

中国海洋水产业隐含碳排放测算与效率分析

贺义雄^{1,2}, 陈紫翎¹

[1.浙江海洋大学 经济与管理学院, 浙江 舟山 316022; 2.南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519001]

摘要: 海洋水产业低碳化发展有助于中国“双碳”目标的良好实现。因此, 科学测算产业隐含碳排放量及其效率具有重要意义。本文在编制 2012 年、2015 年、2017 年、2018 年及 2020 年产业投入产出表基础上, 计算中国海洋水产业隐含碳排放量, 据此采用非期望产出的 Super-SBM 模型评估产业隐含碳排放效率。研究结果表明: ① 2012—2020 年, 中国海洋水产业整体的隐含碳排放量呈现先下降后上升, 再下降再上升的波动态势; ② 海洋水产业三大产业部门在隐含碳排放量的占比上保持相对稳定; ③ 海洋水产业的隐含碳排放效率尚存提升空间, 且各产业部门间的差异显著。

关键词: 海洋水产业; 隐含碳排放; 效率; 投入产出法

中图分类号: P74

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)06-0839-11

Calculation and efficiency analysis of embodied carbon emissions in China's marine aquaculture

HE Yixiong^{1,2}, CHEN Ziling¹

[1.College of Economics & Management, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519001, China]

Abstract: The low-carbon development of marine aquaculture can contribute to the successful achievement of China's "dual carbon" goals. Therefore, it is of great significance to scientifically calculate the embodied carbon emissions and analyze efficiency of the industry. Based on the compilation of input-output tables for the industry in 2012, 2015, 2017, 2018, and 2020, this article calculates the embodied carbon emissions, and uses the Super-SBM model of unexpected output to evaluate the efficiency. The research results indicate that: ① From 2012 to 2020, the overall embodied carbon emissions of China's marine aquaculture showed a fluctuating trend of first decreasing, then increasing, then decreasing again, and then increasing again; ② The three major industrial sectors of marine aquaculture maintain a relatively stable proportion of embodied carbon emissions; ③ There is still room for improvement in the embodied carbon emission efficiency of marine aquaculture, and there are significant differences between different industry sectors.

Key words: marine aquaculture; embodied carbon emissions; efficiency; input-output method

自 19 世纪工业革命以来, 能源短缺、污染加剧、生态破坏及气候变化等问题凸显, 成为全球

焦点^[1]。其中, 温室气体排放导致的全球变暖日益显著且紧迫, 严重威胁地球平衡与人类可持续

收稿日期: 2025-03-24, 修订日期: 2025-04-17

基金项目: 国家社科基金项目(23BJY197)

作者简介: 贺义雄(1981—), 男, 天津市人, 教授, 博士, 主要研究方向为海洋资源环境价值核算与管理、海洋资源产权交易与风险管理、海洋经济运行评价与政策分析, E-mail: heyixiongmail@163.com

通信作者: 陈紫翎, E-mail: 2209809374@qq.com

发展。作为全球减排行动的重要参与者,我国于2020年正式确立“双碳”战略目标,明确提出2030年前完成碳排放峰值控制,并规划至2060年实现净零排放的远景目标。过去20多年来,中国农业碳排放呈现大幅增长趋势^[2]。其中,渔业碳排放量接近农业碳排放总量的1/3,显著影响农业碳源结构^[3]。从产值角度看,海洋水产业占全国渔业的47%,因此对海洋水产业的碳排放进行研究有十分重要的意义。

海洋水产业是国民经济体系中以海洋水产为主体,通过捕捞、养殖、加工等手段向社会提供与海洋水产直接或间接相关的产品(货物和服务)的生产活动的集合。当前对中国海洋水产业碳排放研究要集中在碳排放量的测算和碳排放效率两个方面。在碳排放量测算方面,有学者发现海洋捕捞能耗是渔业能耗的重要组成部分^[4-5]。还有学者对海洋水产养殖^[6-7]、海洋水产品加工^[8-9]等方面的碳排放量进行评估,并深入剖析其驱动因素,预测未来发展趋势。在碳排放效率方面,通过将产业碳排放作为非期望产出纳入评价体系中,围绕效率测度^[10]、影响因素^[11]、不同区域的分析^[12-13]及产业生态效率^[14-15]等方面展开研究。总体来看,虽然关于中国海洋水产业碳排放的研究与实践已有一定基础,但是研究视角主要集中于直接排放。从整个生产链条角度看,某一生产经营行为的全部碳排放量既包括直接由生产产生的碳排放,也应涵盖因生产所需而间接产生的碳排放,即隐含碳排放^[12]。而目前对海洋水产业隐含碳排放的研究还十分匮乏。

基于此,本文以中国海洋水产业隐含碳排放为研究对象,利用投入产出这一研究贸易等领域隐含碳排放所采用的主要方法^[16-17],对具体排放数值进行测算,据此测度隐含碳排放效率,从而为全面把握中国海洋水产业碳排放情况,更好地促进行业低碳化发展提供理论支持。文章的边际贡献主要体现在以下三个方面:(1)编制了海洋水产业投入产出表,为中国海洋水产业隐含碳排放研究提供了基础支持。(2)测算了中国海洋水产业隐含碳排放量,全面分析并评估了行业碳排放状况。(3)揭示中国海洋水产业隐含碳排放效率的变化特征,系统探讨改善行业碳排放的措施办法。

1 材料与方法

1.1 研究方法

1.1.1 海洋水产业隐含碳排放量测算方法

1.1.1.1 海洋水产业隐含碳排放系数模型

参考金剑等^[18]的研究,本文构建海洋水产业各产业部门的隐含碳排放系数向量模型。

首先,构造生产总投入直接消耗系数矩阵 $A = \left\{ \frac{x_{ij}}{X_j} \right\}$,其中 x_{ij} 表示为生产 X_j 的产出所消耗的 i 部门的投入。同时,结合常用的投入产出模型,得到生产的投入产出方程的矩阵形式为:

$$X = AX + Y \quad (1)$$

式中: X 为总产出; AX 为中间投入; Y 为生产的最终产品。由公式(1)可得总产出 X 为:

$$X = (I - A)^{-1}Y \quad (2)$$

其次,基于既有研究^[19],按照联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的方法,根据相应的碳排放系数(表1)计算各部门的碳排放量。计算过程涵盖九类主要能源消耗类型,包括煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油及天然气(二次能源消耗未纳入核算范围)。计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^9 e_i \times \varepsilon_i \times \eta_i \quad (3)$$

式中: C 表示海洋水产业各产业部门所对应的中国投入产出表各部门能源消耗的碳排放总量; e_i 表示部门第 i 种能源的消耗量,由于原始数值为能源消耗的实物量,故本文通过标准煤折算系数将其先转化为标准量,再计算实际碳排放量; ε_i 为不同能源种类对应的标准煤折算系数; η_i 为不同能源种类相应的碳排放系数。

再次,测算海洋水产业各产业部门直接产生的碳排放量 E_j 。通过测算海洋水产业各产业部门对应的中国投入产出表各部门中化石能源(如煤炭、原油)使用导致的碳排放量,借助剥离系数加总可得 E_j ,计算如下所示:

$$E_j = \sum_{k=1}^n C_{jk} \times q_{jk} \quad (4)$$

式中: C_{jk} 代表海洋水产业第 j 个产业部门所对应的中国投入产出表第 k 个部门能源消耗的碳

表1 各类能源碳排放系数

Tab.1 Carbon emission coefficients of all energy sources

能源种类	标准煤折算系数/ (kgce/kg)	碳排放系数/ (kgCO ₂ /kg)
煤炭	0.7143	1.9003
焦炭	0.9714	2.8604
原油	1.4286	3.0202
汽油	1.4714	2.9251
煤油	1.4714	3.0179
柴油	1.4571	3.0959
燃料油	1.4286	3.1705
天然气	1.3300	2.1622

排放总量; q_{jk} 代表第 j 个产业部门所对应的中国投入产出表第 k 个部门的剥离系数。

最后,通过 E_j 可计算海洋水产业各产业部门单位产出的直接碳排放系数向量 g , 即 $g = \left\{ \frac{E_j}{X_j} \right\}$ 。由于隐含碳排放系数实质是为了生产单位 j 部门的最终需求,产生的直接和间接碳排放量,因此单位产出的隐含碳排放系数向量为直接碳排放系数向量与里昂惕夫逆矩阵的乘积,即单位产出的隐含碳排放系数向量 V 为:

$$V = g(I - A)^{-1} \quad (5)$$

1.1.1.2 海洋水产业隐含碳排放量测算模型

令 F_j 表示海洋水产业各产业部门隐含碳排放量,可得:

$$F_j = VY \quad (6)$$

式中: Y 为海洋水产业投入产出表中的最终需求。

1.1.2 海洋水产业隐含碳排放效率测度模型

当前,数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)仍是效率评估的主流工具。然而,传统 DEA 模型主要关注期望产出指标,未能有效处理资源冗余与效率松弛现象。为此, Tone(2001)提出基于松弛测度(Slack-Based Measure, SBM)的改进模型^[20],通过非径向优化方法提升测算精度,但其方向向量设定存在主观性缺陷^[21]。基于此,本研究结合成刚的改进框架^[22],使用带有非期望产出的 Super-SBM 模型以实现更精确的效率评估。

假设有 n 个决策单元,每个决策单元中都有 m 个投入指标,则形成公式:

$$\rho = \min \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^x}{x_{i0}}}{1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{l0}} \right)}$$

$$s.t. \quad x_{i0} \geq \sum_{j=1, \neq 0} \lambda_j x_j - s_i^x, \forall i;$$

$$y_{k0} \leq \sum_{j=1, \neq 0} \lambda_j y_j + s_k^y, \forall k;$$

$$z_{l0} \geq \sum_{j=1, \neq 0} \lambda_j z_j - s_l^z, \forall l;$$

$$1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{l0}} \right) > 0;$$

$$s_i^x \geq 0, s_k^y \geq 0, s_l^z \geq 0, \lambda_j \geq 0, \forall i, j, k, l \quad (7)$$

式中: ρ 表示决策单元的效率值, m 和 s 代表投入和产出的变量数,当 $\rho \geq 1$ 时,表示当前对象有效; x_i 为投入向量; y_k 为期望产出向量; z_l 为非期望产出向量; j 为决策单元代码; λ_j 为第 j 个 DMU 的权重向量; $s_i^x \in R^{m \times n}$ 和 $s_l^z \in R^{s^2}$ 分别表示投入和非期望产出的过剩量; $s_k^y \in R^{s^1}$ 代表期望产出的短缺量。

1.2 指标体系构建

本文在借鉴相关学者研究的基础上^[15],选取劳动力、能源、资本和技术进步为投入指标。劳动力投入,以海洋水产业各产业部门的年末从业人员数量表征;能源投入,以海洋水产业各产业部门的能源消耗量衡量;资本投入和技术进步,分别以海洋水产业各产业部门固定资产投资和科研人员数量代表。将海洋水产业总产出作为期望产出指标,产业隐含碳排放量作为非期望产出指标。

1.3 数据来源

本文投入产出数据来源于自编的海洋水产业投入产出表,该表依据国家统计局颁布的中国投入产出表进行编制。由于中国投入产出表非逐年编制,因此本文选取 2012 年、2015 年、2017 年、2018 年、2020 年的数据信息。另外,鉴于不同年份投入产出表中的部门分类不同(2012 年是 139 个部门,2015 年是 42 个部门,2017 年是 149 个部门,2018 年是 153 个部门,2020 年是 153 个部门),为便于后续计算,参考国家统计局发布的《国民经济行业分类》(GB/T

4754—2017)并对照能源消耗量中的行业分类情况,把各年投入产出表的部门都合并归属入13个行业。自编投入产出表过程中,计算剥离系数的基础数据来自2013、2016年、2018年、2019年及2021年的《中国统计年鉴》《中国渔业统计年鉴》《中国劳动统计年鉴》等公开数据信息渠道。行业部门企业法人单位数则来源于2018年、2019年和2021年的《中国基本单位统计年鉴》。

能源消耗量来自国泰安数据库,标准煤折算系数和碳排放系数数据来源于《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)和《省级温室气体清单编制指南》。

对2013年、2016年、2018年、2019年和2021年《中国统计年鉴》《中国固定资产投资统计年鉴》中全国固定资产投资数据剥离获得。

2 结果与分析

2.1 海洋水产业投入产出表的编制

2.1.1 海洋水产业统计分类的界定

海洋水产业是一个以海洋水产捕捞、养殖和产品加工为主,包括设备制造与使用、产品交易与流通等生产系统。本文依据《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)和《海洋及相关产业分类》(GB/T 20794—2021)将海洋水产业划分为海洋水产业第一产业、海洋水产业第二产业以及海洋水产业第三产业共13个部门,并与中国投入产出表内15个国民经济部门建立对应关系(表2)。其中,将投入产出表内的部门按经济活动相似性原则将相近的部门进行归类合并,从而形成本文15个国民经济对应部门,例如农林牧渔产品和服务部门是由农产品(01001)、林产品(02002)、畜牧产品(03003)、渔产品(04004)、农、林、牧、渔服务产品(05005)等部门合并组成,部门组成详情见表2中合并部门代码。在此基础上,本文进一步依据产业活动特性将海洋水产业分为三大产业门类:海洋水产业第一产业聚焦海洋水产资源的直接获取与初级生产,包括海洋水产品捕捞与养殖等部门;第二产业涵盖海洋水产品的深加工与工业化制造,具体涉及海洋水产食品生产、海洋水产原料及医用品生产以及海洋水产设备制造等部门;第三产业覆盖海洋水

产业的流通、服务、科技研发及管理支持,包含海洋水产批发零售、海洋水产物流、海洋水产文化、运动和娱乐、海洋水产信息与科技、海洋水产教育、海洋水产管理、海洋水产设备租赁和商务服务及海洋水产科技研发与推广等服务型部门。其余未归并于海洋水产业的部门则按照三大产业分类进行归组(其他第一产业、其他第二产业及其他第三产业)。据此,分别编制2012、2015、2017、2018和2020五年的海洋水产业投入产出表(16部门)。

2.1.2 海洋水产业投入产出表的表式设计

本文基于历年中国投入产出表的基本表式设计海洋水产业投入产出表(表3)。其中,结合海洋水产业各产业部门与对应国民经济相关产业的关系,经过拆分、合并,使得国民经济产业部门与海洋水产业产业部门相对应,因此可以保证表格的平衡关系整体上不变。

表3中,海洋水产业投入产出表共分为16个部门,其中14~16部门属于非海洋水产部门。进一步地,第一象限为海洋水产业16个部门之间中间投入与中间使用情况,用 $x_{ij}^d(i, j=1, 2, \dots, 16)$ 表示。第二象限为16个部门最终使用数据, f_i 表示第*i*个部门在消费支出合计、固定资产形成总额、存货变动及出口的分配情况。第三象限为增加值数据, V_j 表示第*j*个部门的劳动者报酬、生产税净额、固定资产折旧和营业盈余的合计数据。

海洋水产业投入产出表遵循投入产出表的行平衡关系和列平衡关系,且行平衡和列平衡既相互独立又相互制约。

$$\text{行平衡关系为: } \sum_{j=1}^{16} x_{ij} + f_i = X_i, (i=1, 2, \dots, 16) \quad (8)$$

$$\text{列平衡关系为: } \sum_{i=1}^{16} x_{ij} + V_j = X_j, (j=1, 2, \dots, 16) \quad (9)$$

$$\text{总量平衡关系为: } \sum_{i=1}^{16} X_i = \sum_{j=1}^{16} X_j \quad (10)$$

2.1.3 海洋水产业投入产出表的编制

2.1.3.1 产业剥离系数的确定

2006年,何广顺等提出了一套以“剥离系数”为核心的剥离方法体系,客观核算了海洋生

表 2 海洋水产业分类及与中国投入产出对应关系

Tab.2 Classification of marine aquaculture and its correspondence with China's input-output

代码与名称	产业部门	中国投入产出表对应部门	合并部门代码
01海洋水产品捕捞	海洋水产品捕捞	农林牧渔产品和服务	01001、02002、03003、04004、05005
02海洋水产品养殖	海洋水产品养殖	农林牧渔产品和服务	01001、02002、03003、04004、05005
03海洋水产食品生产	海洋水产食品生产	食品和烟草	13012、13013、13014、13015、13016、13017、13018、14019、14020、14021、14022、15023、15025、16026
04海洋水产原料及医用品生产	海洋水产原料及医用品生产	化学产品	26043、26044、26045、26046、26047、26048、26049、27050、28051
		专用设备	35073、35074、35075、35076a、35076b
05海洋水产设备制造	海洋水产设备制造	金属制品、机械和设备修理服务	43097
		交通运输设备	37079、37080、37081
06海洋水产批发零售	海洋水产批发零售	批发和零售	51105、52106
07海洋水产物流	海洋水产物流	交通运输、仓储和邮政	53107、53108、54109、54110、55111、55112、56113、5611、57115、58116、59117、60118
08海洋水产文化、运动和娱乐	海洋水产文化、运动和娱乐	文化、体育和娱乐	86143、87144、88145、89146、90147
09海洋水产信息与科技	海洋水产信息与科技	信息传输、软件和信息技术服务	63121、63122、64123、65124、65125
10海洋水产教育	海洋水产教育	教育	83140
11海洋水产管理	海洋水产管理	公共管理、社会保障和社会组织	91149、94148
		水利、环境和公共设施管理	761335、77136、78137
12海洋水产设备租赁和商务服务	海洋水产设备租赁和商务服务	租赁和商务服务	71130、72131
13海洋水产科技研发与推广	海洋水产科技研发与推广	研究和试验发展	73132、74133、75134

表 3 海洋水产业投入产出基本表示

Tab.3 Basic format of input-output table for marine aquaculture

投入产出	中间使用					最终使用				总产出
	1	2	...	16	合计	消费	资本形成	存货变动	出口	合计
1										
中	2									
间	...		$\sum_{j=1}^{16} x_{ij}$					f_i		X_i
投	16									
入	合计									
增加值	合计		V_j							
总投入			X_j					第Ⅳ象限		

产总值^[23]。依据这一思路,本文深入全国投入产出表的细分领域,鉴别并提取出隶属于海洋水产业的数据,通过对这些被剥离出的产业部门进行科学的整合与重组,编制海洋水产业的投入产出表。

剥离系数用于定义特定经济部门中符合研究范畴的细分领域价值占比。由于海洋水产业

在我国经济总量中份额较低,加之部分数据可得性受限,实际测算中仅能直接核定部分产业部门的剥离系数,其余需通过估算完成。其中,对一部分行业,根据产业部门企业法人单位数占中国投入产出表对应部门的比例确定剥离系数。例如,通过《中国基本单位统计年鉴》可以确定2020年海洋水产养殖和捕捞企业法人单位数分

别为 60817 个和 1507 个,农林牧渔业企业法人单位数为 841656 个,由此可以计算得到海洋水产品养殖和海洋水产品捕捞部门的剥离系数为 0.0723 和 0.0018。对于剩余的行业,根据海洋渔

业增加值占国内生产总值的比例近似确定。
据此,海洋水产业各产业部门的剥离系数见表 4。

表 4 中国海洋水产业各产业部门剥离系数
Tab.4 Stripping coefficients of various industrial sectors in China's marine aquaculture

产业部门	中国投入产出表对应部门	2012年	2015年	2017年	2018年	2020年
海洋水产品捕捞	农林牧渔产品和服务	0.0023	0.0032	0.0023	0.0025	0.0018
海洋水产品养殖	农林牧渔产品和服务	0.0636	0.0730	0.0798	0.0823	0.0723
海洋水产食品生产	食品和烟草	0.0497	0.0454	0.0459	0.0474	0.0413
海洋水产原料及医用品生产	化学产品	0.0476	0.0501	0.0516	0.0522	0.0501
	专用设备	0.0070	0.0040	0.0068	0.0071	0.0058
海洋水产设备制造	金属制品、机械和设备修理服务	0.2830	0.2830	0.2682	0.3035	0.1621
	交通运输设备	0.1239	0.3002	0.2876	0.2906	0.2785
海洋水产批发零售	批发和零售	0.0024	0.0020	0.0025	0.0026	0.0020
海洋水产物流	交通运输、仓储和邮政	0.0432	0.0354	0.0278	0.0305	0.0198
海洋水产文化、运动和娱乐	文化、体育和娱乐	0.0420	0.0318	0.0277	0.0499	0.0941
海洋水产信息与科技	信息传输、软件和信息技术服务	0.0770	0.0812	0.0563	0.0500	0.1906
海洋水产教育	教育	0.0588	0.0663	0.0493	0.0076	0.1745
海洋水产管理	公共管理、社会保障和社会组织	0.0838	0.0862	0.0691	0.0776	0.0948
	水利、环境和公共设施管理	0.0770	0.0812	0.0563	0.0500	0.1906
海洋水产设备租赁和商务服务	租赁和商务服务	0.0770	0.0812	0.0563	0.0500	0.1906
海洋水产科技研发与推广	研究和试验发展	0.0770	0.0812	0.0563	0.0500	0.1906

2.1.3.2 产业剥离与整理

基于各海洋水产产业部门和中国投入产出表中相应部门的关系,本文从行和列两个方向进行剥离。若海洋水产产业部门与中国投入产出表中部门为一对一或一对多关系时,将中国投入产出表中部门对应的行或列乘以剥离系数得到剥离向量;若为多对一或多对多交叉关联,则依据各子部门剥离系数,进行多次剥离获得属于不同产业部门的多个剥离向量。

由此,编制完成 2012 年、2015 年、2017 年、2018 年和 2020 年的海洋水产业投入产出表。

2.2 海洋水产业隐含碳排放量测算

利用前述模型测算 2012 年、2015 年、2017 年、2018 年、2020 年中国海洋水产业及其第一、第二与第三产业部门的隐含碳排放量。由于测算隐含碳排放量需要能源消耗数据,但海洋水产设备租赁和商务服务及海洋水产科技研发与推广这两个部门的能源消耗数据在数据库

中并未直接体现,且其能源消耗相对较少^[24],因此将这两个部门归并为第三产业中的其他行业,从而进行隐含碳排放量测算。

由表 5 可知,中国海洋水产业隐含碳排放量在 2012—2020 年呈现先减后增、再减复增的波动特征,这一变化由该产业隐含碳排放系数与经济发展动态相互作用所驱动。图 1 展示了中国海洋水产业产出和隐含碳排放系数增长率对比的变化情况。通过绝对值的比较可以看出,2012—2015 年、2015—2017 年这两个时段内,产出的缩减程度显著高于隐含碳排放系数的增长幅度,导致 2017 年隐含碳排放量相较于 2012 年呈下降态势。2015—2017 年、2017—2018 年这两个时段,海洋水产业产出增长幅度小于隐含碳排放系数下降幅度,使得 2018 年隐含碳排放量下降。2017—2018 年和 2018—2020 年,海洋水产业产出增长幅度大于隐含碳排放系数下降幅度,从而使海洋水产业隐含碳排放量表现为上升

态势。由此表明,当前海洋水产业的生产模式仍较粗放,产业发展还需进一步优化升级。

表 5 中国海洋水产业各产业部门隐含碳排放量(10^4t)

Tab.5 Embodied carbon emissions of various industrial sectors in China's marine aquaculture (10^4t)

年份	第一产业	第二产业	第三产业
2012	1128.65198	16018.14253	9371.621299
2015	1076.015201	13231.54918	5306.435125
2017	1618.115114	15524.43305	8134.389741
2018	1519.793927	14381.75025	8459.271255
2020	1304.273709	14345.14438	9179.970574

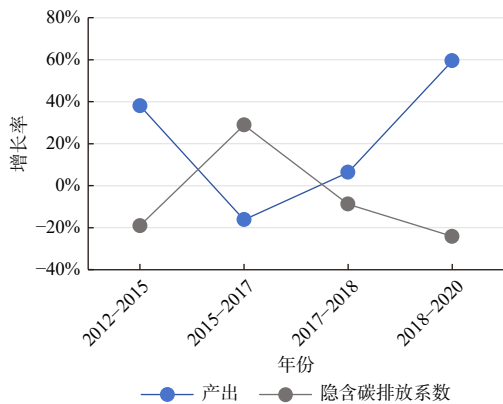


图 1 中国海洋水产业产出和隐含碳排放系数增长率对比

Fig. 1 Growth rates of marine aquaculture output value and embodied carbon emission coefficient in China

另外,从贡献率角度看,中国海洋水产业各产业部门隐含碳排放量之间有明显差异(图 2)。具体而言,第一产业的隐含碳排放量在这三者中处于最低水平,第二产业的隐含碳排放量处于最高水平,且在过去的几年中这一特点保持了相对稳定的态势。研究期内,第一产业的占比维持在 4.26% 至 6.24%,第二产业的占比则在 57.77% 至 67.46% 波动,第三产业的占比则介于 27.05% 至 36.97%。总体看,第二产业和第三产业占比的相对变化较为明显。

进一步地,分具体产业部门看,海洋水产业隐含碳排放量变化呈显著不同特征。第一产业隐含碳排放量的演变可分为两个阶段:第一阶段为 2012 年至 2017 年,此期间呈现出显著的波动增长态势,该阶段内海洋水产第一产业的隐含碳排放量大幅提升。对比 2012 年,2017 年隐含碳排放量激增了 489.46 万吨,增长率高达 43.37%。

这一增长趋势存在双重驱动因素:一方面,从产业规模维度看,《中国渔业统计年鉴》数据显示这一时期海洋水产品产量由 30333437 吨攀升至 33217376 吨,增长率达 9.51%,产业规模持续扩大;另一方面,从能源消耗视角看,该时期内产业能源消耗量增长率高达 49.96%,能源强度大幅上升,最终导致隐含碳排放量突破性增长。第二阶段则是自 2017 年至 2020 年,此阶段情况发生逆转,表现为明显的下降态势。与前一阶段相比,海洋水产第一产业的隐含碳排放量开始呈现缩减态势。从 2017 年至 2018 年,隐含碳排放量减少了 98.32 万吨,下降幅度为 6.08%。紧接着,2018 年至 2020 年,隐含碳排放量减少趋势更为显著,总量下降了 215.52 万吨,年下降率达 7.09%。这一系列变化与国家政策导向密不可分,例如《农业部办公厅关于做好 2017 年渔业节能减排项目实施工作的通知》《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》等政策文件的出台,明确指出提升并推广水产养殖领域节能减排技术的重要性,这可以视为减缓乃至降低海洋水产第一产业隐含碳排放量的一个关键举措。

第二产业的隐含碳排放量展现出一种先降后升再降的 N 形波动态势。具体而言,该产业隐含碳排放量在 2012 年达到峰值,即 16018.14 万吨,然而在 2015 年却降至最低点,即 13231.54 万吨,下降了 2786.60 万吨,平均年下降率达 5.8%。在这一下降过程中,水产品加工业隐含碳排放量的显著减少起到了主导作用。为了推动水产品加工业的绿色发展,国家出台了一系列相关政策,如《水产品加工业水污染物排放标准》《国务院关于印发水污染防治行动计划的通知》以及《国务院关于印发循环经济发展战略及近期

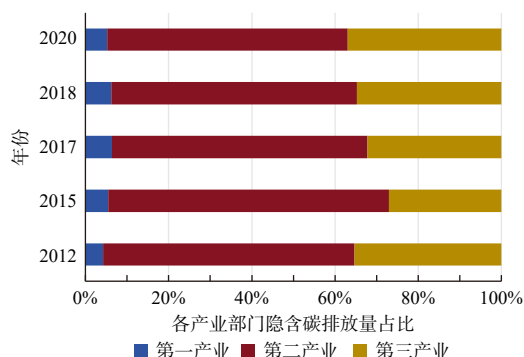


图2 中国海洋水产业各产业部门隐含碳排放量贡献率

Fig. 2 Embodied carbon emission contribution rates of various industrial sectors in China's marine aquaculture

行动计划的通知》等,这些政策的实施为水产品加工业的转型升级提供了有力的支持。然而,在2015年至2017年,海洋水产第二产业的隐含碳排放量又出现了一定程度的回升,增加了2292.88万吨,年上升幅度达到8.66%。这一变化与国内消费者对水产品需求的不断增长以及环渤海地区水产品加工企业不断扩张有密不可分的联系。《中国渔业统计年鉴》数据显示,2015年至2017年,环渤海地区水产品加工能力年均增长14.14万吨。企业在投资新建生产线和厂房的过程中,不可避免地会带来碳排放量的增加。在2017至2020年期间,海洋水产第二产业的隐含碳排放量经历了持续的下降态势,特别是在2017至2018年实现了7.36%的大幅下降,然而在2018至2020年,尽管该产业的隐含碳排放量仍在持续减少,但其下降速率却明显放缓至0.13%。这一变化可能的原因在于,随着前期减排工作的深入,海洋水产第二产业的隐含碳排放量已降至一个相对较低的水平,剩余的减排空间变得相对有限,进一步削减的难度显著增加。同时,减排难度的提升也伴随着更高的投资和技术创新成本,从而在一定程度上制约了减排工作的进一步推进。

第三产业隐含碳排放量总体呈现先下降再上升的V形变化态势。2012—2015年海洋水产第三产业隐含碳排放量下降了4065.19万吨,下降率43.38%。水产品物流体系建设是促进这一情况形成的重要因素之一。农业农村部于2011年提出了《全国渔业发展第十二个五年规

划(2011—2015年)》政策,明确指出推进现代物流体系建设,加速水产品批发市场和冷链系统建设,推动生产端与消费端的冷链运输体系高效协同。但是,2015—2020年隐含碳排放量持续增加,几乎增加至2012年水平,增长率高达73%。随着海洋水产业结构的调整和升级,第三产业在总产值中的比重从2015年的30.67%逐渐上升到2020年的75.64%,这就使得该产业的隐含碳排放量增加。

2.3 海洋水产业隐含碳排放效率分析

海洋水产业隐含碳排放效率具体测算结果见表6。参考多数文献的设定,本文按总技术效率、纯技术效率与规模效率分别列出。

总技术效率方面,5年中只有3年海洋水产业整体的隐含碳排放总技术效率值大于1,即实现DEA有效,说明中国海洋水产业隐含碳排放效率还有待提高,在资源分配、能源投入、人员管理等方面仍有较大提升空间。图3表明,从2012年到2020年,中国海洋水产业隐含碳排放效率围绕均值0.93上下波动,整体状况不佳。此外,海洋水产各产业部门之间的隐含碳排放效率差距较大、水平参差不齐(图4)。其中,第三产业隐含碳排放效率值最低,始终低于0.5,第一产业和第二产业隐含碳排放效率值相对较高,分别围绕均值0.89和0.83上下波动。考虑中国海洋水产需求不断上升的现实情况,因此提高产业现代化水平、推动产业低碳化绿色化发展是提升产业隐含碳排放效率的必由之路。

分解效率方面,纯技术效率更佳。纯技术效率有效的次数有10次,规模效率则不存在有效情况。海洋水产业整体隐含碳排放纯技术效率和规模效率的平均值分别为1.112、0.823,标准差分别为0.084、0.142,表明纯技术效率水平不仅更高,而且更稳定。通过图5分产业来看,海洋水产第一产业纯技术效率长期保持在较高水平,2017年下降后又回升。第二产业的纯技术效率上下波动幅度最大,在2015年达到最高点之后迅速下降随后又快速上升。第三产业的纯技术效率长期维持在较低水平,其围绕均值0.458上下波动。

进一步地,由于总技术效率是纯技术效率与规模效率的乘积,这就意味着当纯技术效率达到

表 6 中国海洋水产业及各产业部门隐含碳排放效率及分解值

Tab.6 Efficiency and decomposition values of embodied carbon emissions of China's marine aquaculture and its various industrial sectors					
年份	产业部门	总技术效率	纯技术效率	规模效率	规模报酬变化
2012	第一产业	0.709805886	1.005544646	0.705891966	递增
	第二产业	0.353855871	0.443089184	0.798610942	递增
	第三产业	0.447670528	0.519731646	0.861349373	递增
	海洋水产业	1.055590529	1.108917209	0.951911036	递减
2015	第一产业	1.022297348	1.090315738	0.937615878	递增
	第二产业	0.477242556	0.527090869	0.905427478	递减
	第三产业	1.229916638	1.244646729	0.988165244	递增
	海洋水产业	0.670758489	1.034047108	0.648673048	递减
2017	第一产业	0.829484247	0.854888999	0.970282981	递增
	第二产业	0.366238331	0.385024581	0.951207661	递增
	第三产业	0.624669389	0.632252498	0.988006201	递增
	海洋水产业	0.631289896	1.014459421	0.622291915	递减
2018	第一产业	0.879767565	0.934335477	0.941597088	递增
	第二产业	0.399587387	0.419813581	0.951821012	递增
	第三产业	0.689020793	0.711735872	0.96808496	递减
	海洋水产业	1.264380545	1.273200545	0.993072577	递减
2020	第一产业	1.037687361	1.042968998	0.99493596	递增
	第二产业	0.473701847	0.517060208	0.916144463	递增
	第三产业	1.168444824	1.23977265	0.942467011	递减
	海洋水产业	1.01447572	1.131424693	0.896635654	递减

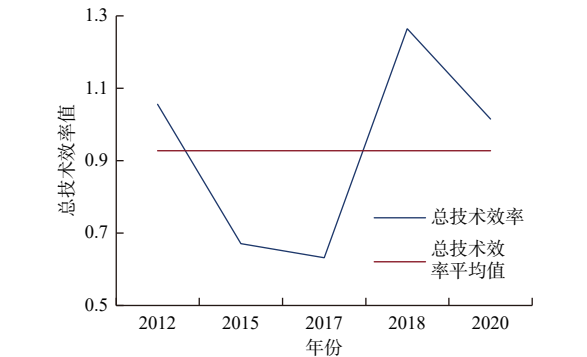


图 3 中国海洋水产业隐含碳排放总技术效率变动态势

Fig. 3 Trends in the overall technical efficiency of embodied carbon emissions of China's marine aquaculture

最优时,总技术效率会更多受规模效率的影响。因此,对于 2015、2017 这 2 年,海洋水产业隐含碳排放纯技术效率大于 1,而总技术效率未达到有效,且两者间差距较大,这表明产业在资源配置以及高效利用等方面做得较好,但规模效率很

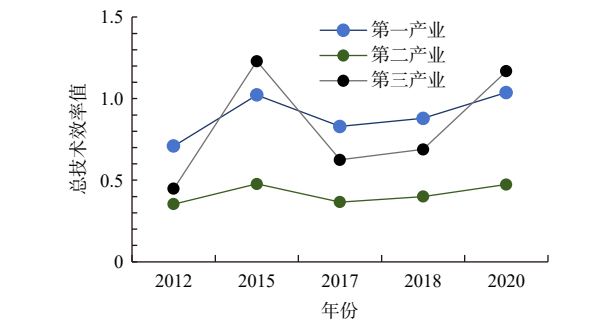


图 4 中国海洋水产业各产业部门隐含碳排放总技术效率变动态势

Fig. 4 Trends in the overall technical efficiency of embodied carbon emissions of various industrial sectors in China's marine aquaculture

低。此外,对比图 4 和图 5 可知,中国海洋水产各产业部门隐含碳排放总技术效率整体变化态势与纯技术效率变化态势完全一致,且研究期内规模效率保持在一个较为稳定的水平(图 6),说明纯技术效率是影响海洋水产业三大产业部门

隐含碳排放总技术效率的主要原因。

另外,对于规模报酬的变化情况,特别是在2018年后总体及第三产业部门规模报酬都为递减。这表明整体上要素的投入已经超过了消化能力,说明未来产业发展需摒弃粗放型要素扩张路径,也进一步表明纯技术效率对产业总技术效率改变的重要意义。

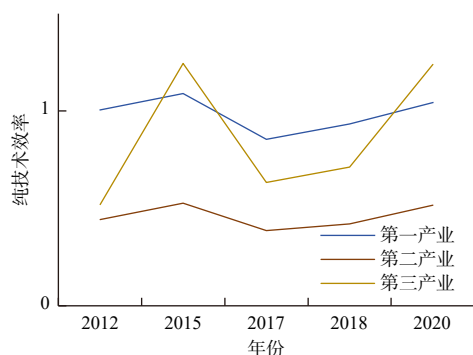


图5 中国海洋水产业各产业部门隐含碳排放纯技术效率变动态势

Fig. 5 Trends in pure technical efficiency of embodied carbon emissions of various industrial sectors in China's marine aquaculture

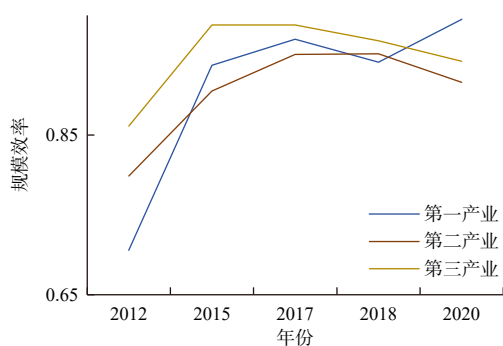


图6 中国海洋水产业各产业部门隐含碳排放规模效率变动态势

Fig. 6 Trends in scale efficiency of embodied carbon emissions of various industrial sectors in China's marine aquaculture

2.4 对策建议

基于以上研究,本文针对降低中国海洋水产业碳排放,推动行业向低碳、绿色及可持续发展目标转型提出建议如下:

(1)优化升级生产模式,构建差异化减排路径。对于第一产业部门,应积极巩固减排成效。针对第二产业部门中水产品加工制造等环节,应

引入先进的节能技术和设备,从而实现资源的最大化利用与废弃物的最小化排放。对于第三产业部门,要推广绿色低碳的运营模式,同时鼓励向更加专业化、精细化的方向发展,从而在保障服务质量的同时,实现环保与效益的双重提升。

(2)提升第三产业碳排放效率。推广绿色物流与可循环包装,优化服务流程;同时,鼓励与第一、二产业深度融合,通过技术和模式创新实现产业链低碳化改造,共同推动海洋水产产业向低碳、高效、可持续方向发展。

(3)控制要素投入规模,进一步提升资源配置与利用水平。充分运用数字化、信息化等技术手段,推动数字化与产业发展的深度融合,提升资源利用效率,为实现行业低碳化发展奠定坚实基础。

3 结论

(1)2012—2020年,中国海洋水产业整体的隐含碳排放量呈现先下降后上升,再下降再上升的波动态势。这是产业隐含碳排放系数和产业发展相互作用的结果。分具体产业部门看,第一产业的隐含碳排放量变动分为两个阶段:第一阶段为2012年至2017年,此期间呈现出显著的波动增长态势,第二阶段则是自2017年至2020年,此阶段表现为明显的下降态势;第二产业的隐含碳排放量展现出一种先降后升再降的N形波动态势;第三产业隐含碳排放量总体呈现先下降再上升的V形变化态势。

(2)海洋水产业三大产业部门隐含碳排放量占比相对稳定。第一产业的占比维持在4.26%至6.24%,而第二产业的占比在57.77%至67.46%波动,第三产业的占比则介于27.05%至36.97%。

(3)海洋水产业隐含碳排放效率还有待提高,同时各产业部门之间的差距较大、水平参差不齐,且纯技术效率是影响三大产业总技术效率的主要原因。

参考文献:

- [1] 耿涌,董会娟,郝凤明,等. 应对气候变化的碳足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(10): 6-12.
- [2] JI M, LI J R, ZHANG M D. What drives the agricultural carbon emissions for low-carbon transition? Evidence from Chi-

- na[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 105: 107440.
- [3] 徐 皓. 我国渔业节能减排基本情况研究报告 [J]. *渔业现代化*, 2008, 35(4): 1-7.
- [4] PORT D, PEREZ J A A, DE MENEZES J T. Energy direct inputs and greenhouse gas emissions of the main industrial trawl fishery of Brazil[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 107(1): 251-260.
- [5] 陈雨格, 卢泓钢, 郑家喜. 中国渔业碳排放效率空间关联网及影响因素 [J]. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(11): 191-204.
- [6] 赵一行, 郅 欣, 杨青峰. 河北省 2000—2020 年生态系统碳源/汇时空演变分析研究 [J/OL]. *长江科学院院报*, 1-10 [2024-12-24]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20241022.1103.002>.
- [7] 狄乾斌, 陈小龙, 苏子晓, 等. 海洋渔业碳排放效率的时空演变及影响因素——以北部海洋经济圈为例 [J]. *生态经济*, 2024, 40(2): 109-116.
- [8] 付秀梅, 齐俏俏, 林春宇, 等. 中国水产品贸易生态足迹时空演变与动态预测 [J]. *生态学报*, 2024, 44(18): 8047-8061.
- [9] DENHAM F C, BISWAS W K, SOLAH V A, et al. Greenhouse gas emissions from a western Australian finfish supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 2079-2087.
- [10] 汪克亮, 袁鸿宇. 异质性环境规制、空间溢出与渔业碳排放效率 [J]. *海洋开发与管理*, 2023, 40(2): 3-17.
- [11] 陈小龙, 贾文茜, 陈科其, 等. 中国淡水养殖碳排放效率的空间关联网结构及其影响因素 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(7): 1122-1135.
- [12] 杨 卫, 赵 丹. 中国海洋渔业碳排放效率区域差异与时空分异 [J]. *海洋经济*, 2024, 14(3): 43-53.
- [13] 狄乾斌, 陈小龙, 苏子晓, 等. “双碳”目标下中国海洋渔业碳排放效率区域差异及碳减排潜力研究 [J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(1): 29-37.
- [14] 丁颖辉, 杨亚茹. 中国省域降碳潜力空间关联网结构特征及影响因素 [J]. *科技管理研究*, 2024, 44(5): 199-208.
- [15] 徐 胜, 季倩芸. 沿海地区海洋渔业生态效率及影响因素研究——基于 SBM-Tobit 模型 [J]. *中国渔业经济*, 2023, 41(5): 78-88.
- [16] 阳立高, 周佩文, 谢 锐, 等. 数字经济视角下中国对外贸易隐含碳排放的测算及驱动因素研究 [J]. *经济动态*, 2024(10): 92-108.
- [17] 胡剑波, 吴驰宸. 中国产业部门隐含碳生产率的驱动因素分解——基于 LMDI-PDA 模型的实证分析 [J]. *经济问题*, 2024(8): 43-51.
- [18] 金 剑, 宋美辰, 范小宁. 中医药行业隐含碳排放效率研究——基于编制非竞争型投入产出表的实证分析 [J]. *统计与管理*, 2023, 38(7): 4-17.
- [19] 苗安康, 袁 越, 吴 涵, 等. 中国省域碳达峰路径与政策 [J]. *环境科学*, 2023, 44(8): 4623-4636.
- [20] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509.
- [21] SONG M L, PENG J, WANG J L, et al. Environmental efficiency and economic growth of China: a ray slack-based model analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 269(1): 51-63.
- [22] 成 刚. 数据包络分析方法与 MaxDEA 软件 [M]. 北京: 知识产权出版社, 2014.
- [23] 何广顺, 王晓惠, 周洪军, 等. 海洋生产总值核算方法研究 [J]. *海洋通报*, 2006, 25(3): 64-71.
- [24] 吴利学, 王 蕾. 中国能源消费与能源效率波动及其影响因素研究 [J]. *城市与环境研究*, 2019(3): 55-71.

(本文编辑: 曲丽梅)