碳排放约束下海洋经济效率空间关联网络及影响因素研究

任仙玲，王怡倩

（中国海洋大学经济学院 青岛 266075）

摘要：随着“双碳”目标推进，海洋经济作为国民经济发展的重要支柱，亟须探索低碳转型与协同降碳路径。文章基于包含非期望产出的超效率 SBM-GML 模型测度碳排放约束下的海洋经济效率，引入修正引力模型和社会网络分析法（SNA），解析碳排放约束下的海洋经济效率的空间关联网络结构特征，并运用二次指派程序（QAP）实证分析网络形成的驱动因素。研究发现：（1）海洋经济效率整体呈现“波动上升—调整—稳定”的波动趋势，区域分化显著，江苏和浙江等省份效率持续领先，河北和广西等地区陷入“低效率锁定”；（2）空间关联网络密度从 0.209 上升至 0.291，等级度下降 67.3%，网络结构从“核心—边缘”向“多中心网状”转型，江苏和浙江等核心节点在空间关联网络中占据主导地位，辽宁和山东等北方省份逐步向次级枢纽跃升；（3）板块功能分化显著，长三角地区为“净受益板块”，环渤海地区为“双向溢出板块”，各板块内部关联紧密，跨板块协同较弱；（4）空间关联网络的形成主要受地理邻近性、环境规制差异和科研实力差异影响。研究为优化海洋经济低碳协同发展路径提供了依据，对实现区域均衡发展与“双碳”目标深度融合具有政策启示作用。

关键词：海洋经济；海洋低碳；空间关联；社会网络分析

中图分类号：F124.5；X196；P74 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-9857（2025）12-0122-14

Research on the Spatial Correlation Network and Influencing Factors of Marine Economic Efficiency Under Carbon Emission Constraints

REN Xianling，WANG Yiqian

（School of Economics，Ocean University of China，Qingdao 266075，China）

Abstract：With the advancement of the “dual carbon” goals，the marine economy，as a vital pillar of national economic development，urgently requires exploration of low-carbon transition and collaborative carbon reduction pathways. This study employs a super-efficiency SBM-GML model incorporating undesirable outputs to measure marine economic efficiency under carbon emission constraints. It introduces a modified gravity model and social network analysis（SNA）to analyze the structural characteristics of the spatial correlation network of marine economic efficiency under these constraints. Additionally，quadratic assignment procedure（QAP）is used to empirically examine the driving factors of the network. The findings reveal

收稿日期：2025-09-02；**修订日期：**2025-12-23

作者简介：任仙玲，副教授，博士，研究方向为海洋经济、金融计量学

通信作者：王怡倩，硕士研究生，研究方向为海洋经济

that：（1）Marine economic efficiency overall exhibits a fluctuating trend of “rising fluctuation–adjustment–stabilization，” with significant regional divergence. Provinces like Jiangsu and Zhejiang maintain leading efficiency，while regions such as Hebei and Guangxi are trapped in a “low-efficiency lock-in.”（2）The density of the spatial correlation network increased from 0.209 to 0.291，while the network hierarchy decreased by 67.3%. The network structure transitioned from a “core-periphery” pattern to a “multi-center mesh” pattern. Core nodes like Jiangsu and Zhejiang dominate the network，while northern provinces such as Liaoning and Shandong gradually ascended to secondary hubs.（3）Functional differentiation among blocks is significant：the Yangtze River Delta region acts as a “net beneficiary block，” and the Bohai Rim region serves as a “bidirectional spillover block.” Internal connections within blocks are strong，but cross-block synergy remains weak.（4）The formation of the spatial correlation network is primarily influenced by geographical proximity，differences in environmental regulation intensity，and disparities in scientific research capability. This research provides a basis for optimizing low-carbon collaborative development pathways for the marine economy and offers policy insights for achieving balanced regional development and deep integration with the “dual carbon” goals.

Keywords：Marine economy，Marine low-carbon，Spatial correlation，Social network analysis

0　引言

海洋经济作为国民经济高质量发展的“蓝色引擎”，不仅承担着资源开发与生态保护的双重使命，还面临着碳排放约束下的低碳转型难题。党的二十大报告明确提出“加快建设海洋强国”与“积极稳妥推进碳达峰碳中和”的战略目标，如何在碳排放约束下实现海洋经济低碳转型与空间协同发展，成为当前亟待解决的关键问题。在此背景下，揭示碳排放约束下海洋经济效率的空间关联特征与网络传导机制，对推动跨区域低碳合作、实现“双碳”目标具有重要的现实意义。

针对海洋经济效率，现有研究已从多个维度探讨了海洋经济效率的测度、影响因素与时空分异特征。从测度方法来看，学者们通过多维度模型创新提升效率测度的准确性。例如，纪玉俊等[1]和 Zhou 等[2]分别基于 SBM 模型和 EBM 模型测度海洋全要素生产率；鄢波等[3]借助 Bootstrap-DEA 模型纠偏传统 DEA 的测度偏差；孙才志等[4]则依托超越对数生产函数的随机前沿模型分析了沿海各省的海洋经济增长动力。影响因素方面，研究覆盖产业结构、科技创新、环境规制等多元变量。王玲玲等[5]考察了海洋产业结构升级对海洋经济效率的提升作用；纪玉俊等[1]研究发现海洋产业集聚与海洋全要素生产率呈倒“U”形关系；纪建悦等[6]发现海洋科技创新对海洋全要素生产率的促进存在门槛效应；张慧敏等[7]验证环境规制通过技术创新中介影响海洋绿色全要素生产率；Sun[8]研究发现沿海地区数字金融和科技创新对海洋绿色经济效率具有促进作用。时空分异特征研究揭示了海洋经济效率演化的显著区域不均衡性。赵昕等[9]发现海洋经济效率呈现“东部—北部—南部”递减格局和阶段性波动特征；鄢波等[3]基于重心迁移轨迹分析考察了海洋经济效率的空间发展路径，发现海洋经济效率重心先向北后向南发生偏移。

在“双碳”目标加速推进的背景下，海洋经济低碳转型与效率提升成为实现可持续发展的核心议题。学者们将碳排放纳入海洋经济发展评价体系，兼顾海洋经济产出与碳减排双重目标，为揭示沿海地区绿色发展路径提供了新视角。从测度方法来看，学者们大多采用包含非期望产出的 SBM 模型来测度碳排放约束下的海洋经济效率[10-11]。在影响因素方面，碳排放约束下海洋经济效率的提升受到多重因素的复杂作用。许冬兰等[12]发现经济发展水平、海洋产业结构升级和科技投入对海洋经济低碳转型具有显著正向驱动作用，而环境规制强度、对外开放水平及港口活跃度因政策滞后或高碳运输模式呈现负向影响；狄乾斌等[10]运用 Tobit 模型

进一步表明，产业结构高度化与科研人力资本是关键正向影响因子，陆域经济由于高碳属性起到抑制作用。时空分异特征方面，丁仕伟等[11]研究显示，碳约束下海洋经济效率空间维度呈现“南高北低”的梯度差异，时间维度呈现“先缓后快”的演变趋势。针对细分领域，董梦如等[13]对海洋交通运输业的研究则发现，区域效率差异呈现“M”形波动，政策干预与能源结构调整对缩小差距具有阶段性效果。曹俐等[14]对海洋渔业研究发现，环渤海和珠三角地区的渔业全要素生产率分别朝着各自均衡的水平收敛，区域间差距随时间变化逐渐缩小，长三角地区渔业全要素生产率总体朝着同一方向趋近。

事实上，海洋经济活动具有显著的空间溢出效应，港口贸易和海洋运输等产业的碳排放具有跨区域扩散特征[10]。而现有研究多以静态视角分析海洋经济效率，未将各地区之间的相互作用纳入考量，对时空分异特征的分析受到传统地理空间的限制，忽视了港口网络、航运路线等形成的空间关联拓扑结构[15-16]，未能充分揭示海洋经济效率的复杂关联性。社会网络分析（SNA）作为揭示复杂系统交互关系的有效工具[17-18]，可探索碳排放约束下海洋经济效率的空间关联关系。海洋经济领域的学者们采用社会网络分析方法，关注并探讨了海洋经济韧性[19]、海洋科技创新效率[20]、海洋绿色发展水平[21]以及海洋高质量发展[22]的空间网络结构，但碳排放约束下海洋经济效率的空间关联研究依然缺乏。鉴于此，本研究首先将海洋经济碳排放纳入海洋经济效率测算框架，利用超效率 SBM-GML 模型量化评估碳排放约束下海洋经济效率的发展水平；其次，采用修正的引力模型构建碳排放约束下海洋经济效率的空间关联矩阵，运用社会网络分析方法从空间关联角度分析海洋经济效率的时空演变过程以及各区域在海洋经济效率空间关联网络中的作用；最后，采用 QAP 回归法对影响海洋经济效率空间关联网络形成的因素进行实证分析。

1 指标构建、研究方法与数据来源

1.1 碳排放约束下海洋经济效率的指标构建

超效率 SBM 模型是一种非径向、非角度且基于松弛变量的效率测度模型。该模型不仅能够考量决策单元的松弛变量问题，还能有效解决相同决策单元效率的区分问题。在此基础上，可进一步构建 Global Malmquist-Luenberger（GML）指数，用于测算效率的动态变化，进而得到碳排放约束下海洋经济效率的变化率指标，即 GML 指数。假设以 2006 年为基期，将该年的海洋经济效率设定为 1，则 2007 年的海洋经济效率为 1 × 2007 年的 GML 指数值[23]，以此类推，便可测算得到 2007—2022 年中国沿海 11 个省（自治区、直辖市）（不包括港澳台地区）在碳排放约束下的海洋经济效率值。

投入要素包括：（1）人力资本投入为涉海就业人员数量（万人），反映海洋产业劳动力规模；（2）资本投入为海洋经济固定资本存量（亿元），采用永续盘存法计算省级资本存量后，通过海洋生产总值占比折算[24]；（3）能源投入为海洋能源消费量（万 t 标准煤），通过地区能源消费总量乘以海洋生产总值占地区生产总值的比重进行估算；（4）资源投入选取海水养殖面积（hm^2）、旅行社数量（个）和港口货物吞吐量（万 t），分别代表海洋渔业、滨海旅游业和海洋交通运输业的资源消耗。

产出要素包括：（1）期望产出为海洋生产总值（GOP，亿元），以 2006 年为基期进行平减；（2）非期望产出为海洋经济二氧化碳排放量（万 t），以地区二氧化碳排放总量乘以海洋生产总值占地区生产总值比重计算[1]。

投入产出测算指标详见表 1。缺失数据通过线性插值法或均值填充，确保数据连续性。

表 1 碳排放约束下海洋经济效率投入产出测算指标

Table 1 Input-output measurement indicators for marine economic efficiency under carbon emission constraints

指标类别	一级指标	二级指标
投入要素	人力资本投入	涉海就业人员 / 万人
	资本投入	海洋经济固定资本存量 / 亿元
	能源投入	海洋经济能源消费量 / 万 t（按标准煤）
	资源投入	海水养殖面积 /hm^2
		旅行社数量 / 个
		港口货物吞吐量 / 万 t
期望产出	经济效益	海洋生产总值 / 亿元
非期望产出	碳排放	海洋经济二氧化碳排放量 / 万 t

1.2　研究方法

1.2.1　修正的引力模型

为探究碳排放约束下海洋经济效率的空间关联强度，借鉴惠利伟[25]的研究方法构建修正的引力模型，具体模型设定如式（1）所示。

$$F_{ij}=k_{ij}\frac{\sqrt[3]{G_iP_iM_i}\sqrt[3]{G_jP_jM_j}}{D_{ij}^2},k_{ij}=\frac{M_i}{M_i+M_j}\qquad(1)$$

式中：F_{ij} 为地区 i 与地区 j 之间的海洋经济效率的关联强度；G 表示海洋生产总值；P 表示涉海就业人员；M 表示海洋经济效率；D_{ij} 为地区 i 与地区 j 省会城市之间基于经纬度计算的球面地理距离；k_{ij} 为引力系数，反映地区 i 对地区 i 与地区 j 海洋经济效率空间关联强度的贡献率。由此得到碳排放约束下海洋经济效率的空间关联关系矩阵，以矩阵的各行平均值作为阈值进行二值化处理，若引力值大于阈值，则记为 1，说明两个地区之间存在关联关系；若引力值小于阈值，则记为 0，说明两个地区之间不存在关联关系。最终得到碳排放约束下海洋经济效率的空间二值矩阵。

1.2.2　社会网络分析方法

运用社会网络分析揭示碳排放约束下海洋经济效率的空间关联结构。社会网络分析方法主要用于分析关系数据，其目标是通过考察社会网络中关系的内容和模式来理解节点之间的联系以及这些联系的意义。该方法可解析网络结构特征，具体包括：（1）整体网络特征分析，计算网络密度、等级度与效率以评价整体结构；（2）个体网络特征分析，通过度数中心度（点出度、点入度）和中介中心度识别核心节点与枢纽功能；（3）块模型分析，采用 CONCOR 算法划分板块，结合密度矩阵与像矩阵揭示板块间溢出与受益关系，最终形成“整体—个体—板块”的海洋经济效率空间关联多层次分析体系。

1.3　数据来源

以中国沿海 11 个地区为研究对象，包括辽宁、河北、天津、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、广西和海南，样本时期选择 2007—2022 年，以反映我国海洋经济从高速扩张向低碳转型的关键时期特征。实证部分所涉及的数据来源于《中国海洋经济统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》、中国碳核算数据库（CEADs）以及各沿海地区的区域统计年鉴，部分缺失数据根据历史数据综合处理得出。

2　碳排放约束下海洋经济效率的空间关联网络结构

2.1　碳排放约束下海洋经济效率的时空演变特征

全国沿海地区海洋经济效率整体呈现“波动上升—调整—稳定”的阶段性特征（图 1）。效率均值从 2007 年的 0.968 下降至 2022 年的 0.922，降幅约 4.8%，这可能是由于海洋化工、船舶制造等传统高耗能产业的需求萎缩。具体来看，2007—2011 年

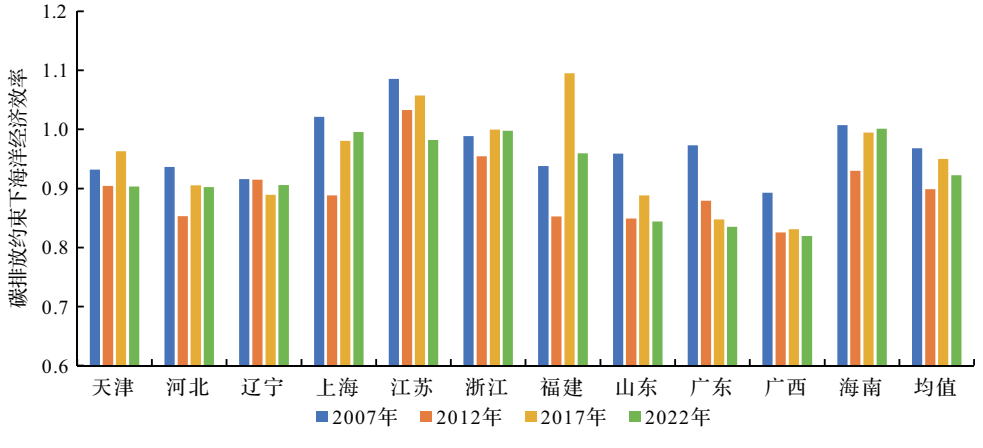

图 1　碳排放约束下海洋经济效率发展水平演进

Fig.1　Evolution of the development level of marine economic efficiency under carbon emission constraints

效率呈上升趋势。值得注意的是，2011 年效率值达到峰值 0.948，可能与“十二五”期间国家加大海洋科技投入与清洁能源政策落地相关。但 2012 年骤降至 0.899，反映出海洋传统高耗能产业产能过剩的负面影响。海洋经济效率在 2016 年后进入集体加速期。而 2020 年效率显著下降至 0.923，反映了新冠疫情对港口物流、海洋旅游等高碳依赖产业的冲击。2021—2022 年效率趋于稳定，虽未恢复至疫情前水平，但降幅收窄，海洋经济在环境规制强化与数字化转型中逐步形成韧性。

沿海地区海洋经济效率呈现显著的非均衡特征。江苏以均值 1.049 位居首位，虽在 2022 年有所回落，仍显著高于全国均值。上海和浙江紧随其后，但上海在 2016 年后增速明显放缓，反映出环境规制强化对传统港口经济具有约束效应。相比之下，广西与河北因产业结构刚性突出及科技转化能力不足，长期陷入“低效率锁定”状态。动态演化特征显示，部分地区效率提升具有显著政策响应性。福建在 2016 年后效率值大幅提升，主要受益于自贸区制度创新与海洋新兴产业扩张，凸显政策红利对要素配置的优化效应。山东在“蓝色经济区”战略实施期间效率提升明显，但因重化工业转型滞后，2017 年后出现回落。天津与辽宁虽整体效率波动较小，但长期低于沿海均值，反映出传统港口经济模式面临边际收益递减困境。效率差异的时空维度进一步揭示内在矛盾。2007—2022 年高—低效率地区差距持续扩大，标准差从 0.06 上升至 0.11，区域分化加剧。效率演化的阶段性差异显著，江苏和浙江在“十三五”期间年均增速达 1.2%，而河北和辽宁同期增速不足 0.5%。

图 2 展示了 2006—2022 年碳排放约束下中国海洋经济效率的 GML 指数及其分解结果。GML 指数综合反映了碳排放约束下海洋经济全要素生产率的动态变化，可分解为技术进步（TC）、纯技术效率（PTE）和规模效率（SE）三个维度，为效率波动提供结构性解释。从整体趋势来看，GML 指数呈现波动演进特征，与图 1 所示的海洋经济效率演变轨迹高度吻合。其中，2015—2017 年连续 3 年 GML 指数突破 1.020，显示阶段性效率提升。TC 作为碳排放约束下海洋经济效率提升的主要驱动力，在 12 个观测期超过基准值，出现显著技术突破。但效率结构失衡问题突出，PTE 与 SE 在超过半数年份呈反向波动，揭示出技术创新与产业规模扩张的协同困境。

分阶段观察：2017—2018 年 GML 指数骤降至 0.949，与海洋生态红线制度实施窗口期重合，凸显环境规制对经济效率的短期抑制作用。值得注意的是，在“双碳”目标实施后的 2020—2022 年，GML 指数稳定在 1.023 ～ 1.028，其中 2021—2022 年通过规模效率有效弥补了技术进步的回撤，表明规模效率已成为应对碳约束的新支撑。但研究期内纯技术效率均值仅为 0.994，持续低于生产前沿面，反映出现有技术转化体系存在系统性效率损失。

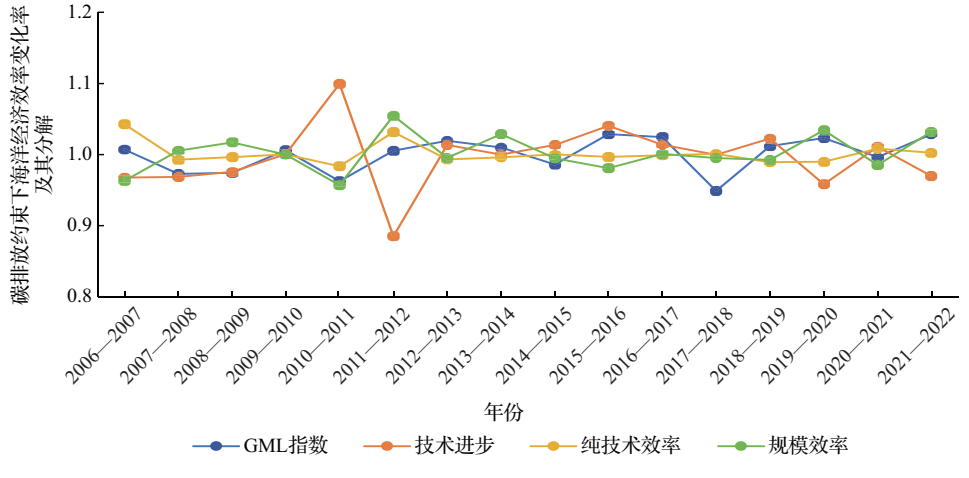

图 2 碳排放约束下海洋经济效率变化率及其分解结果

Fig.2 Change rate and decomposition results of marine economic efficiency under carbon emission constraints

2.2　整体网络结构特征

使用修正的引力模型构建海洋经济效率空间关联矩阵，分别选取 2007 年和 2022 年的截面数据，借助 ArcGIS 软件绘制相应年份的空间关联网络结构图。由图 3 可知，中国海洋经济效率逐渐形成了复杂的空间网络结构，发达的交通促使技术、劳动力和资金等要素在各地区之间的流动性增强，地区间的空间联系不再局限于邻近省份，打破了地理距离的限制，海洋经济效率在空间上存在普遍联系。

从网络密度、等级度、网络效率和网络关系数四个方面解读整体网络结构特征（图 4），并揭示碳排放约束下中国海洋经济效率的时空演化规律。

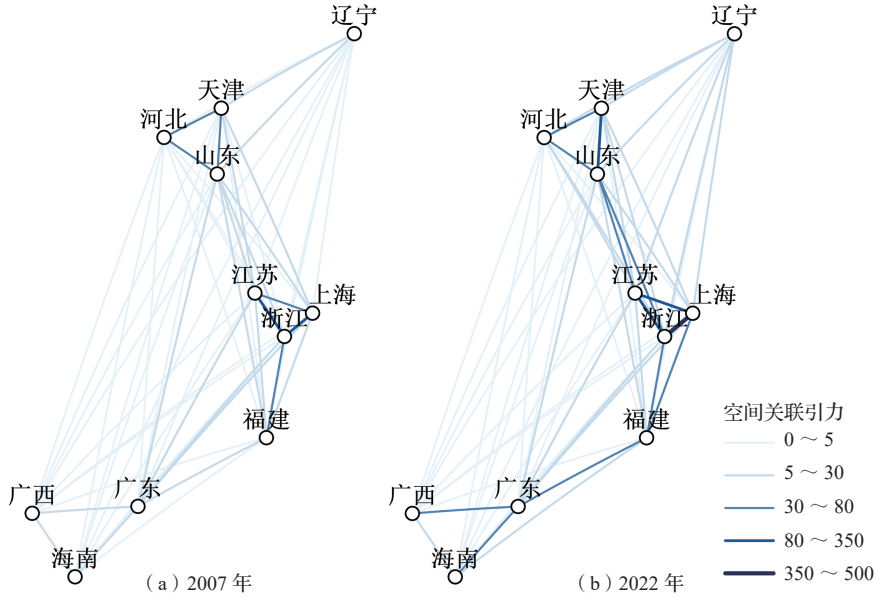

图 3　碳排放约束下海洋经济效率的空间关联网络

Fig.3　Spatial correlation network of marine economic efficiency under carbon emission constraints

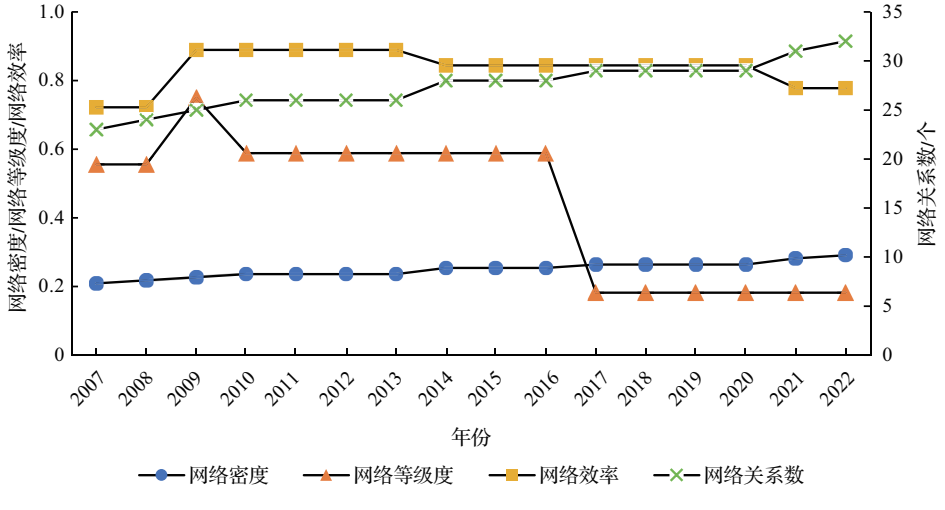

图 4　碳排放约束下海洋经济效率空间关联网络整体结构特征

Fig.4　Overall structural characteristics of the spatial correlation network for marine economic efficiency under carbon emission constraints

网络密度呈逐年稳步提高的趋势。2007—2022 年，网络密度从 0.209 1 逐步上升至 0.290 9，表明碳排放约束下海洋经济效率的空间关联强度逐年提升。随着“双碳”目标的推进，区域间通过技术合作、产业转移和资源共享，逐步打破地理边界限制，形成跨区域协调发展格局。然而，截至 2022 年，网络密度仍低于 0.3，说明关联紧密度尚有提升空间，需进一步强化各区域间的经验交流与资源整合。

网络等级度呈现先升后降的演变特征。2007—2016 年，网络等级度保持在 0.5 以上，高等级地区主导效率的提升，而低等级地区依赖外部资源输入。2017 年后，网络等级度骤降，保持在 0.181 8，说明网络层级性显著减弱，这一变化可能源于“十三五”期间区域协调发展战略的推进，次核心地区崛起，网络权力分布趋于分散，多中心协同格局初步形成。

网络效率从 2007 年的 0.722 2 波动上升至 2016 年的 0.844 4，2017 年后小幅下降但仍保持高位。网络效率值的高稳定特征表明网络结构逐渐成熟，冗余联系减少，关键节点的中介作用强化。网络效率的短暂下降可能由 2017 年后新兴关联关系快速增加引起，但整体仍处于合理区间，反映出网络具备较强的抗干扰能力和动态适应性。

网络关系数从 2007 年的 23 条增至 2022 年的 32 条，显示区域间互动路径逐步扩展，网络连通效果较好，区域间形成多层次互动机制。2017 年后，网络关系数增速放缓，但关联质量提升，核心地区对边缘地区的辐射带动作用增强，逐渐向“梯度协同”转变。

整体来看，碳排放约束下中国海洋经济效率的空间关联网络呈现“关联增强、层级弱化、稳定优化”的演进特征（图 4）。网络密度的提升与等级度的下降，反映出政策驱动下区域协同机制的深化；网络效率的稳定与网络关系数的增加，则凸显低碳转型中网络资源配置能力的改善。

2.3 个体网络结构特征

通过对比 2007 年和 2022 年个体网络结构特征相关指标（表 2）发现，中国沿海省份碳排放约束下海洋经济效率的个体网络结构呈现显著的空间分异与动态演化特征。研究期间，中国沿海地区海洋经济效率网络呈现核心节点强化与边缘节点崛起的双重特征。

点出度与点入度分别衡量区域在网络中的主动溢出能力与被动接收能力。从点出度来看，辽宁、福建和广东的点出度均大幅增加，对外溢出能力显著增强，成为网络中的主动溢出源。相比之下，天津和河北的点出度则长期停滞，对其他地区的溢出效应较弱。点入度方面，浙江和江苏的网络资源接收能力大幅增强，点入度均增加 3，但两地的净溢出值均下降，高接收能力并未转化为有效溢出。上海保持较高的点入度，显示其作为网络技术转化枢纽的稳定性。

度数中心度综合反映节点在网络中的连接强度与整体影响力。江苏和浙江的度数中心度显著提升，表明其网络资源溢出与接收的双向互动，成为全网的核心驱动力量。辽宁和山东的度数中心度均增加 2，显示其从网络边缘向次级枢纽跃升，辐射范围逐步扩大。然而，河北和广西的度数中心度长期处于低位。核心节点通过高连接强度主导资源流动，而边缘节点需通过政策干预提升参与度。

中介中心度衡量节点作为桥梁控制资源流动的能力。从中介中心度来看，浙江和福建的中介中心度增幅显著，浙江的中介中心度从 1.82 跃升至 7.14，福建的中介中心度从 1.89 上升至 5.56，成为全网资源调配的核心枢纽。天津和辽宁的枢纽功能跃升，环渤海地区逐步从边缘向次级枢纽转型。这种多层级枢纽体系的形成，不仅增强了网络的抗风险能力，还推动了资源配置从单极主导向多极协同转变。

区域角色随网络结构呈现出动态调整的特征。辽宁从过去依赖外部资源输入的边缘角色，转变为主动推动其他地区海洋经济效率提升的核心力量，但其辐射范围仍集中在邻近省份，跨区域协作机制有待加强。上海正在逐步转变为网络中的技术转化中心，重点引入船舶脱硫、海洋碳捕集等国际先进技术并进行本土化改进，但其网络资源输出能力尚未取得突破，限制了对全网的影响力。福建利用区位优势，从普通参与者升级为网络的核心枢纽。广东从网络中的受益角色转向主动溢出者，但其净溢出值仍显薄弱，需强化溢出能力。河北和广西等地区角色固化，成为区域协调发展的明显短板。

表 2　碳排放约束下海洋经济效率空间关联网络个体结构特征

Table 2　Individual structural characteristics of the spatial correlation network for marine economic efficiency under carbon emission constraints

地区	2007 年				2022 年			
	度数中心度			中介中心度	度数中心度			中介中心度
	点出度	点入度	中心度		点出度	点入度	中心度	
天津	2	3	3	1.250	2	3	3	4.167
河北	2	2	2	1.235	2	2	2	4.000
辽宁	2	0	2	1.235	4	0	4	5.556
上海	2	3	3	1.818	2	3	3	4.762
江苏	2	2	2	1.695	3	5	5	5.882
浙江	2	3	3	1.818	3	6	6	7.143
福建	3	1	3	1.887	4	2	4	5.556
山东	2	3	3	1.250	4	4	5	5.882
广东	2	3	3	1.852	4	3	4	5.556
广西	2	1	2	1.724	2	2	2	3.846
海南	2	2	2	1.724	2	2	2	3.846

2.4　空间块模分析

以 2022 年的海洋经济效率为例，使用 Ucinet 软件的 CONCOR 工具，将最大切割分度设置为 2，集中标准设置为 0.2。如表 3 所示，网络可划分为四大功能板块。板块一为上海、江苏和浙江，其实际内部关系占比较高，表明内部协作水平较高。接收关系数为 8，对外部资源输入的依赖性显著，内部资源无法满足其发展海洋经济效率的需求，属于净受益板块。板块二为天津、河北、山东和辽宁，属于双向溢出板块，其实际内部协作水平超过预期，且对外溢出关系数是接收数的 4 倍，但受限于重工业路径依赖，其内部吸收能力薄弱。板块三为广东、广西和海南，板块四为福建，板块三和板块四均属于经纪人板块，作为传递网络中的物质流和信息流的桥梁，承担低碳技术流动的中介功能，推动海洋碳汇经验跨板块流动。碳排放约束下海洋经济效率的空间关联网络结构大致遵循地理空间位置的邻近关系，板块内部成员之间海洋经济关联紧密，但各板块间联系有待加强。如表 4 所示，为揭示板块间协同机制与资源配置路径，进一步计算密度矩阵与像矩阵，将板块密度大于网络整体密度的赋值为 1，表明该板块有聚集趋势，得到各板块间的像矩阵。从密度矩阵来看，板块一（密度 1.000）、板块二（密度 0.667）与板块三（密度 1.000）内部关联度较高，表明其各节点间涉海生产要素流动与技术协同较活跃；板块一密度虽高，但结合像矩阵分析，其内部效率提升更多依赖外部资源输入，实际内生动力不足。从像矩阵来看，板块二和板块三均接收其他板块的溢出，反映出自身资源难以支撑海洋经济效率发展需求的问题，对外部技术、资本等涉海要素依存度较高。将关联关系可视化，绘制空间关联网络板块间关联关系图，如图 5 所示，关键协同路径尚未打通：板块一与板块二、板块三间无明显溢出关联，板块二与板块三、板块四间也无互动，反映出沿海地区间涉海生产要素的自由流动机制尚未成熟，尤其是高效率板

块与中低效率板块的联动存在壁垒。整体来看，各板块之间的协同发展路径还有待优化，技术、资本和劳动等涉海生产要素尚未在各地区之间完全自由流动。

表 3 2022 年碳排放约束下海洋经济效率空间关联网络板块功能划分

Table 3 Functional division of blocks in the spatial correlation network of marine economic efficiency under carbon emission constraints in 2022

板块	板块矩阵				地区	板块内关系数	板块外接受关系数	板块外溢出关系数	期望内部关系占比 /%	实际内部关系占比 /%	板块特征
	一	二	三	四							
一	6	1	0	1	上海、江苏、浙江	6	8	2	20	75.000	净受益
二	4	8	0	0	天津、河北、山东、辽宁	8	1	4	30	66.667	双向溢出
三	1	0	6	1	广东、广西、海南	6	1	2	20	75.000	经纪人
四	3	0	1	0	福建	0	2	4	0	0.000	经纪人

表 4 2022 年碳排放约束下海洋经济效率空间关联网络各板块密度矩阵与像矩阵

Table 4 Density matrix and image matrix of blocks in the spatial correlation network of marine economic efficiency under carbon emission constraints in 2022

板块	密度矩阵				板块	像矩阵			
	一	二	三	四		一	二	三	四
一	1.000	0.083	0.000	0.333	一	1	0	0	1
二	0.333	0.667	0.000	0.000	二	1	1	0	0
三	0.111	0.000	1.000	0.333	三	0	0	1	1
四	1.000	0.000	0.333	0.000	四	1	0	1	0

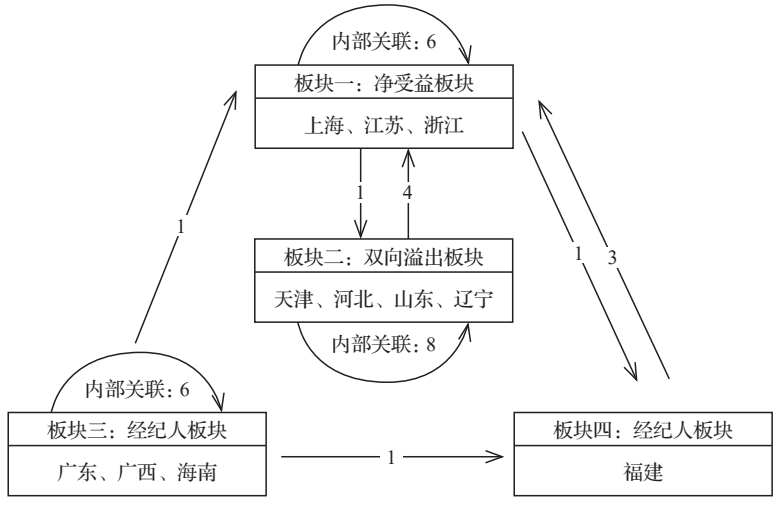

图 5 碳排放约束下海洋经济效率空间关联网络板块间关联关系

Fig.5 Inter-block correlation relationships in the spatial correlation network of marine economic efficiency under carbon emission constraints

结合图 5 分析，从板块互动来看：板块二在强化内部资源整合的同时，通过 4 条溢出路径向板块一输送海洋经济效率的发展动能，成为长三角地区效率提升的重要外部动能来源，但其与板块三和板块四无直接互动，导致北部与南部经济圈协同链条断裂；板块三通过内部协同维持内生动力，同时向板块一和板块四输出涉海生产要素，承担“区域联动的次级枢纽”功能；板块四作为独立“通道型枢纽”连接板块一和板块三。长三角地区作为“净受益板块”，通过单向接收板块二和板块四的网络资源溢出维持效率优势，未形成对外的发展动能反哺路径。板块间互动存在瓶颈，各板块内部关联紧密，但跨板块协同较弱，呈现“俱乐部”分割现象，反映出碳排放约束下的海洋经济效率网络存在动能传导断层，需强化跨板块要素流动与战略协同，破解“小团体”壁垒，提升整体联动效能。

3　碳排放约束下海洋经济效率空间关联网络的影响因素分析

3.1　模型构建与指标选取

采用二次指派程序（QAP）模型探究碳排放约束下海洋经济效率空间关联网络的驱动机制。QAP 方法适用于处理关系数据的非参数回归分析，能有效解决传统计量模型中空间关联矩阵的多重共线性与自相关问题，通过反复随机置换生成统计量的经验抽样分布，可进一步确保结果的稳健性。本研究参考薛诚等[21]和杨丽华等[26]的相关研究结果，结合碳约束下海洋经济效率的核心内涵，选取以下 5 项影响因素。（1）地理空间邻近性（GP）：用地理邻接矩阵表示。地理邻近性通过降低区域间运输成本和促进要素流动，为空间关联网络的形成奠定基础，是现有文献中被普遍验证的核心驱动因素。（2）海洋经济发展差异（MED）：用海洋生产总值占 GDP（国内生产总值）比重差异矩阵表征，反映区域海洋经济地位的非均衡性，可能驱动区域间形成协同或竞争关系。（3）海洋产业结构差异（MIS）：用海洋第二产业占比差异矩阵表示。第二产业占比差异可能反映区域间产业互补或同构程度，影响技术溢出与分工协作，从而影响效率协同。（4）环境规制水平差异（LER）：用省级政府工作报告中的环境相关词汇词频差异矩阵来表示[27]，政策强度差异驱动企业区位调整。（5）科研实力差异（TEC）：用海洋研发机构从业人员数量差异矩阵表征，创新资源不均影响技术溢出。综上所述，构建如下回归模型：

$$\boldsymbol{M} = F(\mathrm{GP}, \mathrm{MED}, \mathrm{MIS}, \mathrm{LER}, \mathrm{TEC}) \quad (2)$$

式中：$\boldsymbol{M}$ 代表对应年份的海洋经济效率空间关联矩阵，GP、MED、MIS、LER、TEC 为各影响因素标准化处理后的差异矩阵。

3.2　QAP 回归分析

借助 Ucinet 软件对 2007 年、2012 年、2017 年和 2022 年的海洋经济效率进行 QAP 回归，通过 2000 次随机置换得到回归结果，如表 5 所示。模型的调整决定系数 R^2 介于 0.429 至 0.633 之间，表明选取的影响因素变量能解释 42.9%～63.3%的空间关联网络变化，模型拟合效果较好。

表 5　2007—2022 年空间关联网络影响因素回归结果

Table 5　Regression results of influencing factors on the spatial correlation network from 2007 to 2022

变量	2007 年	2012 年	2017 年	2022 年
GP	0.521***	0.757***	0.811***	0.522***
	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
MED	0.064**	0.069**	−0.082	0.058
	(0.072)	(0.079)	(0.113)	(0.237)
MIS	−0.009	−0.047	0.005	0.000
	(0.462)	(0.261)	(0.481)	(0.506)
LER	−0.142**	−0.061	−0.154**	0.08
	(0.033)	(0.175)	(0.032)	(0.145)

续表 5

变量	2007 年	2012 年	2017 年	2022 年
TEC	−0.052	−0.058	−0.002	0.207**
	（0.219）	（0.178）	（0.598）	（0.004）
调整 R^2	0.429	0.633	0.573	0.559
重复迭代次数	2 000	2 000	2 000	2 000
观察值	110	110	110	110

注：*、**、*** 分别表示在 10%、5%、1%的水平上显著，括号内为 P 值。

（1）地理空间邻近性（GP）和环境规制水平差异（LER）是空间关联网络的核心驱动因素。地理空间邻近性系数始终显著为正，印证了空间溢出随距离而衰减的规律，这与薛诚等[21]发现的“效率扩散依赖地理媒介”结论较为一致。该系数在 2017 年达 0.811，表明此阶段地理邻近对效率关联的主导作用最强，这可能与京津冀、长三角地区一体化等区域协同政策推动要素流动有关，区域协同政策能够显著强化地理邻近的正面效应，通过基础设施互联互通和政策一体化大幅提升邻近省份间的要素流动与技术扩散效率。环境规制差异呈阶段性负向作用，其系数在 2007 年与 2017 年均显著为负，表明环境规制强度差异越大，越容易抑制区域间的空间关联。究其原因，当地区间环境监管力度不一时，高碳产业可能向标准宽松地区转移，从而割裂了区域间的绿色协同链条，对效率关联产生负面影响。到 2022 年，该系数转为正，但不显著，反映出在“双碳”目标的顶层设计下，各地区环保标准与执法力度逐步趋于统一，环境规制差异带来的负向效应已减弱。

（2）科研实力差异（TEC）的驱动作用在研究后期凸显，成为网络演进的新动能。科研实力差异系数在 2022 年由不显著转为在 5%水平上显著为正，这可能是由于随着“科技兴海”战略的深化，海洋科技资源的分布格局由集中向分散转变，早期海洋研发资源高度集中于少数沿海强省，技术溢出渠道不畅；近年来，区域性海洋科研合作平台密集搭建，有效打通了技术扩散的通道，使科研实力较强的地区能够更高效地向周边地区辐射其创新影响力，从而驱动空间关联网络的持续强化与拓展。

（3）海洋经济发展差异（MED）和海洋产业结构差异（MIS）对空间关联网络演进的影响相对微弱。海洋经济发展差异的影响不仅微弱，且具有不稳定性，反映出海洋经济发展差异并非制约效率协同的关键门槛。海洋产业结构差异系数始终接近 0，且未通过显著性检验，对空间关联的驱动作用影响微弱，可能是由于多数地区的海洋产业仍集中在传统的海洋渔业、交通运输、船舶制造等领域，产业同质化程度较高，尚未形成梯次分明、优势互补的区域分工格局，难以激发基于产业差异化的协同发展效应。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本研究基于非期望产出超效率 SBM-GML 模型测度 2007—2022 年中国沿海地区碳排放约束下的海洋经济效率，并运用修正引力模型和社会网络分析方法揭示其空间关联网络的结构特征与传导机制，主要结论如下。

（1）研究期间，全国海洋经济效率整体呈波动上升趋势，区域差异持续扩大。江苏和浙江等地区凭借技术创新与产业升级稳居效率前列，而河北和广西等地受传统高碳产业路径依赖的制约，长期处于低效状态。技术进步是效率提升的核心动力，但技术转化效率不足，与产业规模扩张的协同性较弱，导致阶段性效率波动。

（2）空间关联网络呈现“关联增强、层级弱化、稳定优化”趋势。网络密度提升 32.5%，等级度下降 67.3%，江苏和浙江等核心地区主导网络演化，辽宁和山东等北方省份逐步从边缘向次级枢纽转

型，推动网络结构从单极主导向多中心协同转变。

（3）空间关联网络结构大致遵循地理空间位置的邻近关系，板块内部成员之间海洋经济关联紧密，但各板块间联系有待加强。长三角和环渤海地区等板块内部协作较紧密，但跨板块协同密度不足0.3。长三角地区依赖外部资源输入却未反哺其他区域，环渤海地区受重工业拖累难以高效输出资源，福建等经纪人板块虽承担中介功能，但关键协同路径尚未打通，制约整体网络效能。

（4）地理空间邻近性是贯穿研究期的核心驱动因素，环境规制差异对空间关联的抑制作用随政策趋同而弱化。科研实力差异的作用在后期显著增强，海洋经济发展和海洋产业结构差异的影响始终微弱。

4.2　政策建议

根据以上研究结论，提出优化建议如下。

（1）建立定向技术帮扶机制，推动适用技术精准落地。支持江苏和浙江等高效地区向河北和广西等低效地区定向输出海上风电、船舶脱碳等绿色技术，并通过专项补贴、税收减免降低转移成本，对设备更新、技能培训给予补贴。重点推动长三角地区技术资源，支持北方重工业绿色改造。

（2）实施差异化枢纽培育计划，强化区域协同效能。在强化江浙核心地位的同时，重点扶持辽宁和山东等崛起中的次级枢纽。设立区域协调发展基金，重点支持核心区与次级枢纽共建产业园区和合作项目，通过项目合作带动人才、技术等要素的跨区域流动。

（3）构建跨区域补偿机制，激发中介板块活力。推动长三角“受益区”建立对环渤海“溢出区”和福建“桥梁区”的反哺机制，建立覆盖沿海地区的海洋碳汇交易平台，完善生态产品价值实现机制。支持福建等中介板块搭建技术转移与产业合作平台，建立跨区域合作奖励机制，对成功促成重大合作项目的地区给予政策倾斜和资金支持。国家层面统筹跨板块重点项目，破除行政分割，促进要素自由流动。

（4）推动邻近区域“三统一”，实现环保与创新一体化。首先，统一标准与执法，由生态环境部牵头，在京津冀、长三角等地区率先统一海洋环境准入与碳核算标准，并建立联合执法机制，杜绝监管套利。其次，共建关键基础设施，鼓励邻近地区共建共享船舶岸电系统、海洋环境监测网等硬件设施，避免重复建设。最后，组建实体化创新联盟，由各地区龙头企业与科研机构牵头，针对关键低碳技术成立联合实验室，强制要求共享大型科研设备与数据。

参考文献（References）：

[1] 纪玉俊，唐庆超．海洋产业集聚对我国沿海地区绿色全要素生产率的影响研究[J]．中国海洋大学学报（社会科学版），2022(6)：21-33.
JI Yujun，TANG Qingchao．The impact of marine industrial agglomeration on green total factor productivity in China’s coastal areas[J]．Journal of Ocean University of China(Social Science)，2022(6)：21-33.

[2] ZHOU Y，LI G，ZHOU S R，et al．Spatio-temporal differences and convergence analysis of green development efficiency of marine economy in China[J]．Ocean & Coastal Management，2023，238(5)：106560.

[3] 鄢波，李晓桐，杜军．基于Bootstrap-DEA模型的中国海洋经济效率空间演化及影响因素分析[J]．海洋通报，2024，43(5)：652-661.
YAN Bo，LI Xiaotong，DU Jun．Spatial evolution of marine economic efficiency and its influential factors in China based on Bootstrap-DEA model[J]．Marine Science Bulletin，2024，43(5)：652-661.

[4] 孙才志，梁宗红，翟小清．全要素生产率视域下中国海洋经济增长动力机制研究[J]．地理科学进展，2023，42(6)：1025-1038.
SUN Caizhi，LIANG Zonghong，ZHAI Xiaoqing．Dynamic mechanism of China’s marine economic growth from the perspective of total factor productivity[J]．Progress in Geography，2023，42(6)：1025-1038.

[5] 王玲玲，苏萌，田相辉．海洋经济绿色全要素生产率与其影响因素的动态响应[J]．海洋湖沼通报，2022，44(4)：106-114.
WANG Lingling，SU Meng，TIAN Xianghui．Dynamic response of marine green total factor productivity to influencing factors[J]．Transactions of Oceanology and Limnology，2022，44(4)：106-114.

[6] 纪建悦，唐若梅，孙筱蔚．海洋科技创新、海洋产业结构升级与海洋全要素生产率：基于中国沿海 11 省份门槛效应的实证研究[J]．科技管理研究，2021，41(16)：73-80．
JI Jianyue，TANG Ruomei，SUN Xiaowei．Marine scientific and technological innovation，marine industrial structure upgrade and marine total factor productivity：empirical research based on threshold effect of 11 coastal provinces in China[J]．Science and Technology Management Research，2021，41(16)：73-80．

[7] 张慧敏，李京梅．环境规制对海洋经济绿色全要素生产率的影响[J]．海洋开发与管理，2023，40(1)：104-112．
ZHANG Huimin，LI Jingmei．Influence of environmental regulation on green total factor productivity of marine economy[J]．Ocean Development and Management，2023，40(1)：104-112．

[8] SUN C H．Digital finance，technology innovation，and marine ecological efficiency[J]．Journal of Coastal Research，2020，108(SI)：109-112．

[9] 赵昕，贾在珣，丁黎黎．多维视角下中国海洋经济绿色全要素生产率的空间异质性[J]．资源科学，2023，45(3)：609-622．
ZHAO Xin，JIA Zaixun，DING Lili．Spatial heterogeneity of green total factor productivity of China’s marine economy from a multidimensional perspective[J]．Resources Science，2023，45(3)：609-622．

[10] 狄乾斌，梁倩颖．碳排放约束下的中国海洋经济效率时空差异及影响因素分析[J]．海洋通报，2018，37(3)：272-279．
DI Qianbin，LIANG Qianying．The spatio-temporal differences of marine economic efficiency in China and analysis of influencing factors under carbon emission constraints[J]．Marine Science Bulletin，2018，37(3)：272-279．

[11] 丁仕伟，董洋．碳排放约束下中国海洋经济效率时空演进研究[J]．海洋经济，2024，14(4)：34-41．
DING Shiwei，DONG Yang．Research on spatial-temporal evolution of China’s marine economic efficiency under carbon emission constraints[J]．Marine Economics，2024，14(4)：34-41．

[12] 许冬兰，潘自强．中国海洋经济低碳转型进程评估及其影响因素：基于低碳效率与低碳全要素生产率的双重视角[J]．科技管理研究，2025，45(1)：220-228．
XU Donglan，PAN Ziqiang．The evaluation of low-carbon transformation process of China’s marine economy and its influencing factors：based on the dual perspective of low-carbon efficiency and low-carbon total factor productivity[J]．Science and Technology Management Research，2025，45(1)：220-228．

[13] 董梦如，韩增林，郭建科．中国海洋交通运输业碳排放效率测度及影响因素分析[J]．海洋通报，2020，39(2)：169-177．
DONG Mengru，HAN Zenglin，GUO Jianke．Measurement of carbon emission efficiency and its influencing factors in China’s marine transportation industry[J]．Marine Science Bulletin，2020，39(2)：169-177．

[14] 曹俐，张晨．碳排放约束下海洋渔业全要素生产率评价及收敛分析：以沿海地区为例[J]．海洋经济，2021，11(4)：27-35．
CAO Li，ZHANG Chen．Evaluation and convergence analysis of total factor productivity of marine fisheries under carbon emission constraint：take coastal areas as an example[J]．Marine Economics，2021，11(4)：27-35．

[15] 王倩倩，管红波．海洋绿色全要素生产率与海洋经济动态关系实证研究[J]．海洋经济，2022，12(5)：30-40．
WANG Qianqian，GUAN Hongbo．An empirical study on the dynamic relationship between marine green total factor productivity and marine economy[J]．Marine Economics，2022，12(5)：30-40．

[16] 赵林，张宇硕，焦新颖，等．基于 SBM 和 Malmquist 生产率指数的中国海洋经济效率评价研究[J]．资源科学，2016，38(3)：461-475．
ZHAO Lin，ZHANG Yushuo，JIAO Xinying，et al．An evaluation of Chinese marine economy efficiency based on SBM and Malmquist productivity indexes[J]．Resources Science，2016，38(3)：461-475．

[17] 方大春，孙明月．高铁时代下长三角城市群空间结构重构：基于社会网络分析[J]．经济地理，2015，35(10)：50-56．
FANG Dachun，SUN Mingyue．The reconstruction of the spatial structure of the Yangtze River Delta city group in the high-speed rail era：based on the social network analysis[J]．Economic Geography，2015，35(10)：50-56．

[18] 侯赟慧，刘志彪，岳中刚．长三角区域经济一体化进程的社会网络分析[J]．中国软科学，2009(12)：90-101．
HOU Yunhui，LIU Zhibiao，YUE Zhonggang．Social network analysis over the process of economic integration in the Yangtze River Delta[J]．China Soft Science，2009(12)：90-101．

[19] 汪永生．中国海洋经济韧性发展的空间网络结构研究[J]．地域研究与开发，2023，42(3)：7-12．
WANG Yongsheng．Development and spatial structure of China’s marine economic resilience[J]．Areal Research and Development，2023，42(3)：7-12．

［20］张华，孙才志．中国海洋科技创新效率空间关联网络特征研究［J］．海洋通报，2025，44(1)：96-104．
ZHANG Hua，SUN Caizhi．Research on the spatial correlation network pattern of marine science and technology innovation efficiency in China［J］．Marine Science Bulletin，2025，44(1)：96-104．

［21］薛诚，王小华，付秀梅．中国海洋经济绿色全要素生产率空间关联及原因分析［J］．环境与可持续发展，2022，47(4)：28-36．
XUE Cheng，WANG Xiaohua，FU Xiumei．Study on spatial correlation and relevant factors of green total factor productivity of marine economy in China［J］．Environment and Sustainable Development，2022，47(4)：28-36．

［22］高晓彤，赵林，曹乃刚．中国海洋经济高质量发展的空间关联网络结构演变［J］．地域研究与开发，2022，41(2)：7-13．
GAO Xiaotong，ZHAO Lin，CAO Naigang．Evolution characteristics of spatial correlation network of the high-quality development of China’s marine economy［J］．Areal Research and Development，2022，41(2)：7-13．

［23］李金克，张荣，李伯钧．环境动态性视角下大数据能力对制造业绿色竞争力的影响机制研究：基于 SBM-GML 指数模型［J］．科技进步与对策，2021，38(23)：67-75．
LI Jinke，ZHANG Rong，LI Bojun．Research on the influence mechanism of big data capability on green competitiveness of manufacturing industry from the perspective of environmental dynamics：based on SBM-GML index model［J］．Science and Technology Progress and Policy，2021，38(23)：67-75．

［24］丁黎黎，朱琳，何广顺．中国海洋经济绿色全要素生产率测度及影响因素［J］．中国科技论坛，2015(2)：72-78．
DING Lili，ZHU Lin，HE Guangshun．Measurement and influencing factors of green total factor productivity of marine economy in China［J］．Science and Technology Forum，2015(2)：72-78．

［25］惠利伟，张明斗．中国农业生产效率的空间关联特征及其影响因素研究［J］．统计与决策，2024，40(14)：90-95．
HUI Liwei，ZHANG Mingdou．Spatial correlation characteristics and influencing factors of China’s agricultural productivity［J］．Statistical and Decision，2024，40(14)：90-95．

［26］杨丽华，王伟，毛伟，等．中国海洋新质生产力空间关联网络结构及驱动因素［J］．经济地理，2025，45(4)：13-25．
YANG Lihua，WANG Wei，MAO Wei，et al．Structure and driving factors of spatial correlation network of marine new quality productive forces in China［J］．Economic Geography，2025，45(4)：13-25．

［27］陈诗一，陈登科．雾霾污染、政府治理与经济高质量发展［J］．经济研究，2018，53(2)：20-34．
CHEN Shiyi，CHEN Dengke．Air pollution，government regulations and high-quality economic development［J］．Economic Research Journal，2018，53(2)：20-34．