

文章编号:1000-4653(2026)01-0096-09

环渤海区域内港口群碳排放效率测度及影响因素研究

于少强*, 武镜晗, 李雪, 陈康
(大连海事大学航运经济与管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:随着《2024—2025年节能降碳行动方案》的推出,港口行业作为交通运输系统的核心组成部分,面临着节能减排的紧迫任务。为提升区域港口群碳排放效率、增强港口群的竞争力、推动环渤海区域内港口群实现更加可持续的发展目标,文章基于非期望产出的超效率SBM-Malmquist模型,测算2007年~2022年环渤海14个主要港口的碳排放效率及动态效率,并构建Tobit回归模型对港口碳排放效率的影响因素进行研究。环渤海区域内港口群碳排放效率由山东地区>辽宁地区>京津冀地区转变为京津冀地区>山东地区>辽宁地区,并且京津冀及山东港口碳排放效率与辽宁港口的差距在不断加大。科技创新、生态补偿是港口碳排放效率提升的主要因素,而对外开放水平、交通运输能力、产业结构对港口碳排放效率产生负向影响。基于此,论文提出了环渤海区域内港口群碳排放效率提升及管理优化的途径。

关键词:环渤海港口;港口碳排放效率;SBM模型;Malmquist指数;Tobit模型

中图分类号:U651 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.01.010

Measurement of carbon emission efficiency and influencing factors of port clusters in the Bohai Rim region

YU Shaoqiang*, WU Jinghan, LI Xue, CHEN Kang

(School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: With the implementation of the “2024-2025 Energy Conservation and Carbon Reduction Action Plan”, the port industry, as a core component of the transportation system, faces urgent tasks in energy conservation and emission reduction. To enhance the carbon emission efficiency and competitiveness of regional port clusters, and to promote more sustainable development of port clusters in the Bohai Rim region, this study measures the carbon emission efficiency and dynamic efficiency of 14 major ports in the Bohai Rim from 2007 to 2022 using the unexpected output super-efficiency SBM-Malmquist model. A Tobit regression model is further constructed to analyze the influencing factors of port carbon emission efficiency. The results reveal an overall upward trend in carbon emission efficiency among Bohai Rim ports. The regional ranking of carbon emission efficiency has shifted from Shandong > Liaodong > Jingjinji to Jingjinji > Shandong > Liaodong, with the efficiency gap between Jingjinji and the Shandong and Liaodong Peninsula ports widening. Scientific innovation and ecological compensation are identified as primary drivers of port carbon emission efficiency improvement, while the level of openness, transport capacity, and industrial structure exert negative effects. Based on these findings, this paper proposes pathways for improving carbon emission efficiency and optimizing management in Bohai Rim port clusters.

Key words: ports in the Bohai Rim region; port carbon emission efficiency; SBM model; Malmquist index; Tobit model

收稿日期:2025-01-16

基金项目:国家自然科学基金项目(72071025);国家社会科学基金项目(24BGJ039)资助

作者简介:于少强(1969—),男,教授,研究方向为战略与决策管理。*通信作者:yushaoqiang@dlnu.edu.cn

引用格式:于少强,武镜晗,李雪,等.环渤海区域内港口群碳排放效率测度及影响因素研究[J].中国航海,2026,49(1):96-104.

YU S Q, WU J H, LI X, et al. Measurement of carbon emission efficiency and influencing factors of port clusters in the Bohai Rim region [J]. Navigation of China, 2026, 49(1): 96-104. (in Chinese)

在国内国际双循环背景下,港口作为连接国内外市场的关键枢纽,其运输和物流活动不仅承载着经济发展的重任,更对全球碳排放量有着重要的影响。港口效率关乎港口货物处理、服务速度,而港口碳排放效率在聚焦创造经济价值的同时,也体现对环境的友好度,即每单位碳排放所能带来的经济效益。随着“碳达峰、碳中和”目标的明确及《2024—2025年节能降碳行动方案》的实施,港口绿色转型成为高质量发展的必由之路。

环渤海港口群,作为我国五大港口群之一,不仅是东北亚经济圈的重要组成部分,还承载着区域节能减排的重要使命。近年来,虽在基础设施建设与运营能力上取得了显著成就,但在绿色低碳发展方面仍面临诸多挑战,岸线资源利用不合理、能源消耗过度等问题,共同导致了较高的能耗,与国家倡导的绿色低碳发展理念尚存差距。因此,提升环渤海区域内港口群的碳排放效率,成为当前亟待解决的重要课题。

在学术研究领域,港口效率与碳排放效率的测度及其影响因素分析一直是研究热点。在大多数有关港口效率评价的文献中,主要使用传统的效率研究方法—数据包络分析法(DEA)。从早期 MARTI-MEZ 等^[1]传统 DEA 模型,到 DONG 等^[2]构建的 CCR 模型、MUSTAFA 等^[3]构建的 BCC 模型等改进模型,再到 TONE^[4]提出基于松弛变量的效率度量方法(SBM-DEA 模型),DEA 方法不断演进以更准确地反映港口效率。林秀群等^[5]和贾鹏等^[6]采用 Super-SBM 与 Malmquist 模型结合的方式,分别对长江经济带的物流业碳排放效率和中国绿色发展效率进行了深入评估。随着全球对气候变化的重视加深,研究开始将碳排放纳入效率评估框架。邵言波等^[7]构建 Super-SBM-GML 指数模型,对港口绿色低碳效率进行测算和评价。郑琰等^[8]则基于三阶段 SBM-DEA,探讨了长三角港口群在考虑碳排放因素下的动态效率问题,为港口绿色可持续发展提供了重要参考。

在分析港口碳排放效率的影响因素时,研究发现这是一个多维度的问题。早期研究聚焦于基础设施建设^[9],随后的管理政策^[10]、港口专业化和规模^[11]、社会经济基础^[12]等外部因素也被认为是影响港口效率的关键因素。周玉涛等^[13]还通过时空分析探讨了环渤海地区港口效率的演变特征及驱动机制。

现有文献在港口碳排放效率的测量评估领域已有较丰富基础,同时也提供了诸多改进思路。首先,

多数研究使用传统 DEA 或 SFA 模型分析行业效率,却鲜有研究能同时兼顾环境因素及动态效率变化。其次,非期望产出如碳排放的环境影响日益凸显,但当前研究多未充分考虑这一关键因素,难以充分契合港口绿色发展的新政策导向。第三,国内关于港口碳排放效率影响因素的研究多以全国主要沿海港口为主开展,针对特定区域如环渤海港口群的深入探讨尚显不足。

鉴于此,本文选取环渤海地区大连港、营口港、盘锦港、丹东港、锦州港、葫芦岛港、天津港、黄骅港、秦皇岛港、唐山港、青岛港、烟台港、威海港、日照港 14 个港口为研究对象,依据空间分布划分辽宁港口群、京津冀港口群、山东港口群三大子港口群,采用超效率 SBM-Malmquist 模型测算其碳排放效率,并深入剖析了影响其碳排放效率因素,旨在为区域港口群管理提供科学依据,促进港口绿色、高效、可持续发展。

1 研究方法及指标选取

1.1 研究方法

1.1.1 超效率 SBM 模型

SBM(Slack Based Measure)模型是 TONE^[4]提出的一种非径向模型。本文选取超效率 SBM 模型对环渤海区域内港口碳排放效率进行评价。计算公式如下:

$$\theta^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{io,t}}}{1 + \frac{1}{q+h} \left(\sum_{r=1}^q \frac{s_r^+}{y_{ro,t}} + \sum_{k=1}^h \frac{s_k^-}{b_{ko,t}} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} x_{io,t} = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1, j \neq o}^n l_{j,t} x_{ij,t} + s_i^-, i = 1, 2, \dots, m; \\ y_{ro,t} = \sum_{r=1}^T \sum_{j=1, j \neq o}^n l_{j,t} y_{rj,t} - s_r^+, r = 1, 2, \dots, q; \\ b_{ko,t} = \sum_{k=1}^T \sum_{j=1, j \neq o}^n l_{j,t} b_{kj,t} + s_k^-, k = 1, 2, \dots, h; \\ l_{j,t}, s_i^-, s_r^+, s_k^- \geq 0, (\forall j, i, r, k) \end{cases} \quad (2)$$

式(1)—(2)中: θ^* 为决策单元 o 的效率, m 表示投入指标的个数, q 表示期望产出的个数, h 表示非期望产出的个数, $l_{j,t}$ 为决策权重, n 表示决策单元的个数, t 表示时期数; $x_{ij,t}, x_{io,t}$ 表示第 j, o 个决策单元第 t 期的第 i 项投入; $y_{rj,t}, y_{ro,t}$ 表示第 j, o 个决策单元第 t 期的第 r 项期望产出; $b_{kj,t}, b_{ko,t}$ 表示第 j, o 决策单元第 t 期的第 k 项非期望产出; s_i^-, s_r^+, s_k^- 分别表示投入、期望产出、非期望产出的松弛变量。当 θ^* 大于

或等于1时,该单元DEA有效, θ^* 小于1时DEA无效。

1.1.2 Malmquist 指数模型

本文提出的 Malmquist 指数模型,对环渤海港口的全要素碳排放效率进行了动态变化的测算。Malmquist 指数计算公式如下:

$$M_g = \frac{E_g(x_{j,t+1}, y_{j,t+1}, b_{j,t+1})}{E_g(x_{j,t}, y_{j,t}, b_{j,t})} \quad (3)$$

$$C_E = \frac{E_{t+1}(x_{j,t+1}, y_{j,t+1}, b_{j,t+1})}{E_t(x_{j,t}, y_{j,t}, b_{j,t})} \quad (4)$$

$$C_T = \frac{\frac{E_g(x_{j,t+1}, y_{j,t+1}, b_{j,t+1})}{E_{t+1}(x_{j,t+1}, y_{j,t+1}, b_{j,t+1})}}{\frac{E_g(x_{j,t}, y_{j,t}, b_{j,t})}{E_t(x_{j,t}, y_{j,t}, b_{j,t})}} \quad (5)$$

式(3)—(5)中: $E_{t+1}(x_{j,t+1}, y_{j,t+1}, b_{j,t+1})$ 和 $E_t(x_{j,t}, y_{j,t}, b_{j,t})$ 表示决策单元 j 基于当期的投入产出构建前沿面的效率, $E_g(x_{j,t+1}, y_{j,t+1}, b_{j,t+1})$ 和 $E_g(x_{j,t}, y_{j,t}, b_{j,t})$ 表示决策单元 j 基于全局投入产出构建前沿时 $t+1$ 时期和 t 时期的效率, $x_{j,t}, y_{j,t}, b_{j,t}$ 分别表示决策单元 j 在 t 期的投入,期望产出和非期望产出。

$M_g > 1$ 表示效率较上期有所增长, $M_g < 1$ 表示效率较上期有所下降, $M_g = 1$ 表示效率不变。技术效率变化指数(C_E)描述了 t 时期到 $t+1$ 时期技术效率变化,也就是该决策单元距离技术前沿面的差距的改变, $C_E > 1$ 表明技术效率提高;技术进步变化指数(C_T)描述了 t 时期到 $t+1$ 时期技术前沿的移动, $C_T > 1$ 表示技术取得了进步。

1.1.3 Tobit 模型

利用超效率SBM模型得到的效率必定大于0,利用一般的线性回归模型会产生偏差,因此,研究中选择使用Tobit模型进行影响因素分析,Tobit的一般形式为:

$$y_{at} = \begin{cases} \alpha + \beta x_{at} + \varepsilon, \alpha + \beta x_{at} + \varepsilon \geq 0 \\ 0, \alpha + \beta x_{at} + \varepsilon < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: y 表示被解释变量, x 表示解释变量, α 为常数项, β 为回归系数, ε 为扰动项,并且 ε 服从均值为0,方差为 σ^2 的正态分布。

论文以港口碳排放效率为因变量,影响因素指标为自变量构建港口碳排放效率Tobit回归方程:

$$E_{at} = \beta_0 + \beta_1 Z_{at1} + \beta_2 Z_{at2} + \beta_3 Z_{at3} + \beta_4 Z_{at4} + \beta_5 Z_{at5} + \beta_6 Z_{at6} + \varepsilon_{at} \quad (7)$$

式(7)中: E_{at} 表示第 a 个港口第 t 年的碳排放效率, β_0 表示常数项, $\beta_s (s=1, \dots, 6)$ 表示影响因素的回归系数, ε_{at} 表示第 a 个港口第 t 年的随机误差项, Z_{ats} 表示第 a 个港口第 t 年第 s 个影响因素的观测值。

1.2 指标选取与处理

1.2.1 投入产出指标选取

本文通过对现有文献所选取的投入产出指标,及相关影响因素指标进行梳理,发现对港口投入指标和产出指标选取方向相对集中,几乎所有文献均将吞吐量作为产出指标;投入指标通常为泊位数、泊位长度、堆场面积、员工数量等。基于数据完整性、实用性及可获取性,参考戈艳艳等^[14]研究,本文选取码头长度,生产用码头泊位数为投入指标,货物吞吐量,集装箱吞吐量、二氧化碳排放量为产出指标,见表1。

其中港口碳排放计算主要依据国际公认的相关准则,本文利用交通运输部公布的港口企业每万吨单耗数据以及港口吞吐量进行计算,计算公式如下:

$$C = C_s \cdot H_c \cdot \eta \quad (8)$$

式(8)中: C 为港口二氧化碳排放量; C_s 为当年港口企业每万吨吞吐量的标准煤消耗量; H_c 为当年货物吞吐量; η 为碳排放系数,取2.4589(1t碳燃烧后产生大约3.67t的 CO_2 ,利用国家发展改革委能源研究所推荐的碳排放系数0.67进行计算,1t标准煤燃烧后产生2.4589t的 CO_2)。

1.2.2 影响因素指标选取

厘清影响碳排放效率的因素是环渤海港口群碳排放效率提升的重要前提。选取经济发展水平、对外开放水平、产业结构、科技创新、生态补偿、交通运输能力等六个方面相关指标对环渤海区域内港口群碳排放效率的影响因素进行研究,见表1。同时,为消除异方差的影响,本文对影响因素指标进行对数化处理。

1.3 数据来源

港口碳排放效率的测算数据来源于《中国港口年鉴》,《中国统计年鉴》,交通运输部官网,其中港口企业每万吨吞吐量消耗标准煤数据来源于交通运输部发布的《交通运输行业发展公报》。港口碳排放效率影响因素相关数据来源于《中国城市统计年鉴》,各地方统计局网站,各城市发展统计公报,部分缺失数据采用插值法补全。

2 港口静态效率分析

参考林秀群等计算方法,本文搜集了环渤海地区主要的14个港口在2007年~2022年的相关投入产出数据,利用Dearun软件对搜集到的数据进行非角度超效率SBM建模分析,得到14个港口的规模效率、纯技术效率、综合效率结果,并以三个区域

表 1 港口碳排放效率及影响因素的指标体系

Tab. 1 Indicator system of port carbon emission efficiency and influencing factors

类别	变量	变量释义	变量符号	单位
碳排放效率	投入指标	生产用码头长度	X_1	米
		生产用码头泊位数	X_2	个
		生产用万吨级泊位数	X_3	个
	期望产出指标	集装箱吞吐量	Y_1	万 TEU
		货物吞吐量	Y_2	万吨
	非期望产出指标	二氧化碳排放量	B_1	吨
影响因素	经济发展水平	GDP	Z_1	万元
	对外开放水平	实际利用外资	Z_2	万美元
	产业结构	第三产业占比	Z_3	%
	科技创新	科学技术投入	Z_4	万元
	生态补偿	节能环保投入	Z_5	万元
	交通运输能力	单位公路货运量	Z_6	万吨/千米

港口效率的算术平均值作为港口群的效率,见表 2。其中规模效率指在制度和管理水平一定的前提下,现有规模与最优规模之间的差异;纯技术效率是制

度和管理水平带来的效率,是企业由于管理和技术等影响因素的生产效率;综合效率是对决策单元(DMU)的资源配置能力、资源使用效率等多方面能

表 2 环渤海分区域港口碳排放效率

Tab. 2 Carbon emission efficiency of Ports in the Bohai Rim region

	辽宁地区			京津冀地区			山东地区		
	综合效率	纯技术效率	规模效率	综合效率	纯技术效率	规模效率	综合效率	纯技术效率	规模效率
2007	0.516	0.655	0.814	0.455	0.510	0.899	0.538	0.619	0.875
2008	0.524	0.652	0.828	0.494	0.544	0.916	0.557	0.635	0.882
2009	0.539	0.665	0.836	0.488	0.532	0.928	0.548	0.624	0.891
2010	0.542	0.658	0.849	0.494	0.532	0.935	0.542	0.604	0.902
2011	0.556	0.659	0.864	0.479	0.508	0.945	0.580	0.643	0.910
2012	0.558	0.655	0.870	0.477	0.505	0.948	0.572	0.624	0.917
2013	0.615	0.678	0.911	0.482	0.506	0.956	0.591	0.642	0.917
2014	0.625	0.680	0.919	0.464	0.483	0.961	0.625	0.697	0.903
2015	0.537	0.613	0.886	0.458	0.478	0.959	0.623	0.667	0.931
2016	0.544	0.619	0.887	0.477	0.500	0.956	0.627	0.675	0.931
2017	0.534	0.604	0.890	0.499	0.515	0.971	0.468	0.491	0.937
2018	0.540	0.612	0.888	0.513	0.537	0.952	0.513	0.531	0.949
2019	0.504	0.581	0.875	0.507	0.524	0.969	0.519	0.541	0.937
2020	0.499	0.578	0.874	0.539	0.584	0.912	0.537	0.557	0.941
2021	0.470	0.545	0.870	0.679	0.755	0.880	0.558	0.731	0.792
2022	0.463	0.823	0.614	0.762	0.799	0.933	0.662	0.855	0.799
均值	0.535	0.642	0.855	0.517	0.551	0.939	0.566	0.634	0.901

力的综合衡量与评价。

纯技术效率方面,2007年~2017年,辽宁与山东地区稳定在0.6~0.7之间,高于京津冀地区。但2014年~2017年,辽宁及山东地区出现小幅下降,而京津冀地区缓步上升。2017年~2019年,辽宁纯技术效率下降,京津冀及山东地区上升,2019年~2022年,环渤海三个地区的纯技术效率均有所提升,山东地区、京津冀地区及辽宁地区分别上升58.0%,52.4%,41.6%。这一提升主要归功于港口管理水平的持续优化与精进,如2019年辽港集团、山东省港口集团的成立以及环渤海地区的港口积极寻求外部合作,提高了港口管理水平,为环渤海地区纯技术效率的提升提供了强有力的支撑。

规模效率方面,2007年~2018年,环渤海三大地区均保持较高水平,基本在0.8~1之间,体现了较强的运营规模优势。2019年后,受新冠疫情防控等外部不利因素冲击,三大地区的规模效率均有所下滑,至2022年,辽宁地区规模效率均值下降至0.614;山东地区从2019年的0.937下降至2022年的0.799,其中威海港下滑最为严重,2022年仅为0.275;京津冀地区相对抗风险能力较强,虽然秦皇岛港从2019年的0.937下降至2022年的0.783,且该地区其他港口也有所下降,但在2022年港口规模效率迅速回升,显示出其强大的恢复力。

综合效率方面,环渤海区域内港口呈现出不同趋势,见图1。分地区看,京津冀地区港口碳排放综合效率稳定上升,其中黄骅港综合效率上升明显,从2007年的0.5上升至2022年的1.003。山东地区港口碳排放综合效率呈现波动上升趋势。辽宁地区港口碳排放综合效率整体呈现先上升后下降的趋势。2007年~2018年,辽宁及山东地区港口碳排放效率虽保持增长,但较为缓慢,并在2014年效率出现下滑。

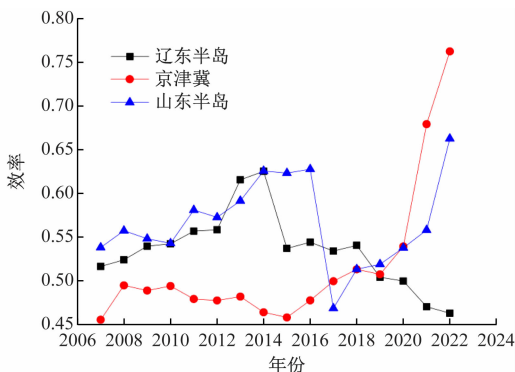


图1 环渤海子港口群碳排放效率变化

Fig. 1 Changes in carbon emission efficiency of Bohai Rim sub-port clusters

对环渤海整体的碳排放效率变化趋势进行分析,见图2。整体来看,环渤海区域内港口在2007年~2022年的港口碳排放综合效率在波动中上升,效率均值从0.503提升至0.629,整体碳排放效率水平提高了25%。具体而言,环渤海港口碳排放综合效率经历了三个阶段性的变化:2007年~2014年港口碳排放效率波动上升,2014年~2017年间,受到碳排放约束政策加强和低碳转型压力增大的影响,港口碳排放效率遭遇了短暂下滑,2017年~2022年,随着近年来我国对绿色港口建设的重视程度不断加强,并且港口一体化建设使得环渤海区域内港口基础设施重复建设、同质化竞争等问题有所改善,港口碳排放效率有所上升。

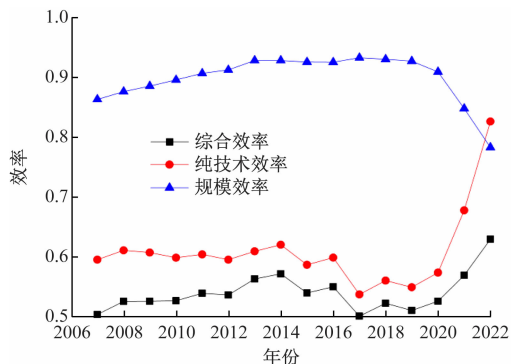


图2 环渤海港口整体碳排放效率变化

Fig. 2 Changes in overall carbon emission efficiency of Ports in the Bohai Rim region

为更加深入探讨环渤海区域港口碳排放效率的空间变化,基于2007年、2010年、2015年、2020年、2022年的港口碳排放效率,利用自然间断点分级法将环渤海港口划分低效率港口、较低效率港口、较高效率港口和高效港口四种类型,见图3。2007年~2022年,辽宁地区高效港口减少两个,较低效率港口增加两个;京津冀地区高效港口增加两个,较低效率港口减少三个;山东地区高效港口数量不变。总的来说,环渤海区域内港口碳排放效率由山东地区>辽宁地区>京津冀转变为京津冀>山东地区>辽宁地区,并且京津冀及山东港口碳排放效率与辽宁地区的差距在不断加大。

3 港口动态效率分析

静态效率关注经济体当前资源利用和最大化产出,而动态效率着眼长期资源优化和生产力提升,以及如何在不断变化的环境中适应和创新。采用超效率SBM进行碳排放效率测算时,利用2007年~2022年环渤海港口的投入产出数据,构建全局前沿面,虽然可以对碳排放效率进行简单的跨期评价,但

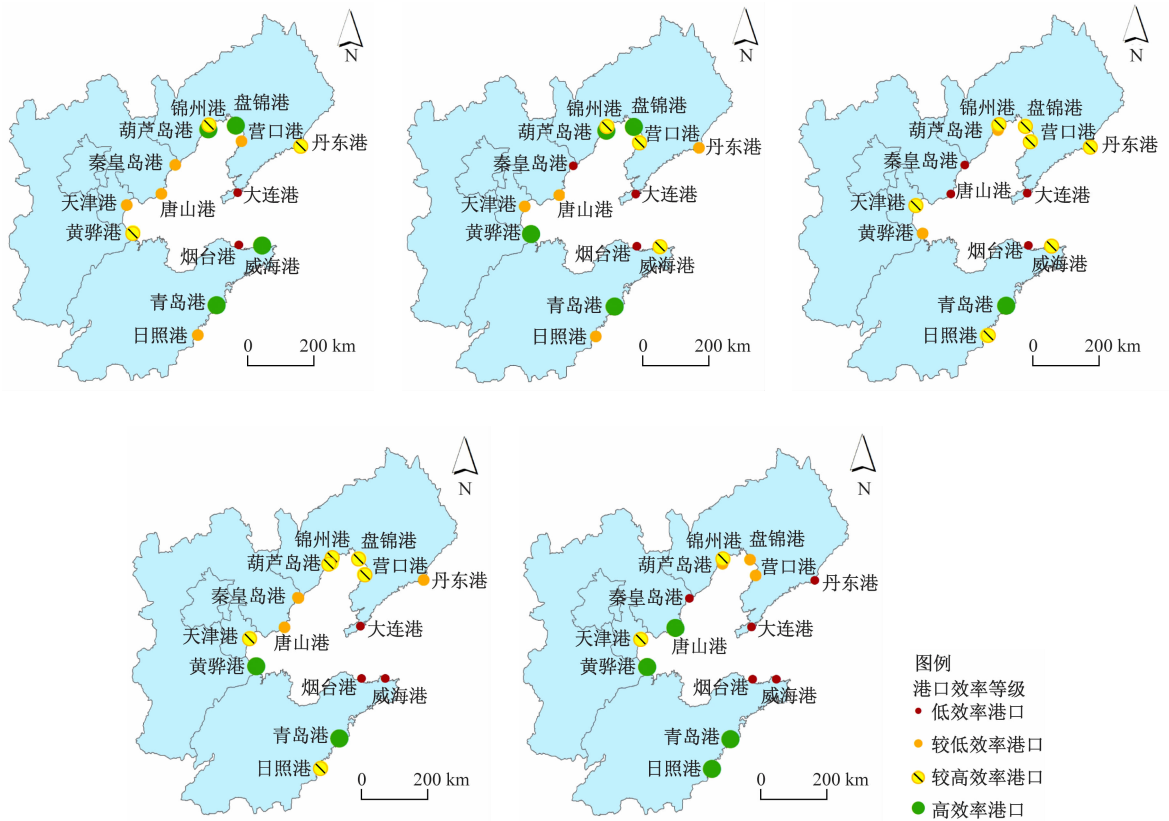


图3 环渤海区域港口碳排放效率的空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of carbon emission efficiency of Ports in the Bohai Rim region

是忽略了不同时期前沿面(技术进步)的变化对碳排放效率的影响。因此论文引入 Malmquist 指数模型,测算环渤海区域内港口群全要素碳排放效率指数,对港口动态效率进行分析。

根据环渤海区域内港口群全要素碳排放效率测算结果,见表3。2007年~2022年环渤海港口群全要素碳排放效率平均增长1.6%,技术进步增长5.1%,相比之下,技术效率有略微下降。2008年~2011年受到经济危机的影响,技术进步指数小于1,技术进步出现连年下降的情况。2019年~2022年,环渤海区域内港口群全要素碳排放效率增速加快,2021年~2022年港口全要素碳排放效率提升13.7%,这主要是由于20.2%技术进步的大幅增长,抵消了5.2%的技术效率的下降,技术效率的下降则主要是由于新冠疫情防控对港口运营规模的短期冲击,导致规模效率有所下降,同时代表管理运营水平的纯技术效率也有所下降。综合来看,自动化设备的引入与低碳技术的创新是环渤海地区港口生产率持续上升的主要原因。

分地区来看,见表4,辽宁地区在2007年~2014年间,全要素碳排放效率指数持续大于1,显示出港口全要素碳排放效率稳定上升趋势,但2014年~

2022年港口多个年份效率指数小于1,表明港口全要素碳排放效率连年下降,进一步分析发现,尽管辽宁地区的技术进步指数连年大于1,但仍未完全抵消由于规模效率下降对港口全要素碳排放效率的负面影响。京津冀地区在2007年~2022年间,港口全要素碳排放效率平均增长4.6%,其中技术效率贡献2.8%,技术进步贡献7.8%。整个研究期间,其效率指数基本上大于1,表明京津冀地区港口发展态势良好,技术进步是其主要驱动力。山东地区在2007年~2022年间,港口全要素碳排放效率平均增长1.4%,技术进步平均增长5.2%,但技术效率略微下降。特别是2019年~2022年,由于技术进步的大幅增长,以及管理水平的提高,成功抵消了其规模效率的下降,使得碳排放效率增速明显加快,可见山东地区港口全要素碳排放效率的增长受益于技术进步。

4 影响因素分析

本文进一步通过构建Tobit回归模型对环渤海地区港口碳排放效率的影响因素进行分析。

在进行面板Tobit回归分析之前,用方差膨胀因子(VIF)对各因素进行多重共线检验。通过检验,

表3 环渤海港口群全要素碳排放效率指数分解

Tab.3 Decomposition of total factor carbon emission efficiency index for ports clusters in the Bohai Rim region

	技术效率指数	技术进步指数	纯技术效率指数	规模效率指数	全要素碳排放效率指数
2007 ~ 2008	0.973	1.093	0.990	0.982	1.042
2008 ~ 2009	1.037	0.971	1.051	0.986	1.006
2009 ~ 2010	1.052	0.983	1.044	1.008	1.012
2010 ~ 2011	1.129	0.937	1.053	1.076	1.031
2011 ~ 2012	0.958	1.081	0.959	1.000	0.997
2012 ~ 2013	0.977	1.099	1.012	0.965	1.050
2013 ~ 2014	0.941	1.093	0.966	0.976	1.012
2014 ~ 2015	1.103	0.875	1.103	1.002	0.954
2015 ~ 2016	0.988	1.038	0.995	0.994	1.019
2016 ~ 2017	1.046	0.891	0.988	1.071	0.928
2017 ~ 2018	1.010	1.032	1.017	0.996	1.042
2018 ~ 2019	0.919	1.054	0.959	0.960	0.963
2019 ~ 2020	0.976	1.050	0.995	0.990	1.014
2020 ~ 2021	0.944	1.368	1.040	0.915	1.039
2021 ~ 2022	0.949	1.202	0.996	0.967	1.137
均值	1.000	1.051	1.011	0.993	1.016

表4 环渤海子港口群全要素碳排放效率指数分解

Tab.4 Decomposition of total factor carbon emission efficiency index for Bohai Rim sub-port clusters

	辽宁地区			京津冀地区			山东地区		
	技术效率指数	技术进步指数	全要素碳排放效率指数	技术效率指数	技术进步指数	全要素碳排放效率指数	技术效率指数	技术进步指数	全要素碳排放效率指数
2007 ~ 2008	1.012	1.009	1.021	0.869	1.296	1.079	1.019	1.016	1.036
2008 ~ 2009	1.044	0.991	1.033	1.037	0.952	0.987	1.025	0.962	0.985
2009 ~ 2010	1.007	1.004	1.011	1.170	0.921	1.019	1.000	1.012	1.009
2010 ~ 2011	1.085	0.962	1.041	1.191	0.890	0.982	1.133	0.948	1.065
2011 ~ 2012	0.952	1.058	1.006	0.889	1.241	0.992	1.037	0.957	0.988
2012 ~ 2013	1.022	1.080	1.092	0.877	1.207	1.007	1.012	1.021	1.030
2013 ~ 2014	0.984	1.028	1.011	0.818	1.220	0.964	0.999	1.063	1.061
2014 ~ 2015	1.143	0.794	0.898	1.112	0.898	0.988	1.034	0.973	1.004
2015 ~ 2016	0.956	1.067	1.015	1.073	0.969	1.035	0.952	1.062	1.008
2016 ~ 2017	1.065	0.923	0.982	1.181	0.899	1.051	0.882	0.837	0.724
2018 ~ 2019	0.909	1.024	0.931	0.905	1.102	0.983	0.946	1.049	0.990
2019 ~ 2020	0.918	1.073	0.987	1.071	1.006	1.048	0.966	1.058	1.021
2020 ~ 2021	0.676	1.424	0.940	1.383	1.007	1.189	0.906	1.645	1.038
2021 ~ 2022	0.974	1.012	0.986	0.851	1.539	1.343	1.007	1.150	1.158
均值	0.981	1.032	0.998	1.028	1.079	1.046	0.999	1.052	1.014

均值为4.31,且各指标不存在多重共线问题,说明回归结果有效。通过Stata18.0软件检验环渤海地

区港口是否存在个体效应来判断使用固定效应还是随机效应估计。根据LR和Wald检验结果(见表

5),环渤海地区港口均存在个体效应,因此选取随机效应面板 Tobit 回归模型更合适。

由表 5 可知,科技创新(Z_4)、生态补偿(Z_5)对环渤海区域内港口碳排放效率产生了正向影响,且作用强度表现为科技创新(Z_4) > 生态补偿(Z_5)。负向影响因素为对外开放水平(Z_2)、产业结构(Z_3)、交通运输能力(Z_6),且作用强度表现为对外开放水平(Z_2) > 交通运输能力(Z_6) > 产业结构(Z_3)。可见,科技创新、生态补偿是港口碳排放效率提升的主要因素,而对外开放水平、交通运输能力、产业结构则是影响港口碳排放效率负面因素。

表 5 Tobit 模型回归结果

Tab. 5 Tobit model regression results

解释变量	环渤海地区	
$\ln Z_1$	-0.011	(-0.591)
$\ln Z_2$	-0.011 **	(-2.180)
$\ln Z_3$	-0.114 ***	(-2.674)
$\ln Z_4$	0.038 ***	(3.627)
$\ln Z_5$	0.015	(1.859)
$\ln Z_6$	-0.033 **	(3.627)
_cons	0.799 ***	(3.727)
Wald 检验	30.78 ***	
LR 检验	161.91 ***	
样本量	222	

注:括号内为 Z 统计量;***、**、* 分别表示在 1%、5% 和 10% 显著水平下显著。

科技创新的回归系数为正,且显著性水平达 1%,表明科技投入是港口绿色技术发展的关键。通过技术革新,如节能降耗技术的研发和绿色能源系统构建,港口实现了显著节能增效,提升碳排放效率,并促进了政策精准实施和行业协作,共同推进低碳港口建设。

生态补偿的回归系数为正,且通过了 10% 的显著性水平。表明生态补偿在推动港口绿色转型方面同样发挥了积极作用。港口企业通过增加节能环保投入,引入和研发更高效、更节能的技术和设备,显著优化了重型机械设备的能效,降低了整体能耗。

对外开放水平的回归系数为负,通过了 5% 的显著性水平。这在一定程度上验证了“污染天堂”假说在环渤海地区的适用性。外商投资的引入并未充分展现正向的技术溢出效应,反而可能促进了高碳产业链的转移,导致碳排放效率下降。

交通运输能力的回归系数为负,且通过了 5% 的显著性水平。尽管交通基础设施的完善与布局优

化是提升交通运输能力的关键,但若运输体系中高碳排放强度的运输方式占比较大,且未能有效优化运输流程、减少等待与中转时间,则交通运输能力的提升反而可能加剧碳排放,降低港口碳排放效率。

产业结构的回归系数为负,且通过了 1% 的显著性水平。部分地区在经济发展过程中未能及时调整产业结构,导致高碳排放产业持续占据主导地位,对碳排放效率产生了负面影响。

经济发展对港口碳排放效率影响并不显著,这可能与环渤海部分地区有限的环境容量及承载压力有关。随着 GDP 增长与人口增加,环境压力增大,加之部分地区产业结构尚未优化,高碳排放产业比重较大,在这些因素共同作用下,可能抵消经济增长对碳排放效率的潜在正面影响。

5 结论及建议

5.1 结论

本文选取环渤海区域内的 14 个港口 2007 年 ~ 2022 年的相关数据,运用超效率 SBM 模型揭示环渤海区域内港口群碳排放效率的总体特征,利用 Malmquist 指数分析效率动态变化趋势,最后利用 Tobit 回归模型对环渤海区域内港口群碳排放效率的影响因素进行重要性分析,主要结论如下:

1) 环渤海区域内港口群碳排放效率整体呈现上升趋势,环渤海区域内港口群碳排放效率由山东地区 > 辽宁地区 > 京津冀转变为京津冀 > 山东地区 > 辽宁地区,并且京津冀及山东港口碳排放效率与辽宁地区的差距在不断加大。

2) 环渤海三个地区自动化设备的引入,信息技术的应用所带来的技术进步是环渤海地区效率不断上升的主要原因,但辽宁地区近期规模效率不断下降,技术的进步并没有提高辽宁地区的碳排放效率。

3) 科技创新、生态补偿是港口碳排放效率提升的主要因素,对外开放水平、交通运输能力、产业结构对港口碳排放效率具有负向驱动作用,而经济发展与港口碳排放效率的发展缺乏关联性。

5.2 建议

依据上述结论,结合目前各个港口的现状和发展特征,提出如下发展建议:

1) 加强环渤海港口群合作,实现协同发展。针对港口间竞争导致的资源冗余与效率问题,各港口需深化合作,明确核心功能与差异化定位,整合区域资源,加速构建互联互通网络,提升资金、人才、技术等要素流通与共享效率,共同推动港口群向更高层次协同一体化发展。

2) 优化对外开放结构,提升外资引入质量。充分发挥港口作为对外开放前沿阵地及“一带一路”倡议核心节点的关键作用。在引进外资的同时,也应注重筛选低碳、环保项目,坚决遏制高碳产业的无序扩张,避免国际碳排放向国内转移。

3) 推动港口科技创新,从源头深度削减港口碳排放。实施科技创新驱动发展战略,鼓励港口企业加大科技研发投入,特别是在清洁能源技术、智能化管理系统、节能减排设备等方面的研发与应用;扩大岸电、太阳能、潮汐能在港口能源消耗中的比例。

4) 优化产业布局,降低碳排放港口产业链比例。提高低碳清洁产业的比重,积极发展低碳产业,支持战略性新兴产业发展,推动产业升级。明确低碳清洁产业的发展方向和重点领域,规划清晰的低碳发展目标,包括碳排放强度的降低比例、清洁能源使用比例的提升等,为产业布局调整提供明确导向。

参 考 文 献

- [1] MARTINEZ-BUDRIA E, DIAZ-ARMAS R, NAVARRO-IBANEZ M, et al. A study of the efficiency of Spanish port authorities using data envelopment analysis [J]. *International Journal of Transport Economics/Rivista internazionale di economiadei trasporti*, 1999: 237-253.
- [2] DONG G, ZHU J, LI J, et al. Evaluating the environmental performance and operational efficiency of container ports: an application to the maritime silk road [J]. *International journal of environmental research and public health*, 2019, 16(12): 2226.
- [3] MUSTAFA F S, KHAN R U, MUSTAFA T. Technical efficiency comparison of container ports in Asian and Middle East region using DEA [J]. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 2021, 37(1): 12-19.
- [4] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. *European journal of operational research*, 2001, 130(3): 498-509.
- [5] 林秀群, 李嘉新, 李阳, 等. 长江经济带物流业碳排放效率的测度及时空演化特征研究 [J]. *生态经济*, 2022, 38(12): 31-38.
LIN X Q, LI J X, LI Y, et al. Measurement and temporal and spatial evolution of carbon emission efficiency of logistics industry in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(12): 31-38. (in Chinese)
- [6] 贾鹏, 鲁琳, 马奇飞, 等. 基于超效率 SBM-Malmquist 模型的中国港口绿色发展效率研究 [J]. *上海海事大学学报*, 2022, 43(1): 45-53.
JIA P, LU L, MA Q F, et al. Study on development efficiency of Chinese green ports based on super efficiency SBM-Malmquist model [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2022 (1): 45-53. (in Chinese)
- [7] 邵言波, 邵羽冰. “一带一路”中国沿线主要港口碳排放效率评价研究 [J]. *经济问题*, 2023(5): 22-30.
SHAO Y B, SHAO Y B. Evaluation of carbon emission efficiency of major ports along “the Belt and Road” in China [J]. *Economic Problems*, 2023 (5): 22-30. (in Chinese)
- [8] 郑琰, 巴文婷, 肖玉杰. 考虑碳排放的长三角港口群动态效率测度 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(4): 34-46.
ZHENG Y, BA W T, XIAO Y J. Dynamic efficiency measure in Yangtze River delta port cluster considering carbon emissions [J]. 2023, 23(4): 34-46. (in Chinese)
- [9] 韩增林, 王成金. 港口物流特点与影响因素分析 [J]. *中国港口*, 2001(8): 38-40.
HAN Z L, WANG C J. Analysis of characteristics and influencing factors of port logistics [J]. *China Ports*, 2001 (8): 38-40. (in Chinese)
- [10] CULLINANE K, SONG D W. A stochastic frontier model of the productive efficiency of Korean container terminals [J]. *Applied economics*, 2003, 35 (3): 251-267.
- [11] PÉREZ I, GONZÁLEZ M M, TRUJILLO L. Do specialisation and port size affect port efficiency? Evidence from cargo handling service in Spanish ports [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 138: 234-249.
- [12] 罗俊浩, 崔娥英, 季建华. 基于 DEA-TOBIT 两阶段法的集装箱港口效率及效率影响因素研究 [J]. *科技管理研究*, 2013, 33(5): 236-239.
LUO J H, CUI E Y, JI J H. Analysis on container ports efficiency and its influencing factors on two stage method of DEA-TOBIT [J]. *Science and Technology Management Research*, 2013, 33 (5): 236-239. (in Chinese)
- [13] 周玉涛, 李振福, 邓昭. 环渤海地区港口效率的时空分异、未来趋势及驱动因素研究 [J]. *世界地理研究*, 2024, 33(4): 142-154.
ZHOU Y T, LI Z F, DNEG Z. The spatio-temporal differentiation, future trends and driving factors of port efficiency in the Bohai Rim region [J]. *World Regional Studies*, 2024, 33(4): 142-154. (in Chinese)
- [14] 戈艳艳, 王珊珊. 考虑碳排放的港口全要素生产率及影响因素分析 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(2): 22-29.
GE Y Y, WANG S S. Total factor productivity and influencing factors analysis for ports considering carbon emissions [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21 (2): 22-29. (in Chinese)