



“双碳”背景下国内外绿色港口建设发展综述

贺林林^{1,2}, 金勇¹, 彭银霞¹, 刘洋³

- (1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
3. 重庆科技大学 建筑工程学院, 重庆 401331)

摘要: 在全球生态危机愈演愈烈的情况下, 国际港口界将绿色发展理念贯穿于港口的建设运营中, 提出“绿色港口”的概念。绿色港口建设目的在于贯彻绿色发展理念, 使用绿色技术和实施绿色管理, 引导港口走资源节约型、环境友好型的发展道路。通过查阅大量资料文献, 以绿色港口建设发展为出发点, 从绿色港口理念、绿色港口技术、绿色港口管理以及绿色港口评价4个方面梳理国内外学者针对绿色港口的研究动态及港口的应用现状, 针对当前国内绿色港口建设中存在的问题, 形成改善意见与提升路径, 旨在将绿色发展理念贯穿于港口全生命周期, 为我国港口向绿色化转型提供参考。

关键词: 绿色港口; 双碳目标; 绿色技术; 可持续发展

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0042-09

Review of green port construction and development under carbon peaking and carbon neutrality goals background

HE Linlin^{1,2}, JIN Yong¹, PENG Yinxia¹, LIU Yang³

- (1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: In the context of the global ecological crisis, the international port community has put forward the concept of “green port” through the concept of green development throughout the construction and operation of the port. The purpose of green port construction is to implement the concept of green development using green technology and implementing green management, and guide the port to take a resource-saving and environment-friendly development path. By consulting a large amount of literature, this paper starts from the construction and development of green ports, and sorts out the research trends of domestic and foreign scholars on green ports and the application status of ports according to the four aspects of green port concept, green port technology, green port management and green port evaluation. In view of the existing problems in the construction of green ports in China, this paper forms improvement suggestions and promotion paths, aiming to integrate the concept of green development into the whole life cycle of ports and provide reference for the green transformation of ports in China.

Keywords: green port; carbon peaking and carbon neutrality goals; green technology; sustainable development

随着港口泊位大型化、专业化程度提升, 货物吞吐量持续快速增长, 极大促进了全球经济发展, 同时港口成为了主要污染源头和耗能单位之

一。面对日益严峻的港口环境问题, 全球各国及地区提出了诸多方案, 国际港口界提出“绿色港口”的发展理念来改善港口的环境, 荷兰鹿特丹

收稿日期: 2023-11-11

作者简介: 贺林林 (1983—), 女, 博士, 副教授, 从事港口海岸及近海工程结构设计理论及计算方法、土与结构相互作用等方面研究工作。

港、新加坡裕廊海、美国洛杉矶港和长滩港等采取行动贯彻该发展理念,并取得了显著成效;国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)为了对港口船舶排放进行控制,实施了一系列包括对港口海域硫氧化物、氮氧化物和颗粒物减排的控制措施;我国为融入全球治理、实现可持续发展,于2020年9月提出“碳达峰”与“碳中和”目标,旨在减排温室气体、保证能源安全,在此大背景下,国内港口涌现出一批港口绿色化建设先锋,如洋山港、广州港等。但受制于国内部分港口现实条件、技术成熟度、市场接受度等因素,有关绿色港口建设的规划理论、技术和实践经验尚处于起步阶段,港口绿色发展理念淡薄、缺乏有效的环境监督管理体系、绿色技术应用落实不够等问题依然存在。因此,在“碳达峰、碳中和”背景下,建设以资源节约、环境友好、低能耗、低污染为特征的绿色港口已成为港口提高核心竞争力、实现可持续发展的必然途径。

绿色港口研究主要集中于推动港口绿色发展的政策措施^[1-3]、绿色港口建模与仿真^[4-6]、绿色港口绩效评价^[7-10]、绿色低碳技术和新能源的应用^[11-14]等,关于绿色港口建设现状与发展趋势的研究成果较少。鉴于此,本文以绿色港口的建设发展为切入点,对标《绿色港口等级评价指南》中理念、行动、管理和效果4个项目,重点从绿色港口理念、绿色港口技术、绿色港口管理、绿色港口评价4方面梳理国内外研究现状,并针对目前国内绿色港口建设中存在的不足,提出未来的发展方向,以期对绿色港口规划、技术和管理的研究提供帮助,不断推动港口向绿色低碳方向转型。

1 绿色港口理念

1.1 绿色港口规划

绿色港口规划是基于港口规划的基本内容,考虑港口的社会、经济和自然的协调发展,对港口进行相关活动的合理安排,其遵循可持续发展原则^[15]。美洲港务局协会(AAPA)^[16]率先提出港

口的环境规划和环境管理问题,此后学术界对港口环境规划问题逐渐重视起来。Wiegman等^[17]考虑港口发展对环境承载力的考验,认为当代港口发展面临着港口规模盲目扩张导致环境承载力超负荷、能源消耗过多、水资源浪费和土地利用不合理、废气、废水和固体废物环境污染等多重压力。Wu等^[18]基于已有的论文和文件,总结可持续港口规划、生态港口规划和绿色港口规划的方法。胡怡等^[19]以北部湾港总体规划编制为例,探讨绿色发展理念融入港口总体规划各方面和全过程的思路和方法。谭凤等^[20]为探索港口绿色规划设计思路,以日照某发展中港区为例,优化调整港口的功能布局,并对港口的污染治理提出建设性意见。左天立等^[21]认为港口生态环保问题应贯穿港口建设期与运营期,提出生态型港口空间布局规划思路。

综上所述可知,国外学者与组织对绿色发展理念融入到港口规划问题展开了研究,成果显著,对我国绿色港口规划设计有重要的指导和参考价值。我国港口规划设计对绿色发展理念的探索尚处于起步阶段,研究主要集中在概念和思路方面。在今后的绿色港口规划建设中,港口的布局和规模应从社会、经济、自然综合角度考虑,重视开发与保护的协调,力求在发展港口的同时,做到环境污染的防治和生态平衡的保持。

1.2 绿色港口政策

完善的政策制度能够为绿色港口建设发展提供动力和保障。近年来,绿色港口政策研究成为国内外学术界的研究热点,部分学者从政策建议入手,对港口的绿色发展战略进行研究。Lam等^[22]从政策和管理角度出发,提出定价策略、环境质量监测与测量、市场准入机制及环境标准规定等港口管理工具和政策的制定与实施是影响港口绿色发展的因素,并对新加坡、上海、安特卫普和鹿特丹港进行实证研究。Tseng^[23]采用定量和定性相结合的混合方法研究影响绿色港口政策实施的关键因素,结果表明环境政策与监管是港口减排的关键因素。Woo等^[24]以釜山港为例,从经济和环境的

角度研究了港口的环境政策问题,结果表明港口环境政策有助于增强港口的竞争力。王爱虎等^[25]构建了港口与政府的两阶段决策模型,分析结果表明在政府减排补贴政策下港口减排效果显著。蒋凯^[26]在国家相关政策文件的基础上,对我国生态港口建设进行分析,从3个方面总结问题的成因,并对生态港口的建设提出相关建议。赵亚鹏等^[27]系统分析“双碳”目标下绿色港口政策有效性的影响因素,并提出有关“双碳”目标下绿色港口政策优化的对策。王丹^[28]梳理我国绿色港口建设相关政策、存在问题,并就岸电使用率低、港口企业可持续发展意识薄弱等问题给出对策建议。

通过以上综述可以得出,绿色港口政策研究在国际上正日益引起研究人员的关注,学者较多关注政策对绿色港口建设的促进效果。国内绿色港口政策仍以鼓励性措施为主,缺乏明确的激励机制和完善的监管体系,未来可借鉴国外绿色港口政策,推行船舶进港减速政策、岸电强制与奖励结合政策以及制定绿色港口发展计划等。

2 绿色港口技术

2.1 港口岸电技术

港口岸电作为港口节能减排的关键技术之一,受到政府和学术界的重视^[29]。近年来港口岸电技术已经在全球众多港口得到应用,如中国的宁波舟山港^[30]、洋山港^[31]、瑞典哥德堡港、美国洛杉矶港、德国吕贝克港^[32]等。部分学者研究了港口岸电使用的环境效益,Osses等^[33]应用一种与岸电系统相关的新型双向能量流策略,对停泊的船舶进行排放评估,结果表明使用岸电和液化天然气是港口减少排放的有效选择。Adamo等^[34]估算在意大利塔兰托港使用岸电代替柴油辅机供电时,船舶的 NO_x 和 CO_2 排放每年将分别减少1.097、25.686 t。Hall^[35]研究了挪威、法国和巴西3个不同区域的邮轮案例使用岸电技术减排效果,结果表明上述区域港口的 CO_2 排放量在使用岸电的情

况下可分别减少99.5%、84.9%和85.3%。为提升港口使用岸电的积极性,部分学者研究了政策对岸电技术推广的促进作用。周海英等^[36]考虑政府不同的补贴情况下,研究岸电技术与低硫油技术2种方案的使用情况和减排情况。李勇等^[37]以实际案例为研究对象,估算考虑政府补贴的岸电系统成本,指出政府补贴对港口岸电技术推广的必要性。陶学宗等^[38]为使港口企业使用岸电技术时利益最大化,建立包含岸电补贴和环境税2种政策的经济型分析模型,提出在不强制使用岸电的情况下,同时使用补贴和环境税会更利于促进岸电技术的应用。

综上所述,岸电环境效益十分突出,政策支持以及补贴可促进岸电的推广。但由于船舶使用岸电的积极性不高以及岸电相关标准和规范不健全,我国港口岸电使用率仍然较低。未来可以考虑政府、船方、港口企业三方效益,加大船舶使用岸电以及岸电设施建设和改造的支持力度,如统一岸电设施建设标准、规范岸电操作流程、降低岸电使用收费标准等。

2.2 清洁能源技术

清洁能源包括太阳能、风能等可再生能源,以及液化天然气等低碳能源。如何将绿色清洁能源应用到港口能源系统中,成为当前港口界关注的重要议题之一。国内外对绿色港口清洁能源利用相关研究基本围绕2点开展^[39],一是建设或改造港口工程设施,主要涉及风能、光伏、氢能等清洁能源。Raileanu等^[40]以康斯坦塔港为例,结合港口减排要求以及用电要求对风力进行测试,结果表明大多数情况下所选的风力涡轮机不会满负荷运行。Wemer^[41]提出在屋顶安装光伏发电设施的措施,该方法产生的电能可以直接为港区供电。Ahmad等^[42]以丹麦哥本哈根海港为例,设计一套混合能源系统,涉及太阳能与风能等,并运用仿真软件模拟出系统各能源的最优配置。二是研发采用低碳或零碳能源机械设备。洋浦国际集装箱码头全力打造全电气化港口,港内RTG全部

完成“油改电”,港内集卡也全部采用电动集卡,且在行业内率先采用电动集卡换电方案^[43]。宁波港将港内的集卡能源由燃油改为液化天然气(liquefied natural gas, LNG),大幅节约了运行成本,并降低了废气污染^[44]。李小霞^[45]对比氢电叉车、铅酸/锂电叉车、LNG叉车和柴油叉车对环境的影响,并提出氢燃料电池叉车符合绿色港口建设的需求。西班牙巴伦西亚港口作为试点港口,启动了在装卸和运输设备中推广使用氢燃料供能技术、装配氢燃料电池的试点工作^[46]。为实现进一步减碳,可通过利用港口绿电进行电解水制氢,为港口移动装备燃料电池补充氢燃料^[47];还可以根据港口大型装备作业特点,回收再利用机械势能^[48]。

上述研究与实例表明,清洁能源在港口的应用前景十分广阔。然而随着清洁能源在港口的应用,港口企业同时面临着诸多问题与机遇。比如,光伏发电、风力发电的选址等成为了港口的规划布置需要重点考虑的问题;氢能市场发展潜力巨

大,绿色港口建设应把握氢能产业发展的战略机遇,结合自身优势,发挥氢能在港口能源转型的重要作用。

2.3 环境污染防治与风险防控技术

除港口的节能减排技术外,环境污染防治与风险防控技术是绿色港口技术的另一重点。水污染防治方面,国内外部分港口已制定实施了一系列相对成熟的污染防治措施,贺林林等^[49]通过对已有研究成果的分析归纳,总结含尘雨水与冲洗水、集装箱冲洗水、生活污水、港区油污水4类港区污水防治措施,可为国内港口水污染防治提供参考和借鉴。大气污染防治方面,不同类型码头研究所针对的大气污染物有所不同。其中,对于干散货码头,所关注的主要污染物为颗粒物污染,防治措施整理如表1所示;对于集装箱码头,则主要关注集装箱周转过程中大型集装箱起重、集装箱设备与运输设备的废气排放。对于港口机械设备的节能减排方案,主要是使用清洁能源,前文已经介绍,不再赘述。

表1 干散货码头大气污染防治技术

污染防治技术	主要原理
封闭	针对作业过程中机器扰动产生的粉尘而采取的封闭局部空间的抑尘措施
防风抑尘	通过建设构筑物、建筑物或使用其他方式,减小和避免散货作业环节受外界风气象因素的影响,从而达到抑尘目的
覆盖	通过喷洒抑尘剂在煤炭等散货表面凝结成覆盖层,或通过苫布遮盖货物从而抑制粉尘
湿式除尘/抑尘	通过增加散货含水率,增加粉尘颗粒与大颗粒附着强度,增加堆垛表面张力,从而能够将扬尘有效地固定在水滴上达到降尘
干式除尘	通过空气动力学原理把颗粒物捕集在封闭设施内,防止扩散到环境中的抑尘方式

港口环境风险防控一般分为4个阶段:环境风险识别、环境风险预测与评估、港口环境风险综合分析以及风险的防范和管理措施的制定^[50]。港口的环境风险类型主要有溢油或化学品泄漏、爆炸、火灾等。刘伟等^[51]将网格化管理和信息技术相结合,建立港口危化品风险监测预警体系,实现对港口危化品的实时监测和预警,并且可以通过数据分析对危化品风险进行预测和预警。尹俊峰等^[52]提出一种基于多源数据的港口危险品智能监管技术,通过多维数据分析和管理的,建立一个基于云计算平台的港口危险品风险监测系统,

实现了港口危险品风险实时分析和快速响应。李庆洲^[53]分析辽宁省港口危险货物应急管理现状,提出港口危险货物应急管理的对策建议。尤晓光等^[54]为防范港口环境风险,运用熵权模糊综合评价模型对港区溢油环境风险水平进行评估。

综上所述,港口的环境污染防治及风险防控方面,学者们已经进行相应研究,但目前的港口污染治理情况仍比较严峻,部分港区的废气、污水处理设施陈旧、工艺单一;缺乏船舶污染与港口环境污染联防联控措施;港口环境应急管理相关理论研究和实践也相对滞后。

3 绿色港口管理

3.1 绿色港口运营

港口原有资源条件下要实现低碳发展只能提高资源的利用率,关于港口资源合理调度优化,是学术研究的热点。港口资源调度包括泊位分配、岸桥调度和分配、场桥调度和分配等,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。Du等^[55]为了量化潮汐对集装箱港口作业的影响,通过建模分析潮汐对船舶进出口的影响,并重新制定泊位分配策略,结果表明,该策略有助于船舶在港期间节时节能。Venturini^[56]考虑燃料消耗和总驻留时间因素,对船舶分配靠泊的时间和位置进行优化,以减少燃烧排放量。Nguyen等^[57]提出两种基于遗传算法(GA)和遗传规划(GP)的混合进化计算方法解决岸桥调度问题,还提出一种局部搜索启发式算法进行优化,并对所提出的混合计算方法进行测试,结果表明,与现有方法相比,它们具有竞争力和高效性。赵坤强等^[58]将泊位和岸桥联合优化问题分为2个阶段进行求解,第1阶段确定停靠的泊位顺序和分配的岸桥数,第2阶段根据实际情况匹配相应的岸桥。Peng等^[59]为减少碳排放而研究为堆场起重机分配有限资源的问题,通过将数学模型和仿真模型相结合,以中国某大型集装箱码头为例进行优化仿真,提出通用模型。

综合分析目前国内外学者对于港口运营的研究,可以发现现阶段对于港口运营优化方面的研究已颇具成果,但目前港口已经开始整合,对资源利用率有了更高的要求,在制定整个系统碳排放目标的大背景下,单一资源和主体的优化已经不能满足,需要港口群多种资源进行联合优化,考虑更多约束条件。

3.2 绿色港口环境监测

港口环境监测是减少港口对环境污染和破坏的必要手段,通过环境监测可以了解港口对环境的影响程度,为治理提供科学依据。在港口大气污染监测治理领域,一部分学者基于大气污染物

源解析技术,对不同类型的港口及港口发展不同阶段的大气污染物排放源清单进行研究,识别港口大气污染物排放源及主要污染物^[60-61];部分学者从港口大气污染物监测方法的角度进行研究^[62];还有学者从港口船舶排放清单编制^[63]、港作机械设备排放清单编制角度进行研究^[64]。水污染监测的研究主要集中在水质预测以及建立应急响应系统等方面。陈斌林等^[65]基于连云港港口海域水质监测数据并结合污染源调查分析,通过建立潮流模型计算各排污口的总量控制目标,并在此基础上提出不同时期的污染控制规划。郭凌志^[66]搭建一个基于NB-IOT的水域监测系统,解决了很多系统存在的监测范围小、监测时间短等问题。兰音波^[67]利用基于Zigbee技术的无线传感器采集各类水质数据,将数据采集端获得的信息传输到系统监控终端,完成水质无线监测功能。

综上所述,港口的环境监测主要集中在监测技术与排放清单方面,然而由于我国缺少港口环境监测的法律法规,且运营期港区监测数据很少公开,导致无法形成完整的港口环保监督管理制度;港口环境污染监测采用的手段也比较单一化,对污染物分析能力存在明显不足,导致船舶污染以及港口环境污染的防治工作受到较大的阻碍,因此港口环境监测问题亟需进一步研究。

3.3 绿色港口绩效评价

对港口进行绩效评价可以采用定量和定性相结合的方法,收集相关数据和信息,通过指标计算、问卷调查、现场观察等方式进行评估,并根据评估结果提出改进建议和措施,以促进绿色港口的可持续发展。Roll等^[68]率先将DEA评价方法引入港口行业,指出港口绩效评价可以使港口管理者和研究人员更深入地了解港口运营情况。Yang^[69]采用层次分析法计算绿色集装箱码头评价标准的相对权重,并对东亚6个大型港口可持续发展绩效进行评估,为航运公司和港口管理公司提供了一些关于绿色集装箱码头运营和绿色港口战略制定的建议。Huang等^[70]以上海港和釜山港

为研究对象,运用3阶段数据包络分析法(DEA)分别对2个港口的效率进行评价,并根据评价结果给出优化绩效的改进意见。

由上述研究可知,学者们对于港口绩效的研究注重于评价方法与评价指标方面,且港口绩效评价已从传统的运营效率评价向绿色效率评价转变。现有的绩效评价体系主要包括财务指标、安全和设施利用指标等,通常缺少港口绿色指标,将港口绿色指标纳入评价指标以形成全面有效的绩效评价方法是当前迫切需要解

决的问题。

4 绿色港口评价

4.1 国外绿色港口评价体系

目前,国际上还没有统一的绿色港口评价体系,比较有影响力的有欧洲生态港认证体系(Eco-Ports)、北美绿色航运计划(GEMP)和亚太绿色港口奖励计划(GPAS),他们针对不同的评估领域对港口绿色化效果进行评价^[71]。绿色港口评价体系的相关比较见表2。

表2 国外绿色港口评价体系比较

各体系比较	英文简称	组织认证机构	影响力范围	全球认证数量	重点评估领域
欧洲生态港认证体系	EcoPorts	欧洲海港组织	全球(欧洲、北美)	134(2022)	随着全球环保形势的变化,每年度更新关注重点,涵盖污染控制、清洁能源、生态资源、气候变化等领域
北美绿色航运认证体系	GEMP	北美绿色航运协会	全球(重点北美区)	55(2023)	PM、NO _x 、SO _x 、大气污染控制、油污水、风险防控、生物物种入侵、温室气体、固废、社区影响、环保意识等
亚太绿色港口奖励计划	GPAS	亚太港口服务组织	全球(重点亚太区)	45(2022)	绿色港口发展意识与意愿及宣传推广、清洁能源、节能措施、环保措施、绿色管理的行动实施及其效率和效果

注:括号中数字为统计截止年份。数据来源于GE官网<https://green-marine.org/>、ECOSLC官网<https://www.ecoslc.eu/>、APSN官网<https://www.apecpsn.org/>。

4.2 国内绿色港口评价体系

自2020年《绿色港口等级评价指南》提出后,我国共有5个港口码头被评为5星绿色港口,38个港口码头被评为4星绿色港口,5个港口码头被评为3星绿色港口,具体绿色港口信息见表3。由表可知,我国部分港口在建设绿色港口方面已经取

得成效,但评价为5星级绿色港口的仍为少数,说明其他港口绿色化建设仍有不足之处,有待改进。绿色港口评价体系的构建与完善将引导更多港口向绿色可持续方向发展,为完善我国绿色港口评价体系,可以学习借鉴国外比较完善的绿色港口评价体系建设的经验。

表3 中国绿色港口

绿色港口评价等级	绿色港口
5星	上海市洋山深水港四期码头、南京港龙潭集装箱码头、黄骅港煤炭码头、天津港太平洋国际集装箱码头、青岛港前湾港区迪拜环球码头
4星	南京港龙潭集装箱码头、太仓武港码头、厦门海天码头、天津港欧亚国际集装箱码头、天津港集装箱码头、厦门海润码头、天津港太平洋国际集装箱码头、日照港集装箱码头、广州港南沙一期码头、上海国际航运中心洋山深水港区一、二期码头、秦皇岛港股份有限公司煤三期码头、秦皇岛港股份有限公司煤五期码头、天津港中煤华能煤码头7 [#] 、8 [#] 泊位、天津港远航国际矿石码头南26 [#] 泊位、国能(天津)港务码头南13 [#] 、14 [#] 、15 [#] 泊位、鸿山热电煤码头、张家港港务集团港盛散货码头、上海浦东集装箱码头、江苏江阴港港口集团股份有限公司大澄分公司码头、扬州泰富港、前湾港区前港分公司码头63 [#] ~68 [#] 、76 [#] 、86 [#] 、87 [#] 泊位、宁波北仑第一集装箱码头、国投中煤同煤京唐港口有限公司国投京唐港、天津港联盟国际集装箱码头、唐山港曹妃甸港区煤码头二期工程、嵩屿码头、重庆果园集装箱码头、洋浦国际集装箱码头、赤湾集装箱码头、青岛前湾二、三期集装箱码头、深圳妈港仓码头、上海国际航运中心洋山深水港区三期码头、阳逻港二期码头、广州港南沙集装箱三期码头、舟山鼠浪湖码头、秦皇岛港股份有限公司煤四期及扩容码头、宁波北仑第三集装箱码头、青岛前湾联合集装箱码头
3星	太仓港上港正和集装箱码头、太仓港正和兴港集装箱码头、黄骅港散货港区矿石码头、贵港北港国际集装箱码头4 [#] 、5 [#] 、6 [#] 泊位、镇江港国际集装箱码头14 [#] 、15 [#] 泊位

注:数据来源于中国港口协会官网。

5 结论与建议

1) 我国港口规划设计对绿色发展理念的探索,尚处于起步阶段,研究主要集中在概念和思路方面,绿色港口政策仍以鼓励性措施为主,缺乏明确的激励机制和完善的监管体系。在今后的绿色港口规划研究中,港口的布局 and 规模应从自然、经济、社会综合角度考虑,重视开发与保护的协调,力求在发展港口的同时做到环境污染的防治、生态平衡的保持;结合国情借鉴国外绿色港口政策,如推行船舶进港减速政策、岸电方面实施强制与奖励结合的政策以及制定绿色港口发展计划。

2) 针对国内绿色港口技术的不足,未来应加快岸电基础设施建设,通过减免服务费、优先靠泊等措施,提高码头靠港船舶岸电利用率;增设风力发电和太阳能发电设施,利用自然资源来生产清洁能源,规划新建港区办公楼及仓库安装光伏发电设施,把握氢能产业发展的战略机遇,结合自身优势,发挥氢能在港口能源转型的重要作用;开展港口环境应急管理体系研究,优化和完善港口环境风险管控措施,在建设和运营过程中加强防范意识和管管理,配备有效的应急设备,制定完善的应急预案,防治环境污染。

3) 绿色港口管理方面,应建立港口内部各个系统之间的数据共享机制,实现信息的流通和交换,运用智能算法和优化模型,对港口资源进行全面管控和调度;通过预测需求、动态调整作业计划、优化资源配置,实现最佳的船舶、车辆和设备调度,减少空闲时间和等待时间;建立健全的数据采集和监测机制、激励机制,鼓励监测技术创新;将港口绿色指标纳入港口绩效评价,形成全面有效的绩效评价方法。

4) 学习借鉴国际上较成熟的绿色港口评价体系和研究吸收有关先进经验,补充完善中国现有绿色港口等级评价体系,鼓励港口积极参与认证评级,推动绿色港口建设;跟踪对比研究已认证为五星级绿色港口的评价指标和运行指标,总结提出可借鉴、可复制推广的先进经验和技术指标体系。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] AREGALL M G, BERGQVIST R, MONIOS J. A global review of the hinterland dimension of green port strategies[J]. *Transportation research part D: transport and environment*, 2018, 59(3): 23-34.
- [3] WOO J K, MOON D S H, 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(4): 234-242.
- [4] GENG X, WEN Y, ZHOU C, et al. Establishment of the sustainable ecosystem for the regional shipping industry based on system dynamics[J]. *Sustainability*, 2017, 9(5): 742.
- [5] DAI Q, YANG J. A distributionally robust chance-constrained approach for modeling demand uncertainty in green port-hinterland transportation network optimization[J]. *Symmetry*, 2020, 12(9): 1492.
- [6] CHEN J, ZHANG W, SONG L, et al. The coupling effect between economic development and the urban ecological environment in Shanghai port[J]. *Science of the total environment*, 2022, 841: 156734.
- [7] DI VAIO A, VARRIALE L, ALVINOI F. Key performance indicators for developing environmentally sustainable and energy efficient ports: Evidence from Italy[J]. *Energy policy*, 2018, 122(11): 229-240.
- [8] HUA C, CHEN J, WAN Z, et al. Evaluation and governance of green development practice of port: A sea port case of China[J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 249(3): 119434.
- [9] WAN C P, ZHANG D, YAN X P, 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*, 2017, 61: 431-443.
- [10] 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.

- [11] 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(8): 31-43.
- [12] WANG K, HU Q Q, ZHOU M J, et al. Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports[J]. *Case studies on transport policy*, 2021, 9(3): 1298-1312.
- [13] 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.
- [14] HERVÁS-PERALTA M, POVEDA-REYES S, MOLERO G D, et al. Improving the performance of dry and maritime ports by increasing knowledge about the most relevant functionalities of the Terminal Operating System (TOS)[J]. *Sustainability*, 2019, 11(6): 1648.
- [15] 吴小芳. 绿色港口规划的理论与方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [16] HOLMES G, THEODORE L, SINGH B. *Environmental management handbook* [M]. Amsterdam: IOS press, 1994.
- [17] WIEGMANS B W, LOUW E. Changing port-city relations at Amsterdam: A new phase at the interface[J]. *Journal of transport geography*, 2011, 19(4): 575-583.
- [18] WU X F, ZHANG L P, YANG H. Integration of eco-centric views of sustainability in port planning [J]. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2971.
- [19] 胡怡, 姚海元, 陈正勇, 等. 落实绿色发展理念的港口空间规划实践: 以北部湾港总体规划为例[J]. *水运工程*, 2023(2): 12-16.
- [20] 谭凤, 马小江, 李大功, 等. 绿色港口规划设计思路[J]. *水运工程*, 2021(10): 104-110.
- [21] 左天立, 查雅平, 聂向军, 等. 生态型港口规划理念研究[J]. *水运工程*, 2017(5): 56-61.
- [22] 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.
- [23] TSENG P, PILCHER N. Evaluating the key factors of green port policies in Taiwan through quantitative and qualitative approaches [J]. *Transport policy*. 2019, 82: 127-137.
- [24] WOO J K, MOON D S H, 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(4): 234-242.
- [25] 王爱虎, 黄凌波, 贺裕雁, 等. 减排补贴与私有化政策下港口竞争与合作[J]. *华南理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 23(3): 8-19.
- [26] 蒋凯. 我国生态港口建设现状和发展对策[J]. *港口科技*, 2021(11): 16-19.
- [27] 赵亚鹏, 张佳莹, 苏持. “双碳”目标下绿色港口政策有效性实证研究: 以宁波为例[J]. *海洋经济*, 2023, 13(4): 81-87.
- [28] 王丹. 我国绿色港口建设相关政策、存在问题及对策建议[J]. *集装箱化*, 2023, 34(9): 1-6.
- [29] DING K, YAO C, LI Y, et al. A review on fault diagnosis technology of key components in cold ironing system[J]. *Sustainability*, 2022, 14(10): 6197.
- [30] 任小波, 周朝丰, 朱善庆, 等. 宁波舟山港集装箱港区发展思路与建设举措 [J]. *水运工程*, 2023 (6): 68-73, 95.
- [31] Yang shan deep water port. Top China Travel [EB/OL]. (2019-06-01) [2023-10-10]. <https://www.topchinatravel.com/china-attractions/yangshan-deep-water-port.htm>.
- [32] 谈健, 韩俊, 归三荣, 等. 船舶岸电系统发展及应用[J]. *上海海事大学学报*, 2017, 38(3): 90-95.
- [33] OSSES J R P, PALMA V M, REUSSER C A, et al. Emissions assessment of a tanker in a Chilean port using bi-directional cold ironing integrated to LNG [J]. *Sustainable energy technologies and assessments*, 2022, 52(8): 102135.
- [34] ADAMO F, AADRIA G, CAVONE G, et al. Estimation of ship emissions in the port of Taranto [J]. *Measurement*, 2014, 47(1): 982-988.
- [35] HALL W J. Assessment of CO₂ and priority pollutant reduction by installation of shoreside power [J]. *Resources, conservation and recycling*, 2010, 54 (7):

- 462-467.
- [36] 周海英, 张文静. 绿色港口建设下港口与船舶减排决策研究[J]. 科技管理研究, 2022, 42(7): 205-214.
- [37] 李勇, 张旭, 林朝华. 基于政府补贴政策下的岸电技术经济性分析[J]. 港工技术, 2018, 55(3): 88-92.
- [38] 陶学宗, 王谦益, 李汉卿. 船舶使用岸电的经济性分析[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 492-502.
- [39] VICHOS E, SIFAKIS N, TSOUTSOS T. Challenges of integrating hydrogen energy storage systems into nearly zero-energy ports[J]. Energy, 2022, 241(Feb. 15): 122878.
- [40] RAILEANU A B, ONEA F, RUSU E. Implementation of offshore wind turbines to reduce air pollution in coastal areas: case study constanta harbour in the black sea[J]. Journal of marine science and engineering, 2020, 8(8): 550.
- [41] WERNER B. Reduction of the CO₂ footprints of container terminals by photovoltaics [R]. Bremen, Germany: Green Efforts Project, 2014.
- [42] AHAMAD N B, OTHMAN M, VASQUEZ J C, et al. Optimal sizing and performance evaluation of a renewable energy based microgrid in future seaports [C]//2018 IEEE international conference on industrial technology (ICIT). Lyon: IEEE, 2018: 1043-1048.
- [43] 王宇, 李海波, 李雯. 洋浦区域国际集装箱枢纽港绿色低碳发展路径[J]. 中国港口, 2023(2): 19-21.
- [44] 陶学宗, 张秀芝. 宁波港域内集卡“油改气”减排节支效果评价[J]. 集装箱化, 2018, 29(11): 1-3.
- [45] 李小霞. 氢燃料叉车在绿色港口建设中的应用[J]. 中国港口, 2020(9): 60-61.
- [46] 李雪威, 单天雷. 全球氢港建设研究[J]. 经济与管理评论, 2023(2): 109-119.
- [47] 刘岢孟, 高俊莲, 孙旭东, 等. 中国港口城市氢能发展潜力与对策研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 108-117.
- [48] 王凯. 能量回馈单元在港口龙门吊油改电项目上的应用及价值分析[J]. 电工技术, 2021(22): 179-184.
- [49] 贺林林, 贾瑞, 焦钰祺, 等. 绿色港口建设中港区水污染研究综述[J]. 人民长江, 2021, 52(9): 38-45.
- [50] 张利鸣, 李树兵, 龚辉, 等. 环境风险分析在港口规划环境影响评价中的应用[J]. 中国航海, 2006(2): 91-95.
- [51] 刘伟, 李鹏, 陈振元, 等. 港口危化品风险监测预警体系构建[J]. 环境与可持续发展, 2015, 3(3): 126-133.
- [52] 尹俊峰, 杜忠群, 陈爱玲. 基于多源数据的港口危险品智能监管技术研究[J]. 现代电子技术, 2017(18): 95-97.
- [53] 李庆洲. 港口危险货物应急管理工作对策建议[J]. 港口科技, 2020(12): 35-38.
- [54] 尤晓光, 陈明波. 基于熵权模糊综合评价法的宁波舟山港大树港区溢油事故环境风险评估[J]. 水运管理, 2021, 43(8): 12-15.
- [55] 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.
- [56] 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(7): 142-159.
- [57] NGUYEN S, ZHANG M, JOHNSTON M, et al. Hybrid evolutionary computation methods for quay crane scheduling problems [J]. Computers & operations research, 2013, 40(8): 2083-2093.
- [58] 赵坤强, 韩晓龙, 梁承姬. 连续泊位下集装箱港口泊位与岸桥协同调度优化研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(2): 198-202.
- [59] 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.
- [60] 杨秀妍. 天津港口区域大气污染特征与对策措施研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(S2): 337-340.
- [61] 谢飞. 大气污染源清单对区域环境管理的意义[J]. 资源节约与环保, 2020(1): 37.
- [62] 王甲智, 洪文俊. 港口大气环境主要污染物及其检测方法的探讨[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(7): 135-136.