航行速度优化对于操作时间、燃油消耗和尾气排放的影响。Hou^[11] 考虑岸电的应用, 提出一个 MINLP 模型用于研究动态泊位分配问题。Dulebenets 等^[12] 将混合进化算法运用到泊位调度问题中, 其目标是最小化集装箱装卸设备的 CO_2 排放量。岸桥和场桥优化问题也是该领域的研究热点。He 等^[13] 基于 GA 和 PSO 设计了一个混合优化算法, 以用于求解岸桥、内卡和场桥联合调度问题, 其目标是避免船舶延误和最小化操作过程的能耗。He^[14] 着眼于节能和省时, 运用文化基因算法求解泊位分配和岸桥联合优化问题。Yu 等^[15] 和 Talavera 等^[16] 分别构建 MINLP 和 MIP 模型求解岸桥调度问题。de Oliveira 等^[17] 将贪婪随机自适应搜索算法应用到岸桥调度和分配的多目标优化问题中。Peng 等^[7] 关注与碳减排相关的场桥调度问题, 通过将数学模型和仿真模型相结合, 提出了在类似情况下其它港口的通用模型。基于排队论, Liu 和 Ge^[18] 提出了岸桥分配的数学规划模型, 以最小化卸货过程中的 CO_2 排放和能耗。

港口的管理和发展战略是学者们普遍关注的问题。传统的文献主要关注以下几个方面: 政策评估^[19,20]、技术评价^[21] 和管理系统更新^[22], 关于港口管理绿色化的研究也主要从这三个方面展开。很多学者对港口的发展进行了分析, 并提出了相应的建议和措施。Na 等^[23] 应用不可分割松弛测度模型分析我国港口的环境

效率, 并基于分析结果提出了相应的政策. Zheng 等^[24] 针对港口货物装卸活动提出排放监管模型, 并将其应用于上海港, 研究结论有助于提高港口效率. Kang 和 Kim^[25] 基于东北亚主要港口的数据, 开发了一个改善港口运营的五维模型, 以支持可持续发展战略的实施. Kim 和 Chiang^[26] 关注港口运营中可持续性战略的实施并提出相应的措施促进其发展. de Moura 等^[27] 建立了基于自诊断方法的评价模型, 并重点关注尾气减排问题. Peng 等^[28] 根据模拟实验数据, 评价设施配置变化引起的碳减排, 并分析不同因素对碳减排的影响. 港口管理系统的更新和新技术的发展也具有一定的研究价值. Lam 和 Notteboom^[29] 从可持续性角度分析亚洲和欧洲港口管理工具的情况. Erdas 等^[30] 基于生态足迹分析情况, 研究环境管理战略对利马索尔港口的影响. García-Onetti^[31] 主要调查了环境管理与港口管理的关联性. Di Vaio 和 Varriale^[21] 用管理会计工具加快港口可持续发展的进程.

当减排目标与港口绩效相结合时, 港口绩效评估不仅包括社会方面和经济方面, 还涉及环境方面^[32,33]. Asgari 等^[32] 根据港口利益相关者和专家的意见, 运用层次分析法对英国港口的可持续发展进行评价, 并运用相应的敏感性分析对评价结果进行判断. Puig 等^[34] 开发了一种用于识别重大环境因素的新工具. Yang^[35] 运用层次分析法建立了一套评价指标体系, 并运用灰色关联分析对远东地区港口的可持续发展绩效进行了评估. Chang 和 Park^[36] 运用一个新的数据包络分析模型研究韩国在监管政策下的减排情况. Antão 等^[37] 采用 bottom-up 方法分析港口绩效, 用 top-down 方法整合港口利益相关者的意见, 并在此基础上, 从职业、健康、安全、安保和环境等方面制定了一系列关键绩效指标. 基于环境指标、社会指标和经济数据, Pappaefthimiou 等^[38] 从环境和经济角度提出了评价港口绩效的方法. Laxe 等^[39] 运用全球可持续发展综合指数, 从经济、制度、环境和社会等角度分析西班牙港口的绿色化发展情况. Wan 等^[33] 综合考虑驱动力、压力、状态、影响和反应这些因素来评价港口的可持续发展进程, 并运用层次分析法和证据推理法构建评估模型. Di Vaio 等^[40] 从节能和可持续发展的角度, 基于平衡计分卡模型, 制定适用于意大利港口的关键绩效指标. Sim^[41] 关注韩国港口的碳排放评估问题, 并基于系统动力学方法提出了一个碳排放估算模型.

由以上分析可知, 绿色港口管理的研究从传统港口管理问题的主要关注点出发, 并同时考虑了环境方面的因素. 学者们已将减排问题结合到港口操作管理的各个方面, 这些研究成果不仅有理论价值, 还可能应用于港口管理实践中, 然而, 现有研究往往只着眼于某几个因素, 缺乏对绿色港口构建问题的综合分析, 开发更为全面、动态的港口成果评价系统是一个亟待解决的问题.

2.2 绿色港口技术

绿色港口技术为港口减排工作做出了重大贡献. 关于绿色港口技术的研究集中于岸电设备、绿色能源技术和自动化集装箱码头系统三个方面, 其中, 绿色能源技术主要包括电气化、储能系统和可再生能源, 而自动化集装箱码头系统主要包括自动引导车 (automated guided vehicle, AGV)、自动装载机 (automated lifting vehicle, ALV) 和自动堆垛起重机 (automated stacking crane, ASC).

岸电设备是一种行之有效的减少港口船舶污染物排放的技术. Ballini 和 Bozzo^[42] 评价采用岸电技术对周边城市社会和经济的影响. 为了减少航运排放和改善港口城市的环境, Tseng 和 Pilcher^[43] 对岸电设备进行了研究. Sciberras 等^[44] 旨在通过应用岸电技术减少船舶在泊位停靠时的排放. Kotrikla 等^[45] 考虑在可持续港口发展中使用岸电设备和可再生能源的潜力. 研究表明, 采用岸边设备可以有效缓解港口对城市的负面影响. Vaishnav 等^[46] 提出一个综合模型用于评估采用岸电技术所引起的排放和成本的变化. Winkel 等^[47] 考虑在港口配备岸电的可能性, 以减少排放及改善经济和环境发展. 为了控制总成本和减少排放, Innes 和 Monios^[48] 分析了在港口特别是中小型港口采用岸电设备的前景. Zis^[49] 研究了在港口安装岸电设备以减少排放的潜力, 提出了基于 bottom-up 的方法对其进行检验, 结果表明岸电技术是一种有效的减排途径.

港口的绿色能源技术备受关注. Alasali 等^[50] 研究一种电气化轮胎式门式 (rubber-tired gantry, RTG) 起重机的储能系统. Antonelli 等^[51] 比较 RTG 起重机中的不同储能系统选项, 提出了一种混合推进系统, 并通过仿真实验进行了验证. Jonathan 和 Kader^[52] 考虑在港口设备中采用电气化技术, 如 RTG 起重机, 其仿真实验结果可作为港口当局制定政策的借鉴. 自动系泊系统也常被用于推动绿色港口的发展. Piris 等^[53] 考虑利用自动系泊系统减少 CO₂ 排放的可能性, 并采用了两种基于 bottom-up 的方法来估计这项技术的影响. Díaz-Ruiz-Navamuel 等^[54] 研究了在 Ro-Ro 码头运用自动系泊系统对于 CO₂ 减排的应用前景, 结果表

明 CO₂ 排放量有明显下降. 新能源的开发对港口的长远发展具有重要意义. Ramos 等^[55] 提出采用潮汐流发电的可持续港口战略, 以满足港口用电需求. Lamberti 等^[56] 开发可再生能源 (如氢气) 和用于智能港口的储能系统. 港口设备的创新问题也受到了广泛的关注. Lam 等^[57] 提出了一种能够更好地利用能源和减少 CO₂ 排放的能源管理系统. Zhao 等^[58] 调查在港口起重机上使用混合储能系统的潜力, 以提高能源效率. Al-Falahi 等^[59] 将电池储能系统与混合动力系统进行对比, 并在仿真实验的基础上, 分析了这两种技术在油耗和减排方面的性能. Li 等^[60] 开发卡车预约系统, 以减少卡车在港口的尾气排放和等待时间.

自动化集装箱码头是港口智能管理领域的重大创新, 建设自动化集装箱码头系统也能促进绿色港口的发展. Bae 等^[61] 比较集装箱码头 ALV 和 AGV 的效率. 结果表明, 当 AGV 的数量足够时, 较少的 ALV 可以达到与 AGV 相同的效率水平, AGV 在大多数情况下优于 ALV. Rashidi 和 Tsang^[62] 通过网络单纯形算法解决了自动化集装箱码头的 AGV 调度问题, 并提出另一种优化算法 (贪婪车辆搜索算法) 与网络单纯形算法进行对比. Pjevčević 等^[63] 旨在提高自动化集装箱码头的集装箱装卸效率, 并揭示了 AGV 的数量和调度规则对作业过程的影响. Skinner 等^[64] 旨在改善自动化集装箱码头的集装箱装卸流程, 提出了一种基于 GA 的改进算法求解调度问题. Xin 等^[65] 建立集装箱装卸作业优化问题的动态模型, 包括 AGV、A-SC 和岸桥. Hu 等^[66] 分别为 AGV 和 ALV 的存储分配和调度选择联合问题开发了混合整数线性规划模型, 并提出了一种基于贪婪搜索的 PSO 算法来求解模型.

学术界已对岸电设备、绿色能源技术和自动化集装箱码头系统进行了广泛的研究和讨论. 现阶段的研究结果表明这些绿色港口技术能够有效地减少港口运营产生的排放, 而如何将港口总体运营规划与各项绿色港口技术相结合仍有待研究.

3 绿色航运

传统的航运业运营管理研究侧重于降低运输成本, 这将有助于降低产品价格以及提升产品供给能力. 随着人们对环境可持续性发展的日益关注, “绿色航运” 的概念已被提出并被众多航运公司采纳. 绿色航运侧重于减少航运业所使用的资源和能源, 以保护全球环境免受船舶产生的尾气的影 响^[67], 这意味着航运业应该权衡行业发展和环境保护工作. 本章节将首先探讨绿色航运管理相关的研究, 然后对绿色航运技术方面的文献进行归纳和分析.

3.1 绿色航运管理

绿色航运管理相关的文献有很多, 本文将 其归纳为绿色航运网络优化和减速航行两大主题. 航运网络优化问题通常包括网络设计、船队规划、班期设计和航线配船. 虽然不是所有的文献都涉及排放问题, 但大部分研究成果都有助于减排. 这个研究方向的文献众多, 一些综述类文献已对现有文献进行了分类和归纳, 因此本文只选取了几篇极具影响力的综述类文献进行分析. 另外, 船舶减速航行也能在减排工作中发挥重要的作用.

在航运网络优化方面, 首先介绍四篇关于班期设计和航线配船以及相关问题的综述类文献, 即 Ronen^[68,69] 和 Christiansen 等^[70,71], 这些文献指出该领域公开发表的论文数量几乎每十年翻一番. Ronen^[68] 讨论了绿色航运管理方面的问题以及相关模型, 并总结了现有的关于工业生产、班轮运输、不定期运输、运输系统模型和其它模型的文献. 该文献还对班期设计问题的研究趋势和现有模型的局限性进行了分析. Ronen^[69] 从存贮路径、最优巡航速度、班期设计等方面对文献进行分类, 并指出计算能力的快速发展能够推动航运管理研究的进程. Christiansen 等^[70] 总结了 Ronen^[69] 之后大约十年内的船队规划和班期设计方面的文献, 与前两篇综述相比, 分类方式略有不同. Christiansen 等^[71] 报告了关于班轮运输, 航速、燃油和排放量, 以及离岸物流、驳运和配载等方面的 100 多篇文献. 此外, Meng 等^[72] 从战略层面、战术层面和操作层面总结了航运管理方面的文献, 指出了学术研究与工业实践的差距, 并提出了一些未来的研究方向. Tran 和 Haasis^[73] 归纳了网络设计、船队管理和集装箱路径优化这三个方面的文献. Lee 和 Song^[74] 也对集装箱运输中涉及班期设计、网络设计和航线配船的文献进行了研究.

鉴于船舶的航行速度和燃油消耗之间近似立方的关系^[75], 船舶减速航行是减少排放和油耗成本的有效措施. 大量文献研究了船舶活动中减速航行带来的影响. Corbett 等^[76] 应用利润最大化模型来评估减速航

行是否是一种潜在的具有成本效益的减排措施。案例分析结果表明, 燃油税将导致航行速度和尾气排放量的减少。Psaraftis 和 Kontovas^[77] 发现减速航行的措施在节约油耗成本方面是有效的, 但考虑到非油耗操作成本和途库存成本的增加, 该措施可能不会带来经济效益。据 Cariou 报告, 船舶慢行在减少排放方面的有效性与一些因素有关, 如燃油价格、运费和库存成本^[78]。Kontovas 和 Psaraftis^[79] 在考虑港口服务时间和等待时间的基础上, 分析减速导致的船舶在海上时间的增加, 并探讨如何缩短集装箱船在港口的逗留时间。Chang 和 Chang^[80] 开发了一个用于评估减速航行的成本效益的模型, 并将其运用到实证研究中。结果表明, 减速可以降低油耗和 CO₂ 排放, 但会增加成本。Maloni 等^[81] 考虑不同的燃油价格、集装箱容量和航行速度, 模拟通过洛杉矶港进出亚洲的集装箱流量, 分析集装箱承运人和托运人降低速度的成本和效益, 最终得出以下结论: 超慢航速 (18 节) 是降低承运人和托运人总成本和 CO₂ 排放量的最有效速度。为了考察减速对减排的作用, Woo 和 Moon^[82] 运用模拟模型研究航速与排放量之间的关系以及减速对班轮航运业的影响。模拟结果证明了减速航行在减少碳排放方面的作用, 但只有在一定的速度范围内才能降低运营成本。该文献还计算了不同情景下的最优航行速度, 以最大程度地降低当运营成本最低时的尾气排放, 并满足 IMO 的规定。Chang 和 Wang^[83] 调查减速对运输成本和 CO₂ 排放量的影响。他们发现最优的速度是一个动态过程, 与租船费用和燃油价格有关。Lee 等^[84] 讨论减速航行对集装箱运输的交货可靠度和燃油消耗的影响。研究结果表明, 为了保持服务频率, 实施减速需要调用额外的船只, 据估计调用这些船只的费用将低于降低的油耗成本。Ferrari 等^[85] 调查减速对航运服务模式的影响。Ammar^[86] 讨论了 Ro-Ro 货船减速航行的能源效率和成本效率, 并证实了减速措施在减少 CO₂ 排放方面的有效性。Cariou 等^[87] 的研究表明, 自 2007 年以来, 集装箱运输中的减速航行、技术变革和更新的网络设计是减少 CO₂ 排放的关键因素。

关于传统的航运管理问题的研究已经相对成熟, 然而在目前提倡节能减排的大环境下, 航运网络有必要结合一些针对航运业的减排政策和措施重新优化设计, 同时, 一些限制船舶航行速度的项目也很有研究价值。

3.2 绿色航运技术

航运技术的发展有利于推进节能减排工程的进程。尾气洗涤器和液化天然气 (liquified natural gas, LNG) 是目前重点关注的绿色航运技术, 另外, 还有生物能源、核能和船体涂层等技术也已有一些研究成果。本文将从洗涤器、清洁能源和船舶设计优化三个方面对这些文献进行分析。

洗涤器通常用来处理船舶尾气中的硫含量, 硫氧化物可被水吸收或发生化学反应成为固体物质^[88]。因此, 配备洗涤器的船舶可以继续排放控制区 (emission control area, ECA) 内使用廉价的高硫油, 其中 ECA 主要指 IMO 设定的四个区域: 波罗的海地区、北海地区、北美地区、美国加勒比海地区海域, 自 2015 年起 ECA 内的船舶燃油硫含量不能高于 0.1%。洗涤器的基础设施建设需要大量的初期投资, 这是洗涤器安装可行性的决定因素。在现有文献中, 洗涤器经常与其他减排措施进行比较。Panasiuk 和 Lebedevas^[89] 比较了在 ECA 中使用低硫油和洗涤器的优缺点。Patricksson 等^[90] 考虑硫排放规则, 对比燃油转换和尾气洗涤器这两种减排技术, 并提出关于船队更新问题的随机规划模型。Carr 和 Corbett^[91] 指出, ECA 内的航行时间是选择减排措施 (燃油转换或尾气洗涤器) 的主要决定因素。Panasiuk 和 Turkina^[92] 考虑净现值、贴现回收期和投资回报率, 并通过现金流模型评估洗涤器的投资效益。Antturi 等^[93] 对波罗的海 ECA 内 0.1% 的硫限值规定进行成本效益分析。他们的研究表明, 船型、大小和燃油消耗将影响低硫油和洗涤器的选择, 他们还认为最新的法规可能不具有成本效益。Zis 等^[94] 关注减排技术的回收期, 包括洗涤器和岸电。Zhu 等^[95] 提出了多个 PM 减排措施投资的净现值模型, 其结果显示, 柴油机颗粒过滤器和洗涤器分别是经济效率最高和最低的方法。Abadie 等^[96] 比较在不同假设下的两种减排技术: 燃油转换和洗涤器。评价结果表明, 当船舶剩余寿命、出海时间和出海时间在 ECA 中所占比例较长时, 洗涤器将优于燃油转换。Lindstad 等^[97] 得出结论, 蒸馏油对小型船舶更具有吸引力, 而安装洗涤器对大型船舶更有利。通过对尾气排放的分析得出以下结论, 蒸馏油的使用会促使船舶降低航速, 洗涤器会提高船舶航行速度和 CO₂ 排放量。为了确定影响洗涤器安装决策的因素, Solakivi 等^[98] 提出了一个逻辑回归模型, 并对几种类型的船舶进行了评估。

开发清洁的新能源是减少船舶排放和缓解环境问题的有效途径。为了实现绿色航运, 船用新能源已成为近年的研究热点, 包括电池^[99]、生物燃料^[100]、核能^[101] 和液化石油气^[102], 尤其是 LNG^[103]。由于 LNG 的含硫量极低, 使用 LNG 作为高硫油 (heavy fuel oil, HFO) 的替代品几乎可以实现零硫排放, 并减少 NO_x 和

PM 的排放. Nikopoulou 等^[104]发现在 ECA 内使用蒸馏油的成本过高, 洗涤器、选择性催化还原法 (selective catalytic reduction, SCR) 和空气加湿技术是较好的减排技术, LNG 是最佳的减排措施. Brynolf 等^[105]评价三种满足硫排放要求的措施, HFO 与 SCR 和开环洗涤器结合, 船用轻柴油 (marine gas oil, MGO) 与 SCR 结合以及 LNG. Lindstad 等^[106]比较了几种关于 ECA 的减排措施, 包括燃油转换、废气再循环、洗涤器、LNG 和甲醇, 分析发现很难确定哪种措施是最优的. 进一步的研究表明, 发动机大小、每年的燃油消耗量和预计未来的燃油价格这三个因素可能会影响减排措施的选择. Ren 和 Lützen^[107]提出了一种基于模糊层次分析法的方法用于选择减排措施 (即燃油转换、洗涤器和 LNG), 他们发现 LNG 是不确定条件下最具可持续性的措施. Nikopoulou^[108]提出了一个计算多个减排措施所需成本的模型, 包括 SCR、空气加湿技术和内部发动机改造、MGO、洗涤器和 LNG.

为了提高船舶燃油效率, 现已有大量关于船舶设计优化的研究. Lamb^[109]提出了针对不同类型船舶的船型、推进器和材料的设计理念, 可以节约大量的成本并实现减排. Zakaria 和 Rahman^[110]研究了船舶能效设计指数 (energy efficiency design index, EEDI) 对船舶吃水、燃油类型、发动机功率、燃油消耗率和排水量系数的影响, 并介绍了如何在考虑 EEDI 的情况下优化现有船舶的船型. Lindstad 和 Bø^[111]证实了细长船体能够很好地满足 EEDI 的要求, 且发现 EEDI 得分的降低通常大于温室气体排放的降低. Esmailian 等^[112]和 Zakerdoost 和 Ghassemi^[113]专注于船体和螺旋桨系统优化问题的研究. 船体结垢现象容易引起船舶的航速损失和油耗增加. 船体涂层被认为是防止污垢增长的有效解决方案. Göler 和 Erdoğan^[114]研究了在不同情况下高速 Ro-Ro 船的几种船体涂层技术, 结果显示了通喷砂有利于提升船体性能和节约燃油. 船体清洗是一种广泛应用于提高燃油效率的措施. Adland 等^[115]评估定期船体清洗对能源效率的影响. 他们的研究指出定期船体清洗有助于降低日常燃油消耗, 船体清洗对满载状态下的船舶能源效率影响较大, 而水下船体清洗在降低燃油消耗方面不如干船坞有效. Pagoropoulos 等^[116]表明, 船体清洗频率与燃油消耗量之间存在一个凸递减关系, 这意味着随着船体清洗频率的增加, 每次清洗带来的节约燃油的效果递减.

以上关于航运技术的研究成果已为航运业的绿色可持续发展做出了一定贡献, 尾气洗涤器、LNG 以及船体涂层技术等已逐步运用到实际操作中. 当然, 为了更有效地完成航运业节能减排的工作, 对于绿色航运技术的探索和研究将是一个持续的过程.

4 绿色海事政策

政府及一些国际组织的监管部门已经制定了相关的绿色海事政策, 用于限制 CO₂、NO_x 和 SO₂ 的排放. 概括而言, 在实践中主要有两种类型的政策和措施. 第一类包括 IMO 颁布的所有用于管制船舶排放的政策, 例如 MARPOL73/78/97 的若干修正案. 另一类是涉及港口的规章制度, 如船舶挂靠港口时使用岸电设施的要求, 以及 ECA 的设立. 这些绿色海事政策和措施对航运公司运营和整个行业有重大影响, 本节将对其进行详细分析和讨论.

4.1 三项绿色航运措施

航运业在近年发展迅猛, 大量船舶尾气排放已经引起了国际社会、海事部门、行业协会和学术界的广泛关注. 在 2011 年至 2014 年期间, IMO 将若干关于船舶排放技术和营运措施的修正案加入到 MARPOL 附件六中. 用于解决航运业排放问题的措施主要有以下三项: 技术措施、营运措施和市场化措施.

船舶消耗燃油后会产生大量的尾气. 为了提高船舶的油耗效率和减少排放, 造船业必须采取一些技术措施. 因此, IMO 引进了新船的 EEDI, 其可以为不同类型和大小新船的对比提供参考, 以鼓励开发更有效的船舶和积极建立能效最低的新船. 根据 IMO 的规定, 每艘新船的 EEDI 必须低于要求的指标, 该指标是根据基准线值和适当的折减系数计算得出的. 基于此, Ančić 和 Šestan^[117]根据目前的折减系数变化政策估算了散货船的 CO₂ 排放量. 他们发现考虑造船业反馈情况而制定的政策更容易被遵守, 这有利于 CO₂ 排放量的降低. Tzannatos 和 Stournaras^[118]以及 Ekanem Attah 和 Bucknall^[119]将该 IMO 法规运用到不同的子市场中, 证明了 EEDI 基准线计算受各种操作因素的影响, 需要对其进行密切监控.

由于 EEDI 只针对新建船舶, 为了限制现有船舶的排放, IMO 提出了船舶能效管理计划 (ship energy efficiency management plan, SEEMP). 船舶能效营运指数 (energy efficiency operating index, EEOI) 反映船

船在运营过程中的能效管理计划的指标. Sun 等^[120] 分析内河航运能耗及温室气体排放情况, 通过与海船进行对比, 他们发现内河航运环境对其船舶的运营能效有显著影响. Acomi 和 Acomi^[121] 开发了一个模型, 以研究各种燃油对船舶 EEOI 的影响. Lu 等^[122] 提出了一个以 EEOI 为指标的半经验船舶营运性能预测模型, 以说明每单位运输工作的主机油耗比率.

船舶减排过程中的市场化措施鼓励企业采取最经济的市场化手段减排, 并最大限度地降低实现减排目标的成本. 市场化措施已受到越来越多的关注, 或许会成为未来的主要措施之一. Heitmann 和 Khalilian^[123] 重点关注航运业碳减排对全球碳排放的影响, 并构建出两条边际减排成本曲线来评估三个全球减排目标. Lee 等^[124] 调查碳税对集装箱市场的经济影响. 他们的研究结果表明, 在国际集装箱市场推出更低的航海碳税不会导致全球经济发生重大变化, 且碳税制度是一项可行的减排措施. Wang 等^[125] 通过分析基于市场的碳排放交易系统, 提出了两种用于管制船舶排放的模型, 即开放式排放交易系统和仅限海运的排放交易系统, 并讨论不同的排放交易系统对集装箱航运和干散货航运的影响. 在已有的关于市场化措施研究的基础上, Shi^[126] 总结了多项基于市场的减排措施, 包括温室气体基金、港口国征税和能源效率激励计划, 并对这些市场措施的适用范围进行了详细的比较分析, 研究结果指出大多数国家可接受温室气体减排计划, 并建议在 2016 年左右实施.

本小节已对技术措施、营运措施和市场化措施进行了分析, 并对其相关的研究做了总结. 尽管不同的措施带来的影响不同, 这三项绿色航运措施都将有利于碳减排工作的推进. 现有的研究主要针对单项措施, 然而各项措施之间可能会相互影响, 将来的研究需重视措施间的关联性.

4.2 ECA 及其影响

除了以上减排措施之外, IMO 还设立了四个 ECAs 以限制控制区内船舶的尾气排放. 具体的 ECA 内的硫限制规则以及部分减排措施也已在前面进行阐述. 本章节将主要分析 ECA 对航运业造成的影响, 可分为航行模式的变化、环境和健康问题的改善以及运输模式选择的转变.

燃油转换是最直接的在 ECA 内减排的措施, 具体操作中是指在 ECA 内使用低硫油, 如 MGO, 而在 ECA 外仍使用 HFO. 大量的现有文献探讨了因 ECA 内使用低硫油的规定而导致的船舶航行模式的变化. 根据 Fagerholt 等^[127] 和 Fagerholt 和 Psaraftis^[128] 的研究, 船舶在 ECA 内外以不同的速度航行且会绕路航行以减少高价低硫油的使用. 为了减少在 ECA 内的航行路程, 绕路时可能会选择总距离更长而 ECA 内距离更短的路线, 这可能会使总排放量增加. 与此不同的是, 基于船舶自动识别系统的数据, Adland 等^[129] 揭示了北海 ECA 引入更严格的硫限制规则的举措不会对船舶航速有影响. Gu 和 Wallace^[130] 将航行模式(航线和速度)的优化结合到对减排技术(即燃油转换和洗涤器)的评估中. 他们认为如果不考虑航行模式, 可能会高估洗涤器的价值. Chen 等^[131] 揭示了大量船舶(特别是小型船舶)将在 ECA 周围绕路航行. Zhen 等^[132] 构建了一个混合整数规划模型, 用于设计考虑 ECA 规则并以最小化燃油成本为目标的航行计划. 结果表明, 船舶会选用总距离较长而 ECA 内距离较短的路线, 且船舶在 ECA 外会提高航行速度由于时间窗的存在. Fan 和 Huang^[133] 发现, 目前中国的 ECA 不一定会诱发 ECA 内外变速的行为, 当 ECA 内距离与总航线距离之比超过 7% 时, ECA 内的速度会有明显下降. Raza 等^[134] 宣称最新的 ECA 规则仅导致一小部分 Ro-Ro 或 Ro-Pax 公司的船舶降速, 且使用低硫油增加的成本部分会转移给客户.

大量文献研究 ECA 对环境和健康问题的影响. Browning 等^[135] 确认 ECA 的设立可显著减少 SO₂ 和 PM 的排放, 并减少少量 NO_x 的排放, 但由于 MGO 的价格上涨, 航运公司的运营成本会有所增加. Chang 等^[136] 假设在韩国仁川港建立 ECA, 并测量在 ECA 内航行的船舶的有害气体(如 SO₂、NO_x 和 PM) 排放量. 他们将 ECA 与减速区域进行比较, 发现 ECA 能够减少更多有害气体的排放, 且 ECA 的规则越严格减排效果越好. Svindland^[137] 支持更严格的船舶硫排放规则, 以期缩小海运和陆运之间 SO₂ 排放差距. Åström 等^[138] 分析实施关于氮排放的 ECA 后减排技术的成本以及人类健康和作物生长的效益, 发现效益在大多数情况下会超过成本.

ECA 还可能引起运输需求从海流向陆运. Panagakos 等^[139] 探究是否该将地中海指定为 ECA, 并构建逻辑模型进行分析, 结果表明将地中海指定为 ECA 会导致 5.2% 的运输需求从海运转向陆运, 在某些假设下可达到 17.1%. Holmgren 等^[140] 的调查显示, 从立陶宛东部到英国西部的高价货物几乎不可能发生

运输模式转为陆运的情况。Vierth 等^[141]推断欧洲 ECA 可能会引起货物从海上运输反转为公路和铁路运输。Zis 和 Psaraftis^[142]分析了在 0.1% 的硫限制下, 低价燃油对海陆运输模式选择的影响, 并进一步考察了燃油价格上涨对运输模式选择的影响。Zis 和 Psaraftis^[143]以及 Zis 等^[144]讨论了一些抑制货物运输需求从海运转向陆运的措施。

以上的分析表明, ECA 的设立能够减少控制区的船舶尾气排放, 这将有利于改善环境和健康问题, 但同时也有可能引起总体排放量的增加以及造成运输需求从海流转向陆运的结果。总体航运排放的增加最终可能还是会对人类的健康造成影响, 而运输需求从海运转为陆运或从一个国家转向另一个国家会带来重大的经济影响。针对 ECA 的利弊, 不同国家有必要根据具体情况分析 ECA 的设立和调整问题, 以平衡航运业带来的经济和环境的影响。

4.3 温室气体减排政策

近年来, 航运业温室气体排放量急剧增加。据 IMO 报告, 航运活动产生的温室气体排放量约占全球温室气体排放量的 2.5%^[2]。根据欧盟运输部门的数据, 航运排放量约占其温室气体排放总量的 13%。为了减少航运温室气体排放, 欧盟委员会于 2013 年制定了一项相关的政策。根据该政策的规定, 从 2018 年 1 月 1 日起, 欧盟港口会监测和报告访问该港口的 5000 总吨以上的船舶的 CO₂ 排放量。

为了进一步减少温室气体排放, 海洋环境保护委员会在第七十二届会议中通过了一项关于减少航运活动产生的温室气体排放的初步战略。这一战略包括短期措施 (2018–2023 年)、中期措施 (2023–2030 年) 和长期措施 (2030 年以后), 其细节将在后续会议中商讨和制定。该战略要求到 2050 年, 温室气体排放总量与 2008 年相比至少减少一半。该战略还强调应优先关注发展中国家的需求^[1]。此外, MARPOL 公约修正案提及的数据收集系统已建成, 并已于 2019 年 1 月 1 日开始收集大型船舶的油耗数据。

5 评述与展望

本文将近年来航运业节能减排的相关文献归纳整理为绿色港口、绿色航运和绿色海事政策三类。绿色港口问题涉及港口运营管理和港口技术, 绿色航运问题包括航运管理和航运技术, 绿色海事政策问题分析了现有的政策和措施及其带来的影响。港口和航运的优化管理通常可以节约能源或燃油, 从而减少航运活动产生的排放。港口与航运技术的研究与创新是实现航运绿色化目标的关键。在对这些研究工作进行了分析和总结后, 本文发现绿色海事工作已经获得了一定的成果: 在绿色港口方面, 已将传统的绿色航运管理问题与减排需求相结合, 并对一些绿色港口技术及其减排效果进行了深入的研究; 在绿色航运方面, 针对传统的航运管理问题的研究已相对成熟, 一些减排相关的航运技术已被提出且逐步应用于实践中, 也有学者对可相互替换的航运技术进行了对比分析; 在绿色海事政策方面, 大量文献深入讨论了已有的政策和措施, 这些政策和措施可能会带来多方面的影响, 且这些影响会因研究背景的不同而有差异。在总结现有研究成果的同时, 本文也发现了该研究领域尚存的一些不足之处。为了更好地实现航运绿色化的目标, 本文归纳出三方面的未来研究方向, 包括面向绿色港口的研究、面向绿色航运的研究和面向排放政策的研究。

5.1 面向绿色港口的研究

大数据已逐渐被应用到工业生产的各方面。港口排放的大数据可用于分析港口运营活动中各种类型排放的形成机制, 有助于实现绿色港口的目标。目前, 很多港口设备上已安装传感器, 用来记录设备核心部件的状态数据。先进的大数据工具或平台可用于分析这些数据, 以了解不同类型的排放是如何在港口作业的不同阶段和活动中形成的。此外, 港口还需要一个更为全面、动态的评价体系, 从“低排放”绿色作业的角度对设备、作业活动、港口的成果进行评价。管理科学学科中使用的一些最先进的方法和工具可用于开发这种先进的评价系统。

港口有各种资源, 如泊位、岸桥和场桥。目前的研究大多运用面向成本的目标来优化这些资源的分配或调度计划, 而当考虑到排放最小化或节能最大化目标时, 需要重新定义和设计决策模型以及求解算法。此外, 在港口采用岸电、堆场卡车油电转换等绿色港口新技术时, 决策模型中需要加入一些新的约束条件, 并重新考虑泊位分配、卡车调度等问题。如果考虑更特殊的约束条件, 所建立的模型将更为复杂。因此, 设计高效的算法用于求解大规模情况下的这类非线性模型将是一大难点, 而这也为该领域的学者带来了更多的研究机会。

5.2 面向绿色航运的研究

根据 IMO 的规定, 从 2020 年 1 月 1 日开始, 船舶在 ECA 外航行使用燃油的硫含量不能超过 0.5%。然而, 几乎所有的文献仅关注 ECA 内 0.1% 的硫含量。学术界和工业界考虑的减排措施主要有燃油转换、洗涤器和 LNG。由于 ECA 外含硫量的限制为 0.5%, 仅考虑 ECA 内的规则选定的减排措施以及相应的结论可能不再适用。航运公司需要重新构建评估和筛选减排技术的模型, 还应该重新考虑在 ECA 内使用 0.1% 的低硫油和在 ECA 外使用 0.5% 的低硫油的情况下速度和航线的设计问题。根据全球硫限制和未来预期的燃油价格, 航运公司需要重新评估洗涤器和 LNG 这两种减排措施投资的回收期。

洛杉矶港采用了船舶减速鼓励项目 (vessel speed reduction incentive program, VSRIP), 设计了两个半径分别为 20 海里 (nautical miles, nm) 和 40nm 的船舶减速区 (vessel speed reduction zones, VSRZs)。该项目规定, 如果在一个日历年内, 一个航运公司访问该港口的船舶中超过 90% 遵循 20 nm 或 40 nm 的 VSRZ 内 12 节的速度限制, 则该公司的船舶每次访问洛杉矶港可分别获得 15% 或 30% 的第一天停泊费的退款。除了洛杉矶港, 长滩港、圣地亚哥港、纽约和新泽西港也实施了类似的 VSRIP。由于 VSRZ 内 12 节的速度限制, 遵守项目的船舶在该区域内必须减速航行, 这可能会引起船舶在 VSRZ 范围外的航速增加, 从而导致总油耗成本增加。因此, 航运公司需要同时优化项目遵守与否的决策、VSRZ 内外的航行速度以及船舶在航线上的部署等问题。

有些港口同时涉及 ECA 和 VSRIP, 如洛杉矶港, 这种类型的港口可能还会继续增加。考虑 ECA 和 VSRIP 这两种政策, 在 VSRZ 内降低航速不仅可以获得部分停泊费退款, 而且可以减少低硫油的消耗, 未来的研究中可以讨论航运公司在访问同时实施这两种政策的一些港口时该如何重新设计航运网络。

5.3 面向排放政策的研究

现有的文献已对各种航运减排政策和措施有了一定的研究, 但仍缺乏全面系统的分析。有些减排措施之间实际上是相互关联的, 例如, EEDI 的实施会对 EEOI 的运行机制产生积极影响, 而 EEOI 政策的实施也必将促进 EEDI 在造船业中的推进。因此, 对这些减排措施进行系统性的分析, 有助于全面了解当前的减排政策, 并为政府和 IMO 提供有效的建议。

IMO 自 2015 年起对四个特定的 ECAs 内的船用燃油实施 0.1% 的硫含量限制, 2020 年起在全球范围内实施 0.5% 的硫含量限制。在这些船舶尾气排放法规的基础上, 每个国家可以在各自的领海范围内设计更为严格的限制硫或氮排放的 ECA, 例如我国沿海的 ECA。一方面, 更严格的排放限制可以减少港口附近的船舶尾气排放, 有利于改善环境和健康问题; 另一方面, 一些船舶可能会为了躲避更严格的排放限制而改为访问其他国家的港口, 从而对我国的运输业和贸易发展产生不利影响。因此, 在同时考虑环境和经济问题情况下, 设计某个特定国家的 ECA 将会是一个非常有意义的研究课题。

参考文献

- [1] UNCTAD. Review of maritime transportation[R]. The United Nations Conference on Trade and Development, 2018.
- [2] IMO. Third IMO GHG study 2014: Executive summary and final report[R]. International Maritime Organization, 2015.
- [3] Correcher J F, Van den Bossche T, Alvarez-Valdes R, et al. The berth allocation problem in terminals with irregular layouts[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 272(3): 1096–1108.
- [4] Sun D, Tang L, Baldacci R. A benders decomposition-based framework for solving quay crane scheduling problems[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 273(2): 504–515.
- [5] Correcher J F, Alvarez-Valdes R, Tamarit J M. New exact methods for the time-invariant berth allocation and quay crane assignment problem[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 275(1): 80–92.
- [6] Galle V, Barnhart C, Jaillet P. Yard crane scheduling for container storage, retrieval, and relocation[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 271(1): 288–316.
- [7] Peng Y, Wang W, Song X, et al. Optimal allocation of resources for yard crane network management to minimize carbon dioxide emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 649–658.
- [8] Tang L, Zhao J, Liu J. Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 236(3): 978–990.

- [9] Du Y, Chen Q, Lam J S L, et al. Modeling the impacts of tides and the virtual arrival policy in berth allocation[J]. *Transportation Science*, 2015, 49(4): 939–956.
- [10] Venturini G, Iris Ç, Kontovas C A, et al. The multi-port berth allocation problem with speed optimization and emission considerations[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 54: 142–159.
- [11] Hou J. Dynamic berth allocation problem with two types of shore power for containership based on rolling horizon strategy[C]// 2017 2nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE), Singapore, 2017: 144–149.
- [12] Dulebenets M A, Moses R, Ozguven E E, et al. Minimizing carbon dioxide emissions due to container handling at marine container terminals via hybrid evolutionary algorithms[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 8131–8147.
- [13] He J, Huang Y, Yan W, et al. Integrated internal truck, yard crane and quay crane scheduling in a container terminal considering energy consumption[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(5): 2464–2487.
- [14] He J. Berth allocation and quay crane assignment in a container terminal for the trade-off between time-saving and energy-saving[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2016, 30(3): 390–405.
- [15] Yu S, Wang S, Zhen L. Quay crane scheduling problem with considering tidal impact and fuel consumption[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2016, 29(3–4): 345–368.
- [16] Talavera A M, Barron J G G, Passamani C M T C. Optimization of vessel and quay crane emissions during the hoteling phase[C]// 2016 7th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA), Chalkidiki, 2016: 1–10.
- [17] de Oliveira J P R, Barbosa J D, Lamprou M. Multi-objective optimization of the quay crane assignment and scheduling problem: Time and movement optimization[C]// 2016 7th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA), Chalkidiki, 2016: 1–7.
- [18] Liu D, Ge Y E. Modeling assignment of quay cranes using queueing theory for minimizing CO₂ emission at a container terminal[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 61: 140–151.
- [19] Woo J K, Moon D S, Lam J S L. The impact of environmental policy on ports and the associated economic opportunities[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 110: 234–242.
- [20] Tseng P H, Pilcher N. Evaluating the key factors of green port policies in Taiwan through quantitative and qualitative approaches[J]. *Transport Policy*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.12.014>.
- [21] Di Vaio A, Varriale L. Management innovation for environmental sustainability in seaports: Managerial accounting instruments and training for competitive green ports beyond the regulations[J]. *Sustainability*, 2018, 10(3): 783.
- [22] Diaz-Hernandez G, Losada I J, Mendez F J. Improving construction management of port infrastructures using an advanced computer-based system[J]. *Automation in Construction*, 2017, 81: 122–133.
- [23] Na J H, Choi A Y, Ji J, et al. Environmental efficiency analysis of Chinese container ports with CO₂ emissions: An inseparable input-output SBM model[J]. *Journal of Transport Geography*, 2017, 65: 13–24.
- [24] Zheng S, Ge Y E, Fu X, et al. Modeling collusion-proof port emission regulation of cargo-handling activities under incomplete information[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 104: 543–567.
- [25] Kang D, Kim S. Conceptual model development of sustainability practices: The case of port operations for collaboration and governance[J]. *Sustainability*, 2017, 9(12): 2333. <https://doi.org/10.3390/su9122333>.
- [26] Kim S, Chiang B G. The role of sustainability practices in international port operations: An analysis of moderation effect[J]. *Journal of Korea Trade*, 2017, 21(2): 125–144.
- [27] de Moura D A, de Andrade D G. Concepts of green port operations — One kind of self-diagnosis method to the port of Santos-Brazil[J]. *Independent Journal of Management & Production*, 2018, 9(3): 785–809.
- [28] Peng Y, Wang W, Liu K, et al. The impact of the allocation of facilities on reducing carbon emissions from a green container terminal perspective[J]. *Sustainability*, 2018, 10(6): 1813. <https://doi.org/10.3390/su10061813>.
- [29] Lam J S L, Notteboom T. The greening of ports: A comparison of port management tools used by leading ports in Asia and Europe[J]. *Transport Reviews*, 2014, 34(2): 169–189.
- [30] Erdas C, Fokaides P A, Charalambous C. Ecological footprint analysis based awareness creation for energy efficiency and climate change mitigation measures enhancing the environmental management system of Limassol port[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 108: 716–724.
- [31] García-Onetti J, Scherer M E, Barragán J M. Integrated and ecosystemic approaches for bridging the gap between environmental management and port management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 615–624.
- [32] Asgari N, Hassani A, Jones D, et al. Sustainability ranking of the UK major ports: Methodology and case study[J]. *Transportation research part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 78: 19–39.
- [33] Wan C, Zhang D, Yan X, et al. A novel model for the quantitative evaluation of green port development — A case study of major ports in China[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 61: 431–443.
- [34] Puig M, Wooldridge C, Casal J, et al. Tool for the identification and assessment of environmental aspects in ports (TEAP)[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 113: 8–17.

- [35] Yang Y C. Determinants of container terminal operation from a green port perspective[J]. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 2015, 7(3): 319–346.
- [36] Chang Y T, Park H. Measuring foregone output under industry emission reduction target in the transportation sector[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016, 49: 138–153.
- [37] Antão P, Calderón M, Puig M, et al. Identification of occupational health, safety, security (OHSS) and environmental performance indicators in port areas[J]. *Safety Science*, 2016, 85: 266–275.
- [38] Papaefthimiou S, Sitzimis I, Andriosopoulos K. A methodological approach for environmental characterization of ports[J]. *Maritime Policy & Management*, 2017, 44(1): 81–93.
- [39] Laxe F G, Bermúdez F M, Palmero F M, et al. Assessment of port sustainability through synthetic indexes. Application to the Spanish case[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 119(1): 220–225.
- [40] Di Vaio A, Varriale L, Alvino F. Key performance indicators for developing environmentally sustainable and energy efficient ports: Evidence from Italy[J]. *Energy Policy*, 2018, 122: 229–240.
- [41] Sim J. A carbon emission evaluation model for a container terminal[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 526–533.
- [42] Ballini F, Bozzo R. Air pollution from ships in ports: The socio-economic benefit of cold-ironing technology[J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2015, 17: 92–98.
- [43] Tseng P H, Pilcher N. A study of the potential of shore power for the port of Kaohsiung, Taiwan: To introduce or not to introduce?[J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2015, 17: 83–91.
- [44] Sciberras E A, Zahawi B, Atkinson D J. Electrical characteristics of cold ironing energy supply for berthed ships[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 39: 31–43.
- [45] Kotrikla A M, Lilas T, Nikitakos N. Abatement of air pollution at an Aegean island port utilizing shore side electricity and renewable energy[J]. *Marine Policy*, 2017, 75: 238–248.
- [46] Vaishnav P, Fischbeck P S, Morgan M G, et al. Shore power for vessels calling at US ports: Benefits and costs[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(3): 1102–1110.
- [47] Winkel R, Weddige U, Johnsen D, et al. Shore side electricity in Europe: Potential and environmental benefits[J]. *Energy Policy*, 2016, 88: 584–593.
- [48] Innes A, Monios J. Identifying the unique challenges of installing cold ironing at small and medium ports — The case of Aberdeen[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 62: 298–313.
- [49] Zis T. Prospects of cold ironing as an emissions reduction option[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, 119: 82–95.
- [50] Alasali F, Haben S, Becerra V, et al. Optimal energy management and MPC strategies for electrified RTG cranes with energy storage systems[J]. *Energies*, 2017, 10(10): 1598.
- [51] Antonelli M, Ceraolo M, Desideri U, et al. Hybridization of rubber tired gantry (RTG) cranes[J]. *Journal of Energy Storage*, 2017, 12: 186–195.
- [52] Jonathan Y C E, Kader S B A. Prospect of emission reduction standard for sustainable port equipment electrification[J]. *International Journal of Engineering*, 2018, 31(8): 1347–1355.
- [53] Piris A O, Díaz-Ruiz-Navamuel E, Pérez-Labajos C A, et al. Reduction of CO₂ emissions with automatic mooring systems. The case of the port of Santander[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(1): 76–83.
- [54] Díaz-Ruiz-Navamuel E, Piris A O, Pérez-Labajos C A. Reduction in CO₂ emissions in RoRo/Pax ports equipped with automatic mooring systems[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 879–886.
- [55] Ramos V, Carballo R, Álvarez M, et al. A port towards energy self-sufficiency using tidal stream power[J]. *Energy*, 2014, 71: 432–444.
- [56] Lamberti T, Sorce A, Di Fresco L, et al. Smart port: Exploiting renewable energy and storage potential of moored boats[C]// *OCEANS 2015 — Genova*, 2015: 1–3.
- [57] Lam J S L, Ko M J, Sim J R, et al. Feasibility of implementing energy management system in ports[C]// *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, 2017: 1621–1625.
- [58] Zhao Q, Xu H, Wall R S, et al. Building a bridge between port and city: Improving the urban competitiveness of port cities[J]. *Journal of Transport Geography*, 2017, 59: 120–133.
- [59] Al-Falahi M D, Nimma K S, Jayasinghe S D, et al. Power management optimization of hybrid power systems in electric ferries[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 172: 50–66.
- [60] Li N, Chen G, Govindan K, et al. Disruption management for truck appointment system at a container terminal: A green initiative[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 61: 261–273.
- [61] Bae H Y, Choe R, Park T, et al. Comparison of operations of AGVs and ALVs in an automated container terminal[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2011, 22(3): 413–426.
- [62] Rashidi H, Tsang E P. A complete and an incomplete algorithm for automated guided vehicle scheduling in container terminals[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011, 61(3): 630–641.
- [63] Pjevečević D, Vladislavljević I, Vukadinović K, et al. Application of DEA to the analysis of AGV fleet operations in a port container terminal[J]. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 2011, 20: 816–825.

- [64] Skinner B, Yuan S, Huang S, et al. Optimisation for job scheduling at automated container terminals using genetic algorithm[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 64(1): 511–523.
- [65] Xin J, Negenborn R R, Lodewijks G. Energy-aware control for automated container terminals using integrated flow shop scheduling and optimal control[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 44: 214–230.
- [66] Hu H, Zhang Y, Wang T, et al. A three-stage decomposition method for the joint vehicle dispatching and storage allocation problem in automated container terminals[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 129: 90–101.
- [67] Lee T, Nam H. A study on green shipping in major countries: In the view of shipyards, shipping companies, ports, and policies[J]. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 2017, 33(4): 253–262.
- [68] Ronen D. Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 1983, 12(2): 119–126.
- [69] Ronen D. Ship scheduling: The last decade[J]. *European Journal of Operational Research*, 1993, 71(3): 325–333.
- [70] Christiansen M, Fagerholt K, Ronen D. Ship routing and scheduling: Status and perspectives[J]. *Transportation Science*, 2004, 38(1): 1–18.
- [71] Christiansen M, Fagerholt K, Nygreen B, et al. Ship routing and scheduling in the new millennium[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 228(3): 467–483.
- [72] Meng Q, Wang S, Andersson H, et al. Containership routing and scheduling in liner shipping: Overview and future research directions[J]. *Transportation Science*, 2014, 48(2): 265–280.
- [73] Tran N K, Haasis H D. Literature survey of network optimization in container liner shipping[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2015, 27: 139–179.
- [74] Lee C Y, Song D P. Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 95: 442–474.
- [75] Wang S, Meng Q. Sailing speed optimization for container ships in a liner shipping network[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(3): 701–714.
- [76] Corbett J J, Wang H, Winebrake J J. The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, 14(8): 593–598.
- [77] Psaraftis H N, Kontovas C A. Balancing the economic and environmental performance of maritime transportation[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2010, 15: 458–462.
- [78] Cariou P. Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping?[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2011, 16: 260–264.
- [79] Kontovas C, Psaraftis H N. Reduction of emissions along the maritime intermodal container chain: Operational models and policies[J]. *Maritime Policy and Management*, 2011, 38(4): 451–469.
- [80] Chang C C, Chang C H. Energy conservation for international dry bulk carriers via vessel speed reduction[J]. *Energy Policy*, 2013, 50: 710–715.
- [81] Maloni M, Paul J A, Gligor D M. Slow steaming impacts on ocean carriers and shippers[J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2013, 15(2): 151–171.
- [82] Woo J K, Moon D S H. The effects of slow steaming on the environmental performance in liner shipping[J]. *Maritime Policy & Management*, 2014, 41(2): 176–191.
- [83] Chang C C, Wang C M. Evaluating the effects of speed reduce for shipping costs and CO₂ emission[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 31: 110–115.
- [84] Lee C Y, Lee H L, Zhang J. The impact of slow ocean steaming on delivery reliability and fuel consumption[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 76: 176–190.
- [85] Ferrari C, Parola F, Tei A. Determinants of slow steaming and implications on service patterns[J]. *Maritime Policy & Management*, 2015, 42(7): 636–652.
- [86] Ammar N R. Energy- and cost-efficiency analysis of greenhouse gas emission reduction using slow steaming of ships: Case study RO-RO cargo vessel[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2018, 13(8): 868–876.
- [87] Cariou P, Parola F, Notteboom T. Towards low carbon global supply chains: A multi-trade analysis of CO₂ emission reductions in container shipping[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 208: 17–28.
- [88] Gausel N T. Optimal ship speed and routing when considering ECA regulations[D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2014.
- [89] Panasiuk I, Lebedevas S. The assessment of the possibilities for the Lithuanian fleet to comply with new environmental requirements[J]. *Transport*, 2014, 29(1): 50–58.
- [90] Patricksson Ø S, Fagerholt K, Rakke J G. The fleet renewal problem with regional emission limitations: Case study from roll-on/roll-off shipping[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 56: 346–358.
- [91] Carr E W, Corbett J J. Ship compliance in Emission Control Areas: Technology costs and policy instruments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49: 9584–9591.
- [92] Panasiuk I, Turkina L. The evaluation of investments efficiency of SO_x scrubber installation[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 40: 87–96.

- [93] Antturi J, Hänninen O, Jalkanen J P, et al. Costs and benefits of low-sulphur fuel standard for Baltic Sea shipping[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 184: 431–440.
- [94] Zis T, Angeloudis P, Bell M G H, et al. Payback period for emissions abatement alternatives — Role of regulation and fuel prices[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2549(1): 37–44.
- [95] Zhu M, Li K X, Shi W, et al. Incentive policy for reduction of emission from ships: A case study of China[J]. *Marine Policy*, 2017, 86: 253–258.
- [96] Abadie L M, Goicoechea N, Galarraga I. Adapting the shipping sector to stricter emissions regulations: Fuel switching or installing a scrubber?[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 57: 237–250.
- [97] Lindstad H E, Rehn C F, Eskeland G S. Sulphur abatement globally in maritime shipping[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 57: 303–313.
- [98] Solakivi T, Laari S, Kiiski T, et al. How shipowners have adapted to sulphur regulations — Evidence from Finnish seaborne trade[J]. *Case Studies on Transport Policy*, 2019, 7: 338–345.
- [99] Kim K, An J, Park K, et al. Analysis of a supercapacitor/battery hybrid power system for a bulk carrier[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(8): 1547. <https://doi.org/10.3390/app9081547>.
- [100] Van T C, Ramirez J, Rainey T, et al. Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 70: 123–134.
- [101] Ren J, Lützen M. Selection of sustainable alternative energy source for shipping: Multicriteria decision making under incomplete information[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 74: 1003–1019.
- [102] Annouch A, Bellabdaoui A. Gas-filling stations procurement problem with time windows using a heterogeneous fleet of full tankers[C]// 2015 10th International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications (SITA), Rabat, 2015: 1–6.
- [103] Sharafian A, Blomerus P, Mérida W. Natural gas as a ship fuel: Assessment of greenhouse gas and air pollutant reduction potential[J]. *Energy Policy*, 2019, 131: 332–346.
- [104] Nikopoulou Z, Cullinane K, Jensen A. The role of a cap-and-trade market in reducing NO_x and SO_x emissions: Prospects and benefits for ships within the Northern European ECA[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2013, 227(2): 136–154.
- [105] Brynolf S, Magnusson M, Fridell E, et al. Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 28: 6–18.
- [106] 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.
- [107] 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.
- [108] Nikopoulou Z. Incremental costs for reduction of air pollution from ships: A case study on North European emission control area[J]. *Maritime Policy & Management*, 2017, 44(8): 1056–1077.
- [109] Lamb T. Concepts for ferry propulsion and emissions performance improvement[J]. *Journal of Ship Production and Design*, 2015, 31(3): 170–180.
- [110] Zakaria N M G, Rahman S. Energy efficiency design index (EEDI) for inland vessels in Bangladesh[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 194: 362–369.
- [111] Lindstad E, Bø T I. Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 63: 276–290.
- [112] Esmailian E, Ghassemi H, Zakerdoost H. Systematic probabilistic design methodology for simultaneously optimizing the ship hull-propeller system[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2017, 9: 246–255.
- [113] Zakerdoost H, Ghassemi H. A multi-level optimization technique based on fuel consumption and energy index in early-stage ship design[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, 59: 1417–1438.
- [114] Göler H, Erdoğan O. Increasing operational efficiency of high speed RO-RO vessels via new hull coating technologies[J]. 18th Annual General Assembly of the International Association of Maritime Universities, Global Perspectives in MET: Towards Sustainable, Green and Integrated Maritime Transport, Proceedings, 2017, 1: 319–329.
- [115] Adland R, Cariou P, Jia H, et al. The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 178: 1–13.
- [116] Pagoropoulou A, Kjaer L L, Dong Y, et al. Economic and environmental impact trade-offs related to in-water hull cleanings of merchant vessels[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22(4): 916–929.
- [117] Ančić I, Šestan A. Influence of the required EEDI reduction factor on the CO₂ emission from bulk carriers[J]. *Energy policy*, 2015, 84: 107–116.

- [118] Tzannatos E, Stournaras L. EEDI analysis of Ro-Pax and passenger ships in Greece[J]. *Maritime Policy & Management*, 2014, 42(4): 305–316.
- [119] Ekanem Attah E, Bucknall R. An analysis of the energy efficiency of LNG ships powering options using the EEDI[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 110: 62–74.
- [120] Sun X, Yan X, Wu B, et al. Analysis of the operational energy efficiency for inland river ships[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2013, 22: 34–39.
- [121] Acomi N, Acomi O C. The influence of different types of marine fuel over the energy efficiency operational index[J]. *Energy Procedia*, 2014, 59: 243–248.
- [122] Lu R, Turan O, Boulougouris E, et al. A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 110: 18–28.
- [123] Heitmann N, Khalilian S. Accounting for carbon dioxide emissions from international shipping: Burden sharing under different UNFCCC allocation options and regime scenarios[J]. *Marine Policy*, 2011, 35(5): 682–691.
- [124] Lee T C, Chang Y T, Lee P T. Economy-wide impact analysis of a carbon tax on international container shipping[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2013, 58: 87–102.
- [125] Wang K, Fu X, Luo M. Modeling the impacts of alternative emission trading schemes on international shipping[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 77: 35–49.
- [126] Shi Y. Reducing greenhouse gas emissions from international shipping: Is it time to consider market-based measures[J]? *Marine Policy*, 2016, 64: 123–134.
- [127] Fagerholt K, Gausel N T, Rakke J G, et al. Maritime routing and speed optimization with emission control areas[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 52: 57–73.
- [128] Fagerholt K, Psaraftis H N. On two speed optimization problems for ships that sail in and out of emission control areas[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 39: 56–64.
- [129] Adland R, Fønnes G, Jia H, et al. The impact of regional environmental regulations on empirical vessel speeds[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 53: 37–49.
- [130] Gu Y, Wallace S W. Scrubber: A potentially overestimated compliance method for the emission control areas — The importance of involving a ship's sailing pattern in the evaluation[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 55: 51–66.
- [131] Chen L, Yip T L, Mou J. Provision of emission control area and the impact on shipping route choice and ship emissions[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 58: 280–291.
- [132] Zhen L, Li M, Hu Z, et al. The effects of emission control area regulations on cruise shipping[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 62: 47–63.
- [133] Fan L, Huang L. Analysis of the incentive for slow steaming in Chinese sulfur emission control areas[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2019, 2673(3): 165–175.
- [134] Raza Z, Woxenius J, Finnsgård C. Slow steaming as part of SECA compliance strategies among RoRo and RoPax shipping companies[J]. *Sustainability*, 2019, 11: 1435. <https://doi.org/10.3390/su11051435>.
- [135] Browning L, Hartley S, Bandemehr A, et al. Demonstration of fuel switching on oceangoing vessels in the Gulf of Mexico[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, 62(9): 1093–1101.
- [136] Chang Y T, Roh Y, Park H. Assessing noxious gases of vessel operations in a potential emission control area[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 28: 91–97.
- [137] Svindland M. The environmental effects of emission control area regulations on short sea shipping in Northern Europe: The case of container feeder vessels[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 61: 423–430.
- [138] Åström S, Yaramenka K, Winnes H, et al. The costs and benefits of a nitrogen emission control area in the Baltic and North Seas[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 59: 223–236.
- [139] Panagakos G P, Stamatopoulou E V, Psaraftis H N. The possible designation of the Mediterranean Sea as a SECA: A case study[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 28: 74–90.
- [140] Holmgren J, Nikopoulou Z, Ramstedt L, et al. Modelling modal choice effects of regulation on low-sulphur marine fuels in Northern Europe[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 28: 62–73.
- [141] Vierth I, Karlsson R, Mellin A. Effects of more stringent sulphur requirements for sea transports[J]. *Transportation Research Procedia*, 2015, 8: 125–135.
- [142] Zis T, Psaraftis H N. The implications of the new sulphur limits on the European Ro-Ro sector[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52: 185–201.
- [143] Zis T, Psaraftis H N. Operational measures to mitigate and reverse the potential modal shifts due to environmental legislation[J]. *Maritime Policy & Management*, 2019, 46(1): 117–132.
- [144] Zis T, Psaraftis H N, Panagakos G, et al. Policy measures to avert possible modal shifts caused by sulphur regulation in the European Ro-Ro sector[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 70: 1–17.