

我国海洋渔业净碳排放量测算及减排路径探究

郭凌娜

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2026年6月22日; 录用日期: 2026年7月29日; 发布日期: 2026年8月28日

摘要

过量的碳排放将对人类生存环境造成不可逆转的破坏, 因此降低碳排放已成为当前亟需解决的问题。海洋渔业既能通过海洋捕捞和渔业养殖增加碳排放, 也可以通过生物固碳增加碳汇, 因此, 科学评估海洋渔业碳排放和碳汇的表现, 识别分析其影响因素, 并探索可行的减排路径, 有助于更全面地认识海洋渔业碳排放变化及其减排潜力。基于此, 本文先构建净碳排放测算模型测算中国沿海9个省级行政区2008~2020年海洋渔业碳排放量、碳汇量和净碳排放量, 借用ArcGIS研究时空分布变化, 再用Kaya-LMDI模型拆分净排放驱动因素, 最后运用系统动力学模型模拟2020~2030年五种发展场景的净排放情况, 以此给出减排对策。结果表明, 中国海洋渔业净碳排放量总体下降, 优化产业结构、扩大藻类养殖占比, 可以同时实现减排与增汇, 实现高效地减少碳排放。

关键词

海洋渔业, 净碳排放, 碳汇, Kaya-LMDI, 情景模拟

Calculation of Net Carbon Emissions in China's Marine Fisheries and Exploration of Emission Reduction Pathways

Lingna Guo

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: June 22, 2026; accepted: July 29, 2026; published: August 28, 2026

Abstract

Excessive carbon emissions can cause irreversible damage to the human living environment; therefore, reducing carbon emissions has become an urgent issue that needs to be addressed. Marine fisheries can increase carbon emissions through marine fishing and aquaculture, while they can also

increase carbon sinks through biological carbon fixation. Therefore, scientifically assessing the carbon emissions and carbon sinks of marine fisheries, identifying and analyzing their influencing factors, and exploring feasible emission reduction pathways can help provide a more comprehensive understanding of carbon emission changes and emission reduction potential in marine fisheries. Based on this, this paper first constructs a net carbon emission accounting model to measure the carbon emissions, carbon sinks, and net carbon emissions of marine fisheries in nine coastal provincial-level administrative regions of China from 2008 to 2020. ArcGIS is then used to analyze changes in their spatial and temporal distribution. Next, the Kaya-LMDI model is applied to decompose the driving factors of net emissions. Finally, a system dynamics model is used to simulate net emissions under five development scenarios from 2020 to 2030, and emission reduction countermeasures are proposed accordingly. The results show that the net carbon emissions of China's marine fisheries generally declined. Optimizing the industrial structure and increasing the proportion of algae aquaculture can achieve both emission reduction and carbon sink enhancement, thereby reducing carbon emissions more effectively.

Keywords

Marine Fisheries, Net Carbon Emissions, Carbon Sink, Kaya-LMDI, Scenario Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变化不断加重,碳排放治理也成为各国都需要面对的重要问题,过量的碳排放会带来海洋酸化、全球变暖以及极端天气增多等情况,同时还会对生态系统稳定和人类健康产生长期影响[1]。我国提出 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和以后,减少排放和增加碳汇至关重要,海洋生态系统本身具有较强的储碳能力,海洋渔业一方面可以依靠贝类、藻类等生物生产活动形成可移出的碳汇,另一方面也会因为捕捞活动、养殖设备运行以及燃油消耗产生一定碳排放,所以,从净碳排放角度来评价海洋渔业低碳发展水平,具有一定的现实意义[2][3]。

已有研究认为,在碳汇研究方面,藻类和滤食性贝类通常被认为具有较强的固碳能力,其中大型海藻可以通过生长吸收海水中的碳,贝类养殖则主要通过贝壳固碳、有机碳沉降等方式参与碳汇形成[4]。在碳汇测算方面,物质量评估法、营养级计量法和综合核算法等方法被较多使用,这些方法为渔业碳汇估算提供了参考,但部分方法对贝类软体组织的固碳作用估计可能偏高,同时对贝类、藻类生长过程中释放的颗粒有机碳(POC)和溶解有机碳(DOC)考虑不足,因此可能导致碳汇测算结果与实际情况存在一定偏差[5]。关于海洋渔业碳排放的研究,主要集中在捕捞燃油消耗、时空分布与变化、低碳发展的路径以及影响因素分析等方面,常用的方法有系统动力学、投入产出分析、SBM 模型、LMDI 分解、STIRPAT 模型,还有 GM、ARIMA 预测模型等[6]-[10],这些研究说明,海洋渔业碳排放不仅与能源消耗有关,也受到产业规模、生产方式、技术水平和经济发展等因素的影响,为分析海洋渔业减排问题提供了方法和思路。

从整体上看,已有研究已经分别从碳汇和碳排放两个方面取得了较多成果,但仍然存在一些不足,第一,关于净碳排放的综合研究还不够多,难以完整反映海洋渔业减排和增汇的实际综合效果;第二,一些碳汇模型对 POC、DOC 以及有效碳汇边界的考虑还不够充分,可能影响碳汇估算的准确性;第三,研究未来不同情景下净碳排放变化趋势和减排路径的模拟研究仍需要进一步加强。

基于这些问题, 本文在考虑 POC 和 DOC 的基础上结合物质质量评估法估算 2008~2020 年我国 9 个沿海省级行政区的可移出碳汇, 以海洋机动渔船在生产过程中的燃料消耗视为海洋渔业碳排放主要来源, 利用海洋渔业能源消耗方法测算出 9 个沿海省域和全国的渔业碳排放量, 并详细分析各个省份的净碳排放情况, 并利用 ArcGIS 将中国碳排放的时空变化可视化, 另外为了更快实现碳中和, 在以经济发展为中心的背景下, 需要人为干预制定和实施减排政策, 这要求我们必须对海洋渔业碳排放的影响因素和发展趋势进行分析, 提出合理建议和对策, 推动实现可持续发展。

2. 数据来源和研究方法

2.1. 数据口径与范围

本文选取河北、辽宁、江苏、浙江、福建、山东、广东、广西和海南 9 个沿海省级行政区作为研究对象, 研究时间为 2008~2020 年, 本文所用数据主要来自《中国渔业统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国海洋统计年鉴》《中国海洋经济统计公报》以及相关省份统计资料。

2.2. 碳汇测算方法

本文把海水养殖贝类和藻类作为海洋渔业碳汇的主要来源, 贝类碳汇主要考虑贝壳固碳, 以及贝类在生长过程中排泄物、粪便等形成的 POC 碳汇, 软体组织中主要来自海水有机碳的部分, 则不计入有效碳汇[11][12]。藻类碳汇主要包括藻体通过光合作用固定的碳, 以及藻类在生长过程中释放的 POC 和 DOC 所形成的碳汇[13][14], 最后将贝类碳汇和藻类碳汇相加, 得到海洋渔业总碳汇量。

2.2.1. 贝类碳汇测算

根据贝类碳收支方程, 贝类总摄食碳(TC) = 排粪碳(FC) + 排泄碳(EC) + 呼吸碳(RC) + 生长碳(GC), 研究发现排粪碳和排泄碳共占贝类摄食总碳的 25%, 生长碳则占 25%左右[15]。依据 $FC + EC$ 和 GC 的比值约为 1, 可推算出贝类生长过程中释放的 POC。

$$TC_B = \sum_{i=1}^n (C_i^K + C_i^{POC}) \quad (1)$$

$$C_i^K = P_i^S \times R_i^K \times \omega_i^K \times (1 - \varepsilon_i) \quad (2)$$

$$C_i^R = P_i^S \times R_i^R \times \omega_i^R \quad (3)$$

$$C_i^{POC} = \left(\frac{C_i^K}{1 - \varepsilon_i} + C_i^R \right) \times \frac{FC + EC}{GC} \times \eta^{POC} \quad (4)$$

其中, TC_B 为海洋贝类固定的总碳, i 为第 i 种贝类, 共 n 种, C_i^K 、 C_i^R 分别为第 i 种贝类的贝壳和软体组织的碳汇, C_i^{POC} 为第 i 种贝类生长发育过程中释放的 POC 产生的碳汇, P_i^S 、 R_i^K 、 ω_i^K 、 $(1 - \varepsilon_i)$ 、 ε_i 分别为第 i 种贝类由贝类产量(湿重)、贝壳干重比、壳碳含量、贝壳碳源折算系数和贝壳中来源为有机碳或海洋沉积物的碳占总贝壳碳的比例, R_i^R 、 ω_i^R 分别为第 i 种贝壳干重比、壳碳含量, η^{POC} 为 POC 碳汇折算系数, 反映了从 POC 到碳汇的转化率。参数设定引用岳东东等[16]。

2.2.2. 藻类碳汇测算

海水养殖藻类碳汇包括藻体光合作用固定的碳、藻体生长发育过程中释放的 POC 和 DOC 形成的碳汇这 3 个部分。

$$TC_Z = \sum_{j=1}^m (C_j^G + C_j^{POC} + C_j^{DOC}) \quad (5)$$

$$C_j^G = P_j \times \omega_j \tag{6}$$

$$C_j^{POC} = C_j^G \times \frac{\alpha}{1-\alpha-\beta} \times \eta^{POC} \tag{7}$$

$$C_j^{DOC} = C_j^G \times \frac{\beta}{1-\alpha-\beta} \times \eta^{DOC} \tag{8}$$

其中， TC_z 为海洋藻类固定的总碳， j 为第 j 种贝类，共 m 种， C_j^G 、 C_j^{DOC} 、 C_j^{POC} 分别为第 j 种藻类光合作用 c 种贝类产生的碳汇、生长发育过程中释放的 DOC 、 POC 产生的碳汇， P_j 、 ω_j 分别为第 j 种藻类的产量(干重)、碳含量， α 、 β 分别为第 j 种藻体生长过程中释放 POC 、 DOC 占大型海藻光合生产力的比重， η^{DOC} 、 η^{POC} 分别为 DOC 、 POC 碳汇折算系数，反映了从 DOC 、 POC 到碳汇的转化比率。参数设定引用赵鹏等[12]。

2.2.3. 海洋渔业碳汇总量

由上述可知，海洋渔业总碳汇主要来源是贝类和藻类，因此总碳汇测算模型如下：

$$TC = TC_B + TC_z \tag{9}$$

2.3. 碳排放与净碳排放测算方法

2.3.1. 海洋渔业碳排放量

海洋渔业碳排放主要来源于海洋捕捞和海水养殖环节中的燃油消耗。本文依据不同作业类型渔船总功率、补助用油系数以及养殖设备能耗转换系数估算燃油消耗量，再根据柴油低位发热量和 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放因子计算温室气体排放，并按照全球增温潜势统一折算为 CO_2 排放量。净碳排放量按照“碳排放量减去碳汇量”计算，用以衡量海洋渔业综合碳收支状态。

本文借鉴岳冬冬等[17]对我国海洋渔业温室气体排放量的计算方法，碳排放的估算思路如下：

第一步，海洋捕捞渔船和养殖设备燃油消耗量测算，按照不同的作业类型进行分类，根据统计年鉴里海洋捕捞渔船总功率与对应作业下的补助用油系数乘积之和估算其燃油消耗量。

$$Q_{oil1} = \sum_{i=1}^6 k_i \times p_i \tag{10}$$

$$Q_{oil2} = \sum_{j=1}^2 S \times \lambda_j \tag{11}$$

$$Q_{oil} = Q_{oil1} + Q_{oil2} \tag{12}$$

其中， Q_{oil} 为总燃油耗油量， Q_{oil1} 为海洋捕捞渔船燃油消耗量， k_i 、 p_i 分别为第 i 种类型作业渔船的补助用油系数和渔船总功率， Q_{oil2} 为养殖设备燃油消耗， S 为海水养殖池塘面积， λ_j 为海水养殖池塘能源消耗第 j 类设备(增氧和水泵)的能源消耗转换系数，分别为 0.332 t/kw、0.410 t/kw，参数如表 1，来源于农业农村部发布的《国内机动渔船油价补助用油量测算参考标准》。

Table 1. Fuel subsidy coefficients of marine fishing vessels
表 1. 海洋捕捞渔船补助用油系数

指标	拖网	围网	刺网	张网	钓具	其他
系数(t/kw)	0.480	0.492	0.451	0.328	0.328	0.312

第二步, 将燃油消耗量转换成 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 这 3 种主要温室气体的排放量。

$$Q_{gas} = \sum_{i=1}^3 Q_{oil} \times \varepsilon_i \times c \quad (13)$$

其中, Q_{gas} 为温室气体的排放量, ε_i 为第 i 种气体的排放因子, 它是量化每单位活动的不同温室气体排放量的系数, CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放因子分别为 74,100 kg/TJ、3.9 kg/TJ、3.9 kg/TJ, c 为柴油平均低位发热量数值, 是 42,652 kJ/kg [17]。

第三步, 将以上 3 种温室气体统一转化为 CO_2 , 计算 CO_2 排放量。

$$Q_{co_2} = \sum_{i=1}^3 Q_{oil} \times \varepsilon_i \times \eta_i \times c \quad (14)$$

其中, Q_{co_2} 是 CO_2 排放量, η_i 是第 i 种气体的增温潜势, CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的增温潜势分别为 1、23、296。

通过以上 3 步, 可以计算出每年的海洋捕捞过程中释放的 CO_2 量。

2.3.2. 海洋渔业净碳排放量

根据以上的假设和机理, 可以推演出海洋渔业净碳排放量的计算公式。

$$C_{net} = Q_{co_2} - TC \quad (15)$$

2.4. Kaya-LMDI 因素分解模型

为识别净碳排放变化的驱动因素, 本文借鉴 Kaya 恒等式和 LMDI 分解方法, Kaya [18] 提出 Kaya 恒等式, 从碳排放因子、经济水平、能源利用和人口要素这四个方面研究碳排放, 随后不同的学者结合渔业经济将 Kaya 恒等式扩展, 应用到海洋渔业领域, 公式如下:

$$C_{net} = \frac{C_{net}}{G} \times \frac{G}{Q} \times \frac{Q}{P} \times P = C_{ceff} \times C_{eff} \times C_{esca} \times C_{psca} \quad (16)$$

其中, C_{net} 为净碳排放量, G 为渔业经济产值, Q 为渔业产量, P 为渔业就业人口数量, C_{ceff} 为碳排放强度, C_{eff} 为能源程度, C_{esca} 为渔业经济规模, C_{psca} 为就业规模。

随后采用 Ang 等人 [19] 提出的对数平均权重分解方法(LMDI)和附加模型对海洋水产养殖净碳排放的影响因素进行分解, 公式如下:

$$\Delta C_{net} = C_{net}^{t+1} - C_{net}^t = \Delta C_{ceff} + \Delta C_{eff} + \Delta C_{esca} + \Delta C_{psca} \quad (17)$$

其中, ΔC_{net} 为总效应, ΔC_{ceff} 为碳排放强度效应, ΔC_{eff} 为能源程度效应, ΔC_{esca} 为渔业经济规模效应, ΔC_{psca} 为就业规模效应, t 是指年份。

$$\Delta C_X = L\left(C_N^{t+1}, C_N^t\right) \times \ln\left(\frac{C_X^{t+1}}{C_X^t}\right) \quad (18)$$

其中, ΔC_X 指代第 X 种效应, 包括总效应、碳排放强度效应、能源程度效应、渔业经济规模效应和就业规模效应。

2.5. 系统动力学情景模拟方法

本文利用 Vensim 构建系统动力学模型如图 1, 将海洋渔业经济、从业人口、产业结构、能源消耗、碳排放和碳汇纳入同一反馈系统[20], 并设置现状发展、经济发展、调整就业、调整产业结构和调整养殖比例五种情景, 对 2020~2030 年中国海洋渔业净碳排放趋势进行模拟比较[21]-[24]。

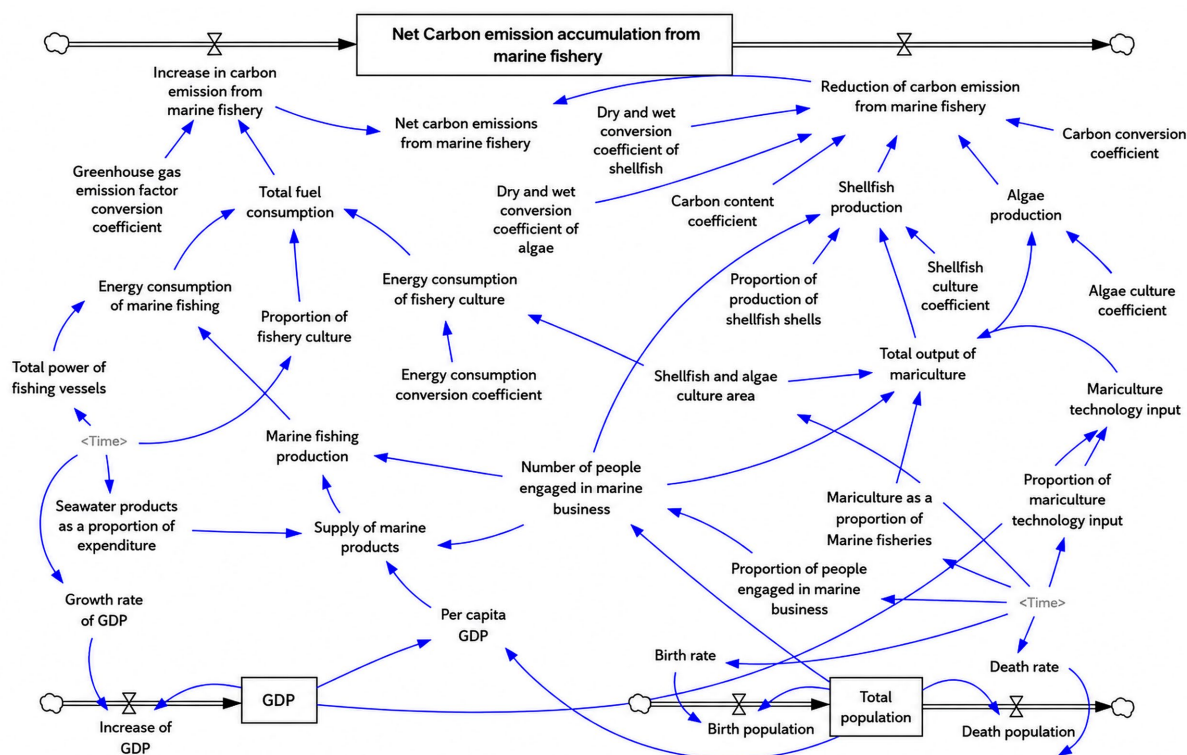


Figure 1. Structure diagram of the system dynamics model for net carbon emissions in marine fisheries

图 1. 海洋渔业净碳排放系统动力学模型结构图

3. 研究结果分析

3.1. 中国整体视角下时空演化特征

2008-2020年全国总净碳排放

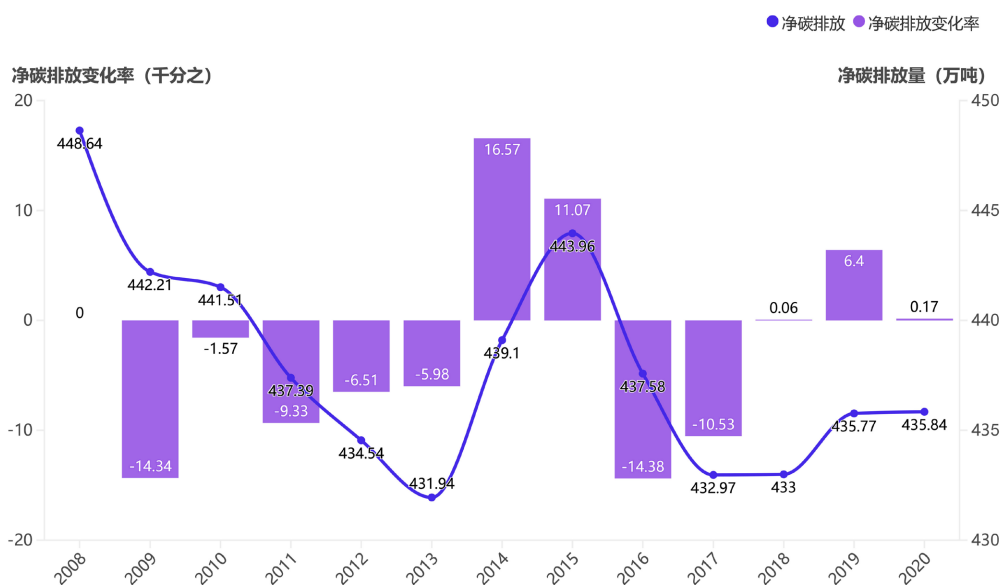


Figure 2. Net carbon emissions and change rates of China's marine fisheries from 2008 to 2020

图 2. 2008~2020 年中国海洋渔业净碳排放量及变化率

将统计年鉴的数据代入上述 3 个模型进行测算，得出 2008~2020 年中国整体的碳排放量、碳汇量和净碳排放量，如图 2，净碳排放量由 2008 年的 448.63 万吨降低至 2020 年的 435.84 万吨，净碳排放量降低 2.85%，共降低 12.80 万吨，这说明 2008~2020 年中国渔业在减排方面有所成效。净碳排放量先下降，在 2014 年回升，2015 年达到最大值，接着净碳排放量下降，2016 年，机动渔船数量减少并要求绿色发展，这减缓了碳排放的加剧，碳排放量缓慢增加，碳汇迅速增加，净碳排放量呈现降低趋势。

本文利用 ArcGIS 对空间分布重心和标准差椭圆进行绘制后在表 2 可以看出，在研究期内，海洋渔业碳排放、碳汇和净碳排放的空间分布格局都发生了一定变化，碳汇重心整体向东南方向移动，标准差椭圆面积扩大，扁率也有所上升，这说明碳汇覆盖范围有所扩展，东南沿海省份在碳汇方面的贡献有所增加，这种变化与福建等地区贝类、藻类养殖发展较好有一定关系；碳排放重心主要向东北方向移动，椭圆长轴扩大，短轴缩小，面积有所减小，说明碳排放的空间分布逐渐趋于集中，并且慢慢向浙江等排放增长较快的地区靠近；净碳排放重心则整体向西南方向移动，说明南方省份净碳排放变化更加明显，其中广东、广西等地区的变化幅度相对较大。

Table 2. Table of gravity center shifts
表 2. 重心转移数据表

类型	年份	经纬度	大致位置
碳汇重心	2008	(119.65°E, 34.55°N)	江苏北部沿海附近
	2014	(120.25°E, 33.10°N)	江苏中部沿海附近
	2020	(121.05°E, 31.85°N)	长江口/江苏南部沿海附近
碳排放重心	2008	(120.35°E, 29.45°N)	浙江中部偏西
	2014	(121.20°E, 30.20°N)	浙江东北部附近
	2020	(122.00°E, 30.80°N)	浙江东北沿海/近海方向
净碳排放重心	2008	(121.35°E, 30.65°N)	浙江北部沿海附近
	2014	(121.85°E, 30.35°N)	浙江东北近海方向
	2020	(120.30°E, 28.05°N)	浙江南部/福建北部沿海附近

由图 3 可知，广东省、广西壮族自治区、河北省、辽宁省和浙江省的净碳排放量降低，广东省的净碳排放量降低最多，其次是广西壮族自治区，这说明这两个省级行政区发展的海洋渔业是环保的，是健康低碳的，然而还有一些省份的净碳排放量有所增高，其中包括：福建省、海南省、江苏省和山东省，其中海南省的净碳排放量增加最多，其次是江苏省，这说明这些地区的海洋渔业还是破坏环境的，渔业排放量增量大于碳汇增量，因此需要加大产业升级，大力投入科技创新，减少高耗能作业，淘汰旧设备等，实现低碳发展。

海南省海洋渔业产业化水平不高，渔业生产的各个环节未能实现有效衔接，海南省海洋科技力量薄弱，科研机构分散，这些因素影响了海南省综合优势的影响。江苏省作为海洋渔业资源大省，但科技成果转化效率较低，碳汇增加量无法抵抗碳排放量增量。因此，净碳排放量增加。

广东省能够实现净碳排放量的降低，依赖于其拥有雄厚的海洋高等院校和科研机构，拥有丰富的海洋人才资源，为海洋渔业科技发展奠定了良好的基础。在海洋渔业养殖和渔业领域，广东省的科技成果产生了良好的经济效益和社会效益。辽宁省增幅最大，是因为辽宁省贝类和藻类养殖业发展良好，可以形成过剩的碳汇来吸收大气中的 CO₂。然而，中国不能单靠广东省和辽宁省来实现碳中和的目标。其他省份需要有效利用海洋生态系统吸收 CO₂，实现海洋的长期碳储存。

2008-2020年各省净碳排放量

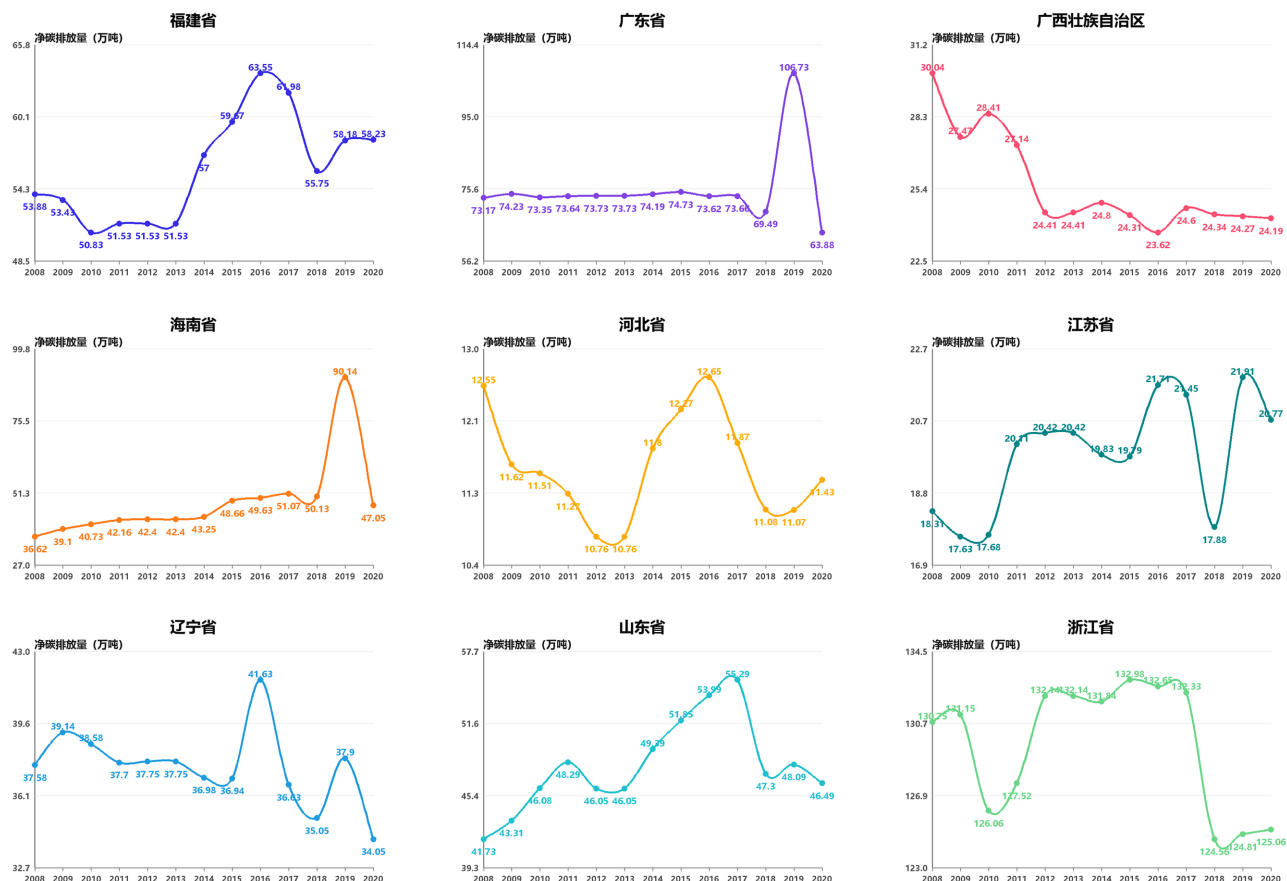


Figure 3. Net carbon emissions of marine fisheries in coastal provincial-level administrative regions from 2008 to 2020

图 3. 2008~2020 年沿海省级行政区海洋渔业净碳排放

3.2. 碳排放因素分解模型结果

本文以 2008 年作为基准年，利用 LMDI 模型对 2008~2020 年中国海洋渔业净碳排放的变化情况进行分解，由表 3、图 4 结果可以看出，能源程度效应和碳排放效应是推动净碳排放下降的重要因素；而渔业经济规模效应和就业规模效应是促使净碳排放增加的主要原因。综合来看，总效应呈现负向拉动，也就是说减排因素的影响总体上大于增排因素的影响，总体呈现减排的趋势。

其中，碳排放效应整体为负拉动，说明随着节能减排技术的应用、渔船更新以及生产效率提升，海洋渔业对高排放生产方式的依赖在逐步减少；能源程度效应也表现出比较明显的负向作用，这说明经济发展对能源消耗的依赖有所减弱，能源利用效率的改善，也在降低海洋渔业净排放量的过程中发挥了关键作用。

与此相对，渔业经济规模效应是最主要的正向驱动因素，这是因为渔业经济增长通常伴随捕捞、养殖和运输等生产活动扩张的行为，这些过程会带来能源消耗和碳排放增加。结果显示，就业规模效应也对净碳排放具有一定正向作用，说明一味扩大渔业行业的从业人员数量并不利于低碳的发展。

因此，未来应在保持渔业经济稳定发展的同时，需要更加重视技术效率提升、能源结构优化和产业结构调整，以削弱规模扩张带来的增排压力。

Table 3. Driving effects of net carbon emissions based on the LMDI model
表 3. LMDI 模型净碳排放驱动效应

年份	碳排放效应		能源程度效应		渔业经济规模效应		就业规模效应		总效应	
	年效应	累计效应	年效应	累计效应	年效应	累计效应	年效应	累计效应	年效应	累计效应
2008	-0.539	-0.539	-29.691	-29.691	21.21	21.21	11.21	11.21	-5.34	-5.34
2009	1.845	1.306	-20.565	-50.256	7.63	28.84	1.25	12.46	-1.39	-6.73
2010	-4.845	-3.539	-4.655	-54.911	6.59	35.43	1.87	14.33	-4.5	-11.23
2011	-5.354	-8.893	-4.806	-59.717	2.16	37.59	7.1	21.43	-0.75	-11.98
2012	3.092	-5.801	-9.482	-69.199	3.97	41.56	4.02	25.45	-4.03	-16.01
2013	-4.395	-10.196	-6.765	-75.964	3.83	45.39	1.7	27.15	1.41	-14.6
2014	-4.321	-14.517	-11.149	-87.113	8.35	53.74	-1.39	25.76	1.02	-13.58
2015	-4.951	-19.468	-19.469	-106.582	9.86	63.6	-1.22	24.54	2.74	-10.84
2016	-4.359	-23.827	-3.851	-110.433	8.52	72.12	-1.13	23.41	-6.04	-16.88
2017	-12.598	-36.425	18.238	-92.195	-10.52	61.6	0.5	23.91	-10.21	-27.09
2018	-8.854	-45.279	-2.696	-94.891	1.43	63.03	-0.84	23.07	-3.45	-30.54
2019	-10.354	-55.633	5.224	-89.667	4.59	67.62	-2.1	20.97	-5.53	-36.07
2020	-2.563	-58.196	-2.427	-92.094	4.99	72.61	-3.11	17.86	4.45	-31.62

LMDI模型分析净碳排放各因素累计效应

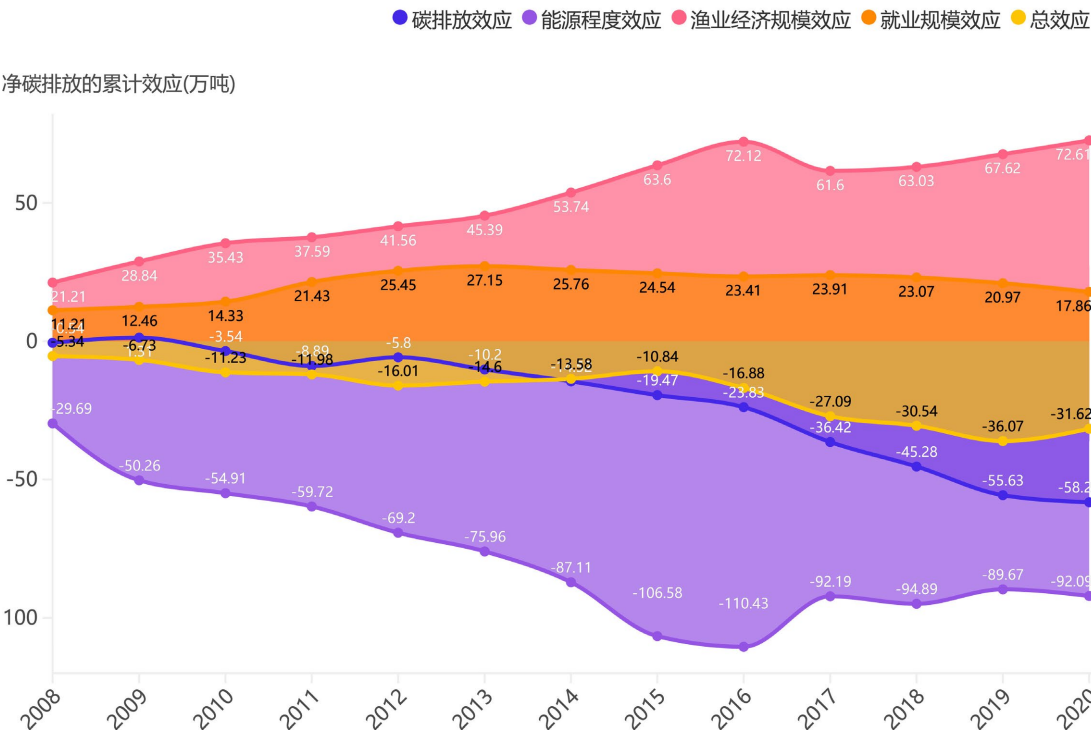


Figure 4. Cumulative effects of factors based on the LMDI model
图 4. LMDI 模型各因素累计效应

3.3. 系统动力学模型检验

稳定性检验，Vensim 自带的模型检验系统选择模型运行成功，证明模型中的各种方程无误。

历史检验，该检验是针对非外生变量进行比较，是将仿真结果和真实记录统计得到的历史数据进行对比分析，计算误差率，为了减少误差和偶然性，本文选择了 GDP、贝类产量、渔业燃油消耗和海洋渔业就业人口数，利用 SPSS pro 将预测值和统计真实值进行回归，进行误差检验， R^2 分别为 0.964、0.994、0.961、0.945，结果显示预测值和真实值存在的偏差小，模型有效。

3.4. 情景描述

为进一步分析 2020~2030 年中国海洋渔业净碳排放的趋势，本文结合 LMDI 分解结果和已有相关研究，设置了五种模拟情景，如表 4。

Table 4. Scenario design for simulation
表 4. 模拟情景设计

情景	变量	调整方向
现状发展情景	无	各项变量按照 2008~2020 年的变化趋势继续发展
经济发展情景	GDP 增长率	增加 GDP 增长率
就业调整情景	海洋渔业就业系数	降低海洋渔业就业系数
产业结构调整情景	捕捞业、海水养殖业的能源消耗比例	提高海水养殖业的占比， 同时减少捕捞业中高耗能活动所占的比例
养殖比例调整情景	贝类、藻类养殖比例	提高藻类养殖的比例

3.5. 模拟结果分析

从模拟结果来看，见图 5、图 6，整体效果调整产业结构情景减排效果最优，其次是调整养殖比例情景、调整就业情景、现状发展情景，最后是经济发展情景。

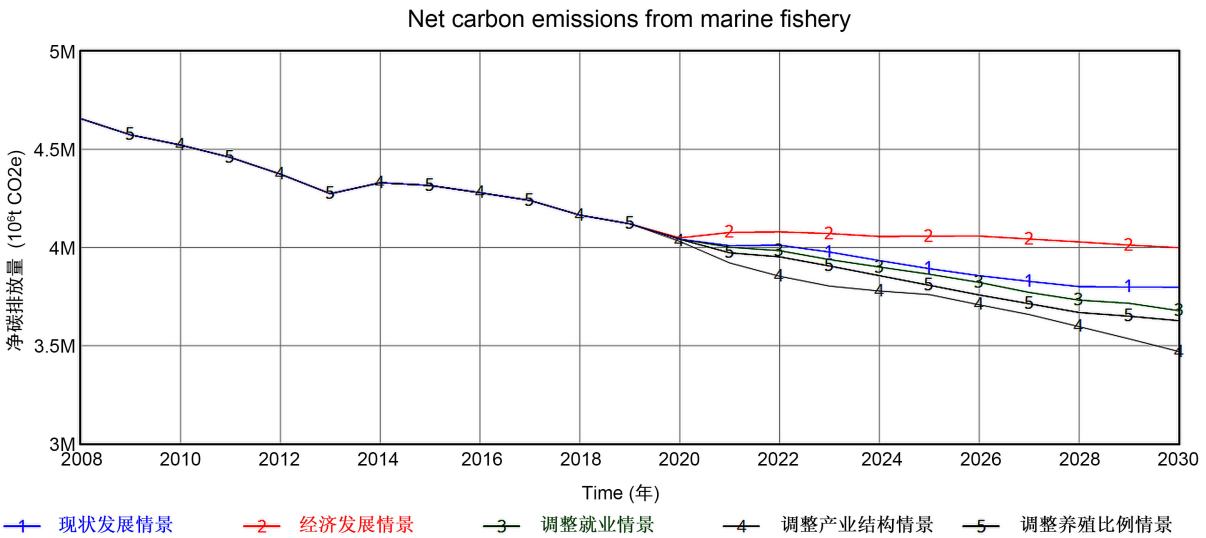


Figure 5. Vensim scenario simulation results
图 5. Vensim 情景模拟结果

2021-2030年5种情景预测的净碳排放量变化率（千分之）

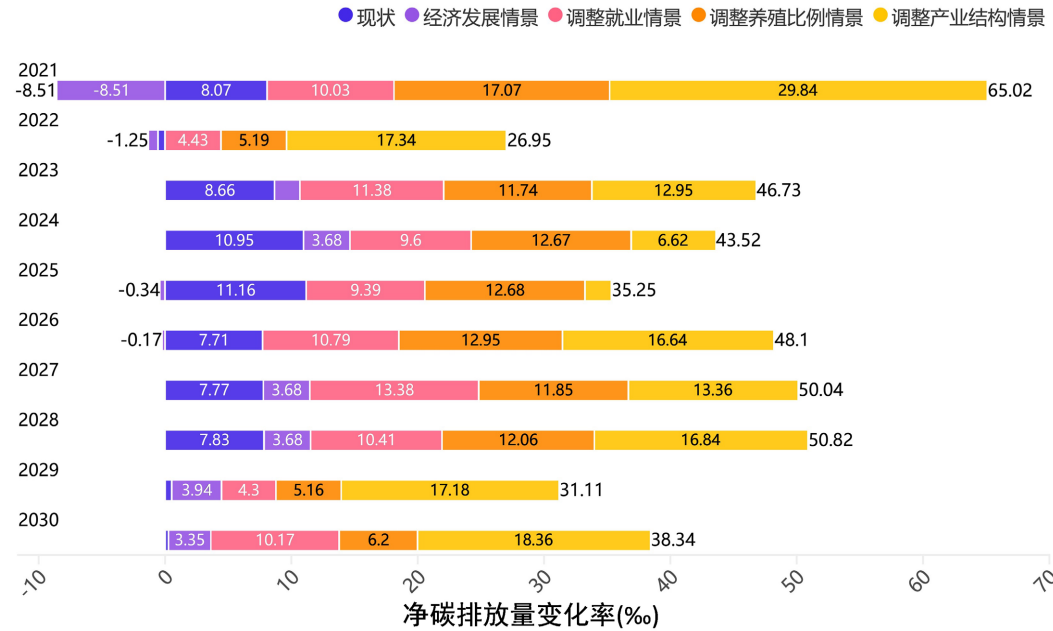


Figure 6. Change rates of net carbon emissions under five scenarios from 2020 to 2030
图 6. 2020~2030 年五种情景下净碳排放变化率

从具体结果来看，在产业结构调整情景下，净碳排放量降幅约为 14%，这说明减少高耗能捕捞活动所占比例、提高海水养殖比重是降低海洋渔业碳排放的重要方式；在养殖比例调整情景下，净碳排放量降幅约为 10%，说明提高藻类等碳汇能力较强养殖品种的比例可以增强海洋渔业的碳汇能力；在就业调整情景下，净碳排放量降幅约为 9%，说明适当控制从业人员规模和生产扩张速度，有利于减少后续可能增加的能源需求。而现状发展情景下的净碳排放量下降幅度相对较小，这说明海洋渔业要实现碳中和还需要采取更加主动的政策和措施；在经济发展情景下，减排效果最不明显，净碳排放量降幅大约为 1%，这也表明渔业经济规模扩大可能会抵消一部分减排效果。

所以，综合来看，未来海洋渔业减排应把产业结构调整作为重点，同时推进贝类、藻类养殖结构优化，并对就业规模进行合理控制。

4. 结论和建议

4.1. 结论

2008~2020 年，中国海洋渔业碳排放量增加了 7.66%，碳汇量增加了 41.32%，净碳排放量下降了 2.85%，从整体情况来看，碳排放量和碳汇量都在提高，但是碳汇的增量有抵消掉碳排放的增量，这说明海洋渔业在实际的减排取得了一些效果。

结合空间分布情况可以发现，海洋渔业碳排放、碳汇以及净碳排放的空间重心大多分布在江苏、浙江、福建三大沿海省份周边区域，且各个沿海省份在渔业自然资源条件、水产养殖总体规模、海洋捕捞产业结构等多个方面都存在较为显著的区域差异。

通过 Kaya-LMDI 影响因素分解模型可以得知，能源利用水平、碳排放相关效应是推动海洋渔业净碳排放量降低的两大核心因素，渔业经济发展规模、行业就业人员规模则是造成海洋渔业净碳排放量上升的主要因素。

情景的模拟分析结果同样可以证明, 优化渔业产业内部结构、调整水产养殖产业占比、管控渔业行业就业规模, 三种调控方式都可以起到较为突出的减排作用。

4.2. 讨论

本文的测算结果与已有研究在总体趋势上基本一致, 但碳汇核算范围、碳排放来源选择、参数设置以及数据完整程度会使得不同研究得到的具体结果仍有一定差异。

进一步与已有研究进行对照可以发现, 本文结果和相关研究在方向上较为接近, 但数值大小存在差别。本文测算得到, 2008~2020 年中国海洋渔业碳排放量增加 7.66%, 碳汇量增加 41.32%, 净碳排放量由 448.63 万吨下降到 435.84 万吨, 降幅为 2.85%; 这一变化说明, 碳汇增长在一定程度上抵消了碳排放增长。邵桂兰等[25]基于 LMDI 方法的研究同样认为, 渔业经济规模扩大容易推高碳排放, 而能源利用效率改善能够产生减排作用, 这与本文中渔业经济规模效应累计为 72.61、能源程度效应累计为-92.094 的结果基本一致。Kong 等[7]对中国沿海省份海洋渔业的研究也指出, 海洋渔业碳排放具有明显的区域差异, 浙江、江苏、福建等沿海省份在空间格局中作用较突出, 这与本文标准差椭圆和重心转移结果相互对应。Port 等[6]对巴西工业拖网渔业的研究则表明, 拖网等高能耗作业会带来较高的直接能源投入和温室气体排放; 本文采用的拖网作业用油系数为 0.480 t/kW, 明显高于其他作业类型中的 0.312~0.451 t/kW, 也说明高耗能捕捞方式是后续减排中需要重点调整的部分。造成不同研究数值差异的原因, 主要在于研究对象不同、排放边界不同、碳汇是否纳入贝壳固碳和 POC、DOC 过程不同, 以及部分研究只核算捕捞排放而没有同时考虑贝藻类碳汇。

本文也存在一些不足, 第一, 贝藻类吸收碳的换算数值、各类品种的筛选标准, 还有颗粒有机碳、溶解有机碳的转化水平等条件, 都有可能让测算数据产生偏差, 之后还需要更多实地实验收集到的数据作为研究支撑; 第二, 渔业活动产生的碳释放不单单产生于捕捞、水产养殖两个步骤, 采购原料、产品加工、货物运输、市场售卖整条产业链里都会出现碳排放, 现阶段这部分配套资料收集得不够全面; 第三, 系统动力学模拟手段虽然能够展现一部分数值变化走向, 可供设置的发展情景数量却比较少, 后续研究可以额外加入技术升级、碳市场交易、生态环境补偿、跨区域联合管控这类影响条件, 让模拟预测出来的数据能更好解释行业变化, 也能给相关政策制定提供更多参考依据。

4.3. 建议

根据系统动力学模拟结果, 产业结构调整情景的减排效果最好, 净碳排放降幅约为 14%, 因此后续政策应优先围绕捕捞和养殖之间的结构调整展开。在捕捞方面, 可以逐步压减少数高能耗作业方式的比重, 特别是对拖网、张网等单位功率耗油系数较高的作业加强总量控制, 并通过渔船更新、节能设备改造和碳税约束降低燃油消耗; 在养殖方面, 应把新增生产能力更多引导到海水养殖, 特别是能耗较低、碳汇作用较明显的贝类和藻类养殖中, 从而减少单纯依靠捕捞扩张带来的排放压力。

养殖比例调整情景的减排效果仅次于产业结构调整情景, 净碳排放降幅约为 10%, 说明在养殖内部继续优化品种结构也比较重要。各地可以结合海域条件, 适当提高藻类养殖在贝藻类养殖中的比例, 并保持贝类养殖的合理规模, 避免只追求养殖面积扩大而忽视生态承载能力; 对于福建、辽宁、山东等贝藻类养殖基础较好的地区, 可以优先建设藻类养殖示范区和生态补偿机制, 而对于净碳排放压力较大的地区, 则应把控制捕捞强度、提高贝藻类比例和限制高耗能养殖设备使用结合起来推进。

就业调整情景下净碳排放降幅约为 9%, 说明就业规模和生产扩张速度也会影响能源需求。因此, 相关部门不宜简单通过扩大从业人数和扩大生产规模来推动渔业增长, 而应更多依靠技术培训、设备更新和生产效率提升来稳定渔业产出; 同时, 可以把净碳排放强度、单位功率燃油消耗、贝藻类养殖占比等指标纳入地方渔业管理考核, 使政策措施与模型结果之间形成更直接的对应关系。

参考文献

- [1] Sahle, M., Saito, O., Fürst, C. and Yeshtela, K. (2018) Quantification and Mapping of the Supply of and Demand for Carbon Storage and Sequestration Service in Woody Biomass and Soil to Mitigate Climate Change in the Socio-Ecological Environment. *Science of The Total Environment*, **624**, 342-354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.033>
- [2] Yang, L., Hao, X., Shen, C. and An, D. (2022) Assessment of Carbon Sink Capacity and Potential of Marine Fisheries in China under the Carbon Neutrality Target. *Resources Science*, **44**, 716-729. <https://doi.org/10.18402/resci.2022.04.06>
- [3] Ren, W.H. (2021) Study on the Removable Carbon Sink Estimation and Decomposition of Influencing Factors of Mariculture Shellfish and Algae in China—A Two-Dimensional Perspective Based on Scale and Structure. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 21528-21539. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11997-1>
- [4] Alonso, A.A., Álvarez-Salgado, X.A. and Antelo, L.T. (2021) Assessing the Impact of Bivalve Aquaculture on the Carbon Circular Economy. *Journal of Cleaner Production*, **279**, Article ID: 123873. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123873>
- [5] Lavery, T.J., Roudnew, B., Gill, P., Seymour, J., Seuront, L., Johnson, G., *et al.* (2010) Iron Defecation by Sperm Whales Stimulates Carbon Export in the Southern Ocean. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **277**, 3527-3531. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.0863>
- [6] Port, D., Perez, J.A.A. and de Menezes, J.T. (2016) Energy Direct Inputs and Greenhouse Gas Emissions of the Main Industrial Trawl Fishery of Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, **107**, 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.062>
- [7] Kong, F., Cui, W. and Xi, H. (2021) Spatial-Temporal Variation, Decoupling Effects and Prediction of Marine Fishery Based on Modified Ecological Footprint Model: Case Study of 11 Coastal Provinces in China. *Ecological Indicators*, **132**, Article ID: 108271. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108271>
- [8] 渠慎宁, 郭朝先. 基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰值预测研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12): 10-15.
- [9] 邵桂兰, 孙婧. 我国海洋渔业经济低碳化战略研究[J]. 东岳论丛, 2013, 34(11): 104-107.
- [10] Sui, J.J., Zhang, J.H., Ren, S.J. and Lin, F. (2019) Organic Carbon in the Surface Sediments from the Intensive Mariculture Zone of Sanggou Bay: Distribution, Seasonal Variations and Sources. *Journal of Ocean University of China*, **18**, 985-996. <https://doi.org/10.1007/s11802-019-3768-y>
- [11] 权伟, 应苗苗, 周庆瀚, 等. 基于稳定碳同位素技术的养殖贝类碳源分析[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(2): 175-180.
- [12] 郑鹏, 赵丽男, 刘永权, 等. 海洋碳汇渔业低碳绩效测度与时空差异性分析[J]. 海洋环境科学, 2024, 43(1): 57-63, 73.
- [13] 何苗, 周凯, 么宗利, 等. 饵料浓度、温度对缢蛏能量代谢的影响[J]. 海洋学报, 2017, 39(8): 129-135.
- [14] 岳冬冬, 王鲁民. 基于直接碳汇核算的长三角地区海水贝类养殖发展分析[J]. 山东农业科学, 2012(8): 133-136.
- [15] 杨林, 等. 碳中和目标下中国海洋渔业碳汇能力与潜力评估[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 716-729.
- [16] 岳冬冬, 王鲁民, 王茜, 等. 我国海洋捕捞渔业温室气体排放量估算与效率分析[J]. 山西农业科学, 2013(8): 873-876.
- [17] 岳冬冬, 王鲁民, 方海, 等. 基于碳平衡的中国海洋渔业产业发展对策探析[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(4): 1-8.
- [18] Kaya, Y. (1989) Impact of Carbon Dioxide Emission on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios. IPCC.
- [19] Ang, B., Zhang, F. and Choi, K. (1998) Factorizing Changes in Energy and Environmental Indicators through Decomposition. *Energy*, **23**, 489-495. [https://doi.org/10.1016/s0360-5442\(98\)00016-4](https://doi.org/10.1016/s0360-5442(98)00016-4)
- [20] Liu, G., Xu, Y., Ge, W., Yang, X., Su, X., Shen, B., *et al.* (2023) How Can Marine Fishery Enable Low Carbon Development in China? Based on System Dynamics Simulation Analysis. *Ocean & Coastal Management*, **231**, Article ID: 106382. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106382>
- [21] 田鹏, 等. 中国海洋渔业碳排放时空变化特征及系统动态模拟[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 1074-1090.
- [22] 李源, 李田慧, 梁金水, 等. 辽宁省海洋渔业碳收支及驱动因素分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2): 253-264.
- [23] 马光辉, 张迎春, 姚芳斌. 中国渔业经济碳排放驱动因素研究——基于 LMDI 和脱钩模型的双视角分析[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2022, 35(1): 117-123.
- [24] 刘爽. 基于系统动力学的内蒙古碳排放情景预测研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
- [25] 邵桂兰, 孔海峥, 于谨凯, 等. 基于 LMDI 法的我国海洋渔业碳排放驱动因素分解研究[J]. 农业技术经济, 2015(6): 119-128.