

DOI: 10.11964/jfc.20231114242

中国淡水养殖业碳排放与经济增长脱钩关系及驱动因素研究——基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型

伍大清^{1,2*}, 刘丽晨^{1,2}

1. 上海海洋大学经济管理学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学, 中国渔业发展战略研究中心, 上海 201306

通信作者: 伍大清, 教授, 博导, 从事水产养殖发展潜力评估和大数据智能决策研究, E-mail: dqwu@shou.edu.cn

摘要:

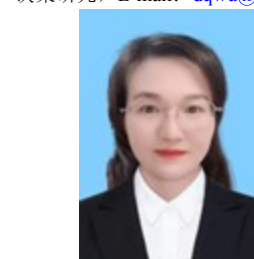
【目的】在淡水养殖绿色可持续发展的要求下, 为促进淡水养殖业碳排放与经济增长的绝对脱钩, 实现淡水养殖业低碳绿色转型。

【方法】基于脱钩模型和 LMDI 分解模型, 分别从中国整体层面及区域层面对 2011—2021 年淡水养殖碳排放与经济增长的脱钩指数进行核算并探究其脱钩状态的驱动因素。

【结果】①从宏观层面上, 研究期间我国淡水养殖碳排放呈现先增再减后增的态势; 全国淡水养殖碳排放与经济增长的耦合状态较稳定。②从区域层面看, 耦合关系分为稳定型、改善型、衰退型、无序型, 各省级行政区差异显著。③从影响因素来看, 生产效率和劳动力强度对淡水养殖碳减排有促进作用; 经济发展强度和产业结构会增加碳排放。

【结论】各省级行政区之间淡水养殖碳排放与经济增长的耦合关系发展不平衡, 提高生产效率和劳动力强度有助于改善其耦合关系。应从政府部门、科研人员、从业人员等多途径出发, 助力淡水养殖碳减排以及经济增长, 加快推动产业转型, 促进渔业现代化发展, 为实现“双碳”目标作出贡献。

关键词: 淡水养殖业; 碳排放; 经济增长; Tapio 脱钩; LMDI 模型



资助项目: 国家社科重大项目子课题, 气候变化下“深蓝渔业”产业发展潜力评估研究(21 & ZD100); 国家现代农业产业技术体系专项 (CARS-47-G29); 上海哲学社会科学规划课题“新零售模式下生鲜电商O2O决策优化研究”(2020EGL011)

收稿日期: 2023-11-23

修回日期: 2024-03-15

文章编号:

1000-0615(2025)05-059618-13

中图分类号: F 326.4; S 965; X 714

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)

全球变暖、海平面上升、物种濒临灭绝、缺氧等一系列连锁反应导致生态系统遭受严重破坏, 人类及生物的生存面临重大挑战, 因此全球碳减排任务已势在必行、迫在眉睫。为此, 我国于 2020 年表明了坚定决心和态度, 主动提出争取在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前达到碳中和。淡水养殖业经济持续增长且占渔业经济乃至中国整体经济的比重逐渐增大, 成为碳排放的重要产业, 因而淡水养殖业也理应为响应我国“双碳”目标作出贡献。如何完成淡水养殖低碳转型升级, 如何促进我国“双碳”目标的实现, 如何实现我国淡水养殖生态经济系统协调、绿色健康、可持续发展, 是我国淡水养殖业需要解决的重要议题。明晰淡水养殖业碳排放和经济增长之间的耦合关系, 厘清碳排放变化的驱动因素, 能够为制定淡水养殖业碳减排政策提供依据和参考, 这对促进淡水养殖业生态经济协调发展、应对碳排放增长变化有重要的实践意义, 有利于共同推动中国“双碳”目标的实现。



在全球倡导碳减排、尽早实现碳达峰、碳中和的背景下, 碳排放与经济增长之间的关系、碳排放变化的驱动因素成为了国内外各行业研究的热点, 国内对碳排放的研究内容主要聚焦以下三个方面: ①碳排放效率。张永年^[1]借助 Super-SBM (Slacks-Based Measure) 模型测算中国地级市的碳排放效率, 运用 Dagum 基尼系数法分解碳排放效率的差异性, 并通过收敛模型分析其空间收敛性。李晓梅等^[2]基于超效率 DEA-ML 模型对中国物流碳排放效率进行测算, 并探讨其时空演化特征及收敛性分析。吴静颖^[3]基于 SBM 模型测算淡水养殖碳排放效率并对其时空特征进行分析, 认为技术效率的提高有利于提升碳排放效率。曾冰^[4]运用超效率 SBM 模型和 ESDA (Exploratory Spatial Data Analysis) 方法对长江经济带城市渔业经济碳排放效率的时空演变进行了研究, 指出其碳排放效率呈现从下游向上游递减的态势。②碳排放与经济增长的脱钩关系。Fiorito^[5]、Yang 等^[6]、Chen 等^[7]研究了全球多国家多区域的碳排放与经济增长之间的脱钩关系。国内学者从宏观、区域、省市、产业等视角对此展开丰富的研究, 郑凌霄等^[8]、王安静等^[9]从全国宏观层面构建脱钩模型测算我国碳排放与经济增长之间的脱钩弹性指数, 指出通过优化产业结构、提升技术水平、大力发展新能源等措施来降低碳排放。李晨等^[10]运用脱钩理论研究我国远洋渔业碳排放与经济增长间的关系, 并从规模、结构、碳排放强度三方面分析二者关系的深层原因。张懿等^[11]采用脱钩模型从时空维度研究我国海水养殖业生态经济耦合状态, 并将其划分为 4 种类型。张华明等^[12]、张永凯等^[13]、公维凤等^[14]分别基于追赶脱钩模型、Tapio 脱钩模型、Theil 指数以及 STIRPAT 模型, 从区域层面测算了黄河流域城市的碳排放量, 进一步探索了碳排放与经济增长的脱钩状态, 指出多数城市碳排放与经济呈现弱脱钩关系, 二者基本实现了相对脱钩。王思博等^[15]从省域层面基于碳排放和经济增长视角, 运用 MK 趋势分析、蒙特卡洛模拟方法将中国省域城市碳达峰按 5 个梯次划分, 循序渐进式地为实现中国碳达峰目标提供参考价值。③碳排放变化的驱动因素。至于影响碳排放和经济增长之间关系或碳排放自身变化的因素, 众多学者从各行业、具体区域等多角度进行深入研究, 王靖添等^[16]、翁钢民

等^[17]、郭艺等^[18]、贺青等^[19]分别聚焦交通运输业、旅游业、电力、农业, 运用迪氏因素分解法 (LMDI) 分解碳排放脱钩的影响因素, 从碳排放强度、产业结构、经济水平、人口规模等因素剖析导致碳排放变化的内在机理。邵桂兰等^[20]、田鹏等^[21]核算了我国海洋渔业碳排放量, 并基于 LMDI 模型分解影响碳排放的因素, 指出产业规模和人口效应对海洋渔业碳排放有正效应。通过梳理国内外文献发现, 分析碳排放影响因素的研究方法主要有结构分解分析 (SDA)^[22]、LMDI^[23]、IPAT 模型^[24]、STIRPAT 模型^[25], 由于 LMDI 方法具有无残差、易于建模、结果易解释、利于多因素分解等优势, 已经在很多行业得到实践, 成为了最常用的分解方法^[26], 因此本研究采用 LMDI 方法分解淡水养殖碳排放与经济增长的脱钩弹性指数并分析其驱动因素。

综上, 国内外学者运用不同方法从不同层面、不同产业对碳排放进行了研究, 当前缺乏针对淡水养殖业碳排放与经济增长脱钩的研究, 尤其是关于淡水养殖业碳排放变化及驱动因素的探索较少。此外, 以往研究对淡水养殖业碳排放的测算也不够全面、不太准确。基于此, 本研究采用 Tapio 脱钩模型对中国的 30 个省级行政区从宏观和微观的视角测算淡水养殖碳排放与经济增长的脱钩指数, 借助 LMDI 方法探究影响其脱钩状态的因素, 以期为制定淡水养殖碳减排方案提供建议, 助力中国在 2030 年前实现碳达峰的宏伟目标。

1 方法与数据

1.1 淡水养殖业碳排放核算

淡水养殖业的碳排放主要包含直接碳排放和间接碳排放。直接碳排放主要指养殖系统本身养分循环产生的甲烷 (CH₄)、氧化亚氮 (N₂O) 以及养殖渔船燃用柴油产生的二氧化碳 (CO₂) 这三种温室气体排放^[10], 其中 N₂O 主要受饵料投入影响, 由于目前渔业统计数据缺乏对饵料投入具体数据的记录, 再加之 N₂O 气体排放仅占三种温室气体排放的 1%^[3], 因此本研究主要考虑 CH₄ 和 CO₂ 排放。间接碳排放, 本研究主要指新增船舶建造以及水泵、增氧机、投饵机设备耗电引起的碳排放。

直接碳排放 本研究主要包含 CH₄ 和 CO₂ 的气体排放, 其中 CH₄ 排放量的测算公式参考 Ma 等^[27] 的研究, 如 $Q_{\text{CH}_4} = S_r \times \rho_c$, Q_{CH_4} 为甲烷碳排放总量 (t); S_r 为淡水养殖面积 (hm²); ρ_c 为单位养殖面积 CH₄ 排放系数。柴油消耗产生的 CO₂ 排放量的具体公式:

$$Q_{\text{渔船燃油}} = P \times \alpha \times \delta \quad (1)$$

式中, $Q_{\text{渔船燃油}}$ 为渔船消耗柴油生成的 CO₂ 排放量 (t); P 为渔船功率 (kW); α 为渔船油耗系数; δ 为柴油产生的 CO₂ 转化系数。

为了对不同气体产生的排放量进行统一度量, 本研究将所有气体的温室效应统一转换为 CO₂ 排放量, 具体公式:

$$Q_c = \sum_{i=1}^2 \text{GHG}_i \times \text{GWP}_i \quad (2)$$

式中, Q_c 为统一标准的 CO₂ 排放总量 (t); GHG_i 指两种温室气体 CH₄ 和 CO₂ 的排放量 (t); GWP_i 为不同温室气体的全球变暖潜势值 (global warming potential, GWP), 根据 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 在 2014 年报告内公布的全球变暖潜势值数据显示, CH₄ 和 CO₂ 的 GWP 分别为 28 和 1。

间接碳排放 本研究主要考虑新船舶建造以及各种设备耗电产生的碳排放, 其中新增船舶耗电产生 CO₂ 的计算公式:

$$Q_{\text{船舶建造}} = Q_b \times \rho_b \times \mu \quad (3)$$

式中, $Q_{\text{船舶建造}}$ 为淡水养殖新船舶建造产生的 CO₂ 排放量 (t); Q_b 为淡水养殖渔船建造产值; ρ_b 为渔船建造产值耗电系数; μ 表示电力消耗的碳排放转换系数。由于缺乏对淡水养殖渔船建造产值的统计, 本研究参考吴静颖^[3] 的研究, 对 Q_b 进行估计, 如式 (4) 所示:

$$Q_b = \frac{P_b}{P_t} \times Q_t \quad (4)$$

式中, P_b 为内陆机动渔船功率 (kW); P_t 为机动渔船总功率 (kW); Q_t 为渔船渔机修造产值 (万元)。

水泵设备耗电产生 CO₂ 排放量的测算。水泵用于淡水养殖过程的补给供水, 借鉴徐皓等^[28] 的研究来计算水泵消耗电力导致的 CO₂ 排放, 具体公式:

$$Q_{\text{水泵}} = \frac{Q_{\text{换水量}}}{\lambda_1} \times \mu \quad (5)$$

式中, 通过养殖换水量来估计水泵的耗电, $Q_{\text{水泵}}$ 为水泵耗电产生的 CO₂ 排放量 (t); 设养殖平均水深 1.5 m, 补水率 2%, 水泵每年运行 200 d, 则淡水养殖用水量近似为: $Q_{\text{用水量}} = (1 + 200 \times 2\%) \times S_r \times 1.5$; S_r 为淡水养殖面积 (hm²); λ_1 为单位体积用水的耗电系数; μ 为电力消耗的碳排放转换系数。

增氧设备耗电造成 CO₂ 排放量的测算。增氧设备主要用来调节淡水养殖水质, 在养殖过程中使用广泛。本研究参考李为学等^[29] 的方法, 根据该设备的运作时间来测算耗电产生的 CO₂ 排放量, 具体公式:

$$Q_{\text{增氧机}} = N_{\text{增}} \times T \times \lambda_2 \times \mu \quad (6)$$

式中, $Q_{\text{增氧机}}$ 为增氧机耗电产生的 CO₂ 排放量 (t); $N_{\text{增}}$ 为增氧机的台数, 根据徐皓等^[28] 的研究, 假设 80% 的养殖面积需要增氧机, 每公顷消耗 2.25 kW, 且一台增氧机的功率为 3 kW, 则增氧机台数为: $N_{\text{增}} = S_r \times 15 \times 80\% \times 0.15 / 3$; S_r 为淡水养殖面积 (hm²); T 为增氧机的运行时间, 设一台增氧机工作 4 h, 每年工作 200 d; λ_2 为增氧机单位时间的耗电系数; μ 为电力消耗的碳排放转换系数。

投饵机耗电产生 CO₂ 排放量的测算。投饵机不仅可以缩减人力成本, 还能提高饲料的利用率。本研究同样通过该设备的运行时间来核算耗电产生的 CO₂ 排放量, 如式 (7) 所示:

$$Q_{\text{投饵机}} = N_{\text{投}} \times T \times \lambda_3 \times \mu \quad (7)$$

式中, $Q_{\text{投饵机}}$ 为投饵机耗电产生的碳排放量 (t); T 为投饵机的运行时间, 通常每天使用 4~5 次, 每次 0.5 h, 1 年工作 200 d^[30]; $N_{\text{投}}$ 为投饵机的数量, 每台投饵机的覆盖面积为 0.6~1.0 hm²^[29], 面积取平均值为 0.8 hm², 即 $N_{\text{投}} = S_r / 0.8$, S_r 为淡水养殖面积 (hm²); λ_3 为投饵机的耗电系数; μ 为碳排放转换系数。

本研究中碳排放测算所涉及的参数值如表 1。

1.2 脱钩关系与碳排放变化分解

脱钩关系 脱钩弹性指数反映了二者之间耦合和断裂的动态关系, 淡水养殖业碳排放和经济总产值之间的脱钩弹性指数表达式:

$$e_t = \frac{\Delta C / C}{\Delta G / G} = \frac{(C_{t+1} - C_t) / C_t}{(G_{t+1} - G_t) / G_t} \quad (8)$$

式中, e 为脱钩弹性指数; ΔC 为淡水养殖业碳

表 1 参数指标说明
Tab. 1 Parameter description

指标 index	系数 parameter	参考文献 reference
渔船建造(ρ_b) fishing vessel construction	100~300 kW·h/万元	[28]
水泵(λ_1) water pump	60 m ³ /(kW·h)	
增氧机(λ_2) oxygenator	3 kW	[29]
投饲机(λ_3) feeder	0.075 kW	[3]
渔船消耗柴油(α) fishing vessel fuel consumption	0.225 t/kW	《国内机动渔船油价补助用油量测算参考标准》
甲烷(ρ_c) nitromethane	51.60 kg/hm ²	[27]
柴油(δ) diesel	3.21 kg CO ₂ /kg	[31]
电力(μ) electrical power	0.78 kg CO ₂ /(kW·h)	[32]

排放污染总量变化、 ΔG 为淡水养殖经济总产值变化； C_t 为 t 期淡水养殖业碳排放污染量； C_{t+1} 为 $t+1$ 期淡水养殖业碳排放污染量； G_t 为 t 期淡水养殖总产值； G_{t+1} 为 $t+1$ 期总产值。Tapio^[33]依据脱钩弹性指数的大小划分为 8 类(表 2)。

碳排放驱动因素分解 将 Kaya 恒等式和 LMDI 分解方法相结合, 从技术、经济、人口等要素中探究碳排放的驱动因素^[34]。根据淡水养殖业碳排放的特征并参考相关文献^[35], 对恒等式适当变形, 分析碳排放变化同生产效率、经济强度、产业结构和劳动人口效应四个因素之间的关系, Kaya 恒等式为:

$$C = \frac{C}{PGDP} \times \frac{PGDP}{AGDP} \times \frac{AGDP}{POP} \times POP \quad (9)$$

式中, C 为淡水养殖碳排放总量; $PGDP$ 为淡水养殖产值; $AGDP$ 为渔业总产值; POP 为渔业专业从业人员。令 $\beta_1 = \frac{C}{PGDP}$ 为淡水养殖生产效率; $\beta_2 = \frac{PGDP}{AGDP}$ 为淡水养殖产业结构; $\beta_3 = \frac{AGDP}{POP}$ 为经济发展水平; $\beta_4 = POP$ 为劳动人口强度。

表 2 脱钩状态分类

Tab. 2 Decoupling state classification

产出状态 output state	e	DC/C	DG/G	脱钩状态 decoupling state
增长 increase	$e \leq 0$	<0	>0	强脱钩
	$0 < e < 0.8$	>0	>0	弱脱钩
	$0.8 \leq e \leq 1.2$	>0	>0	扩张连接
	$e > 1.2$	>0	>0	扩张性负脱钩
衰退 recession	$e > 1.2$	<0	<0	衰退脱钩
	$0 < e < 0.8$	<0	<0	衰退弱脱钩
	$0.8 \leq e \leq 1.2$	<0	<0	衰退连接
	$e \leq 0$	>0	<0	强负脱钩

为分析各因素对淡水养殖碳排放的影响, 通过 LMDI 模型将淡水养殖碳排放从基期到 t 期的总变化量(ΔC)分解为四大因素之和: 生产效率($\Delta\beta_1$)、产业结构($\Delta\beta_2$)、经济发展强度($\Delta\beta_3$)、劳动人口强度($\Delta\beta_4$)。其中 t 为时间($t = 1, 2, 3, \dots$), 0为基期, 具体如式(10)所示:

$$C = \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3 \times \beta_4 \quad (10)$$

$$\Delta C = C_t - C_0 = \Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 + \Delta\beta_3 + \Delta\beta_4$$

各驱动因素从基期到 t 期($t = 1, 2, 3, \dots$)对碳排放变化的贡献值根据式(11)计算可得。

$$\Delta\beta_1 = \sum \frac{C_t C_0}{\ln C_t \ln C_0} \times (\ln\beta_{1t} - \ln\beta_{10})$$

$$\Delta\beta_2 = \sum \frac{C_t C_0}{\ln C_t \ln C_0} \times (\ln\beta_{2t} - \ln\beta_{20})$$

$$\Delta\beta_3 = \sum \frac{C_t C_0}{\ln C_t \ln C_0} \times (\ln\beta_{3t} - \ln\beta_{30})$$

$$\Delta\beta_4 = \sum \frac{C_t C_0}{\ln C_t \ln C_0} \times (\ln\beta_{4t} - \ln\beta_{40}) \quad (11)$$

本研究进一步将淡水养殖碳排放和经济增长之间的弹性指数分解为 4 个因素的弹性指数之和, 具体如下:

$$e = (\Delta C/C)/(\Delta G/G) = \Delta C \times G/(C \times \Delta G)$$

$$= (\Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 + \Delta\beta_3 + \Delta\beta_4) \times G/(E \times \Delta G)$$

$$= e_{\beta_1} + e_{\beta_2} + e_{\beta_3} + e_{\beta_4} \quad (12)$$

式中, e_{β_1} 、 e_{β_2} 、 e_{β_3} 、 e_{β_4} 分别为对应因素的分解弹性指数。

1.3 数据来源

本研究数据来自《中国渔业统计年鉴》(2011—2021年)以及国家统计局发布的《中国统计年鉴》(2011—2021年), 计算碳排放量的

能耗折算系数由《中国能源统计年鉴》所得, 部分数据参考文献所得。由于港澳台及西藏自治区的数据缺失严重, 根据数据的可获得性, 本研究对中国其余 30 个省级行政区展开研究。

2 结果

2.1 碳排放与经济增长脱钩的关系

中国淡水养殖碳排放量总体特征 由图 1 可知, 我国淡水养殖碳排放量呈现先增长再下降后缓慢上升的趋势, 在 2016 年, 全国淡水养殖碳排放量达到峰值, 为 2 119.7 万 t。2016 年, 我国农业部发布了《关于加快推进渔业转方式调结构的指导意见》, 指出加强推进“两减两提三转”, 更加注重质量效益、生态保护、科技进步, 其中“两减”之一就是减少养殖排放。改革开放以来, 我国渔业取得瞩目成就, 粗放式的发展方式、资源衰竭、污染严重及技术、设施装备落后加剧了渔业资源环境压力, 迫使渔业向质量效益和生态效益转型。在一系列低碳及生态优先发展理念的践行下, 2017 年碳排放总量开始下降, 2017—2019 年均为负增长, 年增长率分别为: -12.66%、-3.67% 和 -2.44%。2017 年的碳排放增长率为 -12.66%, 说明 2017 年碳排放下降最明显, 效果最显著, 这与淡水养殖低碳绿色发展等相关政策的加强密切相关。2011—2021 年, 淡水养殖碳排放量在 2019 年达到最低, 随后 2 年碳排放量缓慢上升, 可能是渔业绿色发展政策的影响力处于“瓶

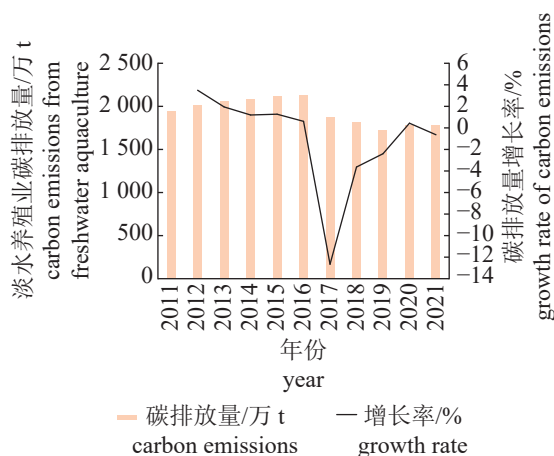


图 1 2011—2021 年我国淡水养殖碳排放变化趋势

Fig. 1 Trends of carbon emissions from freshwater aquaculture in China from 2011 to 2021

颈期”, 需着力聚焦于淡水养殖业碳减排目标以打破该局面。

碳排放与经济增长脱钩关系的宏观趋势

根据式 (8), 计算我国宏观层面淡水养殖碳排放与经济增长的脱钩弹性指数, 2011—2021 年结果如表 3 所示。整体来看, 我国淡水养殖碳排放与经济增长之间的耦合关系呈现“弱脱钩-强脱钩-扩张连接”状态。将其细分为 3 个阶段, 在 2011—2016 年, 我国淡水养殖碳排放与经济增长之间的耦合关系为弱脱钩, 表现为经济增长速率快于碳排放增速, 说明在此期间我国淡水养殖业以粗放式发展为主且以追求经济效率为重, 忽略了由此带来的环境负效应。在 2016—2019 年, 我国淡水养殖碳排放与经济增长之间的耦合状态为强脱钩, 实现经济正增长、碳排放量负增长的最理想状态, 可能得益于“十三五”时期我国对生态环境保护的重视加强, 取得了立竿见影的成效。从 2011—2019 年淡水养殖碳排放和经济产出之间的耦合关系经历了从弱脱钩向强脱钩改善; 而在 2019—2020 年, 我国淡水养殖碳排放增速与经济增速同步增长, 说明淡水养殖再次因过度追求经济效益导致环境污染反弹, 这种耦合状态的不稳定可能是对于坚持生态优先战略的松懈以及缺乏针对淡水养殖碳减排的政策规范。2020—2021 年二者状态又达到强脱钩, 生态经济再次取得改善。

碳排放与经济增长脱钩关系的区域异质性

①东部地区。东部地区的淡水养殖碳排放与经济增长的脱钩弹性指数及耦合关系结果见

表 3 全国淡水养殖业脱钩弹性指数

Tab. 3 Decoupling elasticity index of national freshwater aquaculture industry

年份 year	$\Delta C/C$	$\Delta G/G$	弹性指数 elasticity index	脱钩类型 types of decoupling
2011—2012	0.038 9	0.520 2	0.074 8	弱脱钩
2012—2013	0.022 1	0.112 2	0.197 2	弱脱钩
2013—2014	0.010 1	0.087 2	0.116 0	弱脱钩
2014—2015	0.014 1	0.052 2	0.269 9	弱脱钩
2015—2016	0.006 1	0.089 2	0.068 0	弱脱钩
2016—2017	-0.119 2	0.010 8	-10.990 1	强脱钩
2017—2018	-0.031 0	0.001 4	-22.722 1	强脱钩
2018—2019	-0.050 0	0.051 4	-0.973 5	强脱钩
2019—2020	0.031 0	0.032 4	0.955 6	扩张连接
2020—2021	-0.000 7	0.170 1	-0.004 0	强脱钩

表 4, 由于篇幅有限, 仅展示部分年份数据。北京在 2011—2016 年碳排放与经济间的耦合关系呈现“强负脱钩-扩张性负-衰退脱钩-强脱钩”的改善趋势, 属于改善型代表。在此期间北京淡水养殖工作重心逐渐由经济增长转向生态治理, 在 2017—2021 年北京淡水养殖碳排放与经济均为负增长, 最终稳定于衰退脱钩状态, 致力于生态保护, 这与北京重视生态渔业规模化、标准化密切相关。江苏和浙江碳排放的耦合关系也得到改善, 2011—2021 年, 弱脱钩和强脱钩出现的频率较高, 反映了其生态经济耦合关系较理想, 说明该地区重视生态环境保护。2011—2021 年, 天津、辽宁及海南淡水养殖碳排放与经济之间的耦合关系整体呈现“弱脱钩/强脱钩-衰退脱钩/衰退弱脱钩-衰退脱钩/扩张性负-强负脱钩”的态势, 属于衰退型发展。以港口城市天津为例, 随着天津市人口聚集, 渔业发展迅猛, 导致渤海近岸渔业资源衰竭以及水

域环境污染恶化, 生态损失严重, 由此引发水产品质量下降, 进一步导致巨大经济损失的恶性循环^[36]。河北和广东在 2011—2021 年整体表现为“弱脱钩-扩张性负/扩张连接-衰退脱钩-弱脱钩”的动态循环, 耦合关系属于稳定型。其中广东耦合状态出现频率最高的是弱脱钩, 说明广东在多数时期经济增长弹性大于碳排放污染弹性, 其生态经济协调健康发展。上海、福建和山东在 2011—2021 年整体呈现“弱脱钩/强脱钩-衰退弱脱钩-强负脱钩/衰退连接-扩张性负”的波动状态, 属于无序型。主要原因可能在于东海、渤海资源环境利用率较低, 以高密度养殖的粗放式发展不利于可持续发展, 说明该地区需加强生态保护。

②中部地区。中部地区的淡水养殖碳排放与经济产出的脱钩弹性指数及耦合关系结果见表 5, 由于篇幅有限, 仅展示部分年份数据。河南和吉林在 2011—2021 年碳排放与经济的耦

表 4 东部地区淡水养殖业脱钩弹性指数

Tab. 4 The decoupling elasticity index of freshwater aquaculture in the eastern China

省级行政区 provincial districts	2011	2012	2014	2015	2017	2018	2020	2021
北京	-4.25	5.14	1.23	0.37	0.32	0.85	2.46	5.17
Beijing	强负脱钩	扩张性负	衰退脱钩	衰退弱	衰退弱	衰退连接	衰退脱钩	衰退脱钩
天津	0.13	0.18	-0.08	-0.16	-2.20	7.08	-0.61	-0.75
Tianjin	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩	强脱钩	强脱钩	衰退脱钩	强脱钩	强负脱钩
河北	0.08	6.71	3.08	0.62	-3.16	1.10	-0.10	0.19
Hebei	弱脱钩	扩张性负	扩张性负	衰退弱	强脱钩	衰退连接	强脱钩	弱脱钩
辽宁	-0.01	0.09	0.01	0.24	0.16	0.14	2.11	-3.20
Liaoning	强脱钩	弱脱钩	衰退弱	弱脱钩	衰退弱	弱脱钩	扩张性负	强负脱钩
上海	-0.26	-1.53	0.32	0.14	0.85	1.18	8.68	1.58
Shanghai	强脱钩	强脱钩	衰退弱	衰退弱	衰退连接	衰退连接	衰退脱钩	扩张性负
江苏	0.04	0.04	-0.04	0.00	0.37	-1.60	-0.15	0.01
Jiangsu	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩	强脱钩	衰退弱	强脱钩	强脱钩	弱脱钩
浙江	0.05	-0.69	-0.56	-0.58	0.25	-0.57	-0.24	0.26
Zhejiang	弱脱钩	强脱钩	强脱钩	强脱钩	衰退弱	强脱钩	强脱钩	弱脱钩
福建	0.01	0.43	-7.48	0.50	0.68	0.50	0.10	2.51
Fujian	强脱钩	弱脱钩	强负脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	扩张性负
山东	0.06	0.63	0.55	0.25	-0.06	-0.13	0.18	7.09
Shandong	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	衰退弱	强负脱钩	强负脱钩	弱脱钩	扩张性负
广东	0.04	0.17	0.96	-0.33	0.17	0.43	0.10	2.05
Guangdong	弱脱钩	弱脱钩	扩张连接	强脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	扩张性负
海南	0.06	0.30	0.49	0.54	-2.21	2.03	0.26	-0.33
Hainan	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	强负脱钩	衰退脱钩	弱脱钩	强负脱钩

表 5 中部地区淡水养殖业脱钩弹性指数

Tab. 5 Decoupling elasticity index of freshwater aquaculture in central China

省级行政区 provincial districts	2011	2012	2014	2015	2017	2018	2020	2021
山西	-0.32	0.27	-1.17	-2.76	-0.28	-3.49	0.39	10.61
Shanxi	强脱钩	弱脱钩	强脱钩	强负脱钩	强负脱钩	强负脱钩	弱脱钩	扩张性负
吉林	0.15	2.94	0.54	0.09	-2.26	0.64	0.99	0.04
Jilin	弱脱钩	扩张性负	弱脱钩	弱脱钩	强负脱钩	弱脱钩	扩张连接	弱脱钩
黑龙江	0.14	-0.08	0.66	0.28	0.55	-0.01	0.29	0.06
Heilongjiang	弱脱钩	强负脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩	弱脱钩	弱脱钩
安徽	0.08	0.25	0.14	0.16	0.82	-0.08	-0.74	0.09
Anhui	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	扩张连接	强脱钩	强脱钩	弱脱钩
江西	0.06	0.05	0.16	0.19	-0.15	0.61	0.05	0.81
Jiangxi	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩	弱脱钩	弱脱钩	扩张连接
河南	0.18	1.03	0.16	1.90	-0.06	1.22	-0.14	-0.38
Henan	弱脱钩	扩张连接	弱脱钩	扩张性负	强脱钩	衰退脱钩	强脱钩	强脱钩
湖北	0.07	0.07	0.12	0.15	-5.46	0.04	0.07	0.69
Hubei	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
湖南	0.13	0.26	0.31	0.23	0.12	0.10	0.00	0.59
Hunan	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩	弱脱钩

合关系基本呈现“弱脱钩-扩张性负-弱脱钩/衰退脱钩-强脱钩”的趋好态势,属于改善型发展。河南水生资源丰富,2020年池塘养殖面积较2015年减少12.93%,但产量仅比2015年下降4.21%,养殖单产增速超越全国平均水平,加之养殖品种结构的优化,促使其生态经济效益显著提升^[37]。在2011—2021年,黑龙江、安徽、江西、湖北和湖南淡水养殖碳排放与经济产出的耦合关系整体以弱脱钩为主,属于稳定型,说明这些省级行政区生态经济耦合关系较为稳定,经济产出增速快于碳排放污染增长速率,表现为生态经济协调一致。以黑龙江为例,其淡水养殖业由粗放式发展阶段(2001—2015年)转入“转方式调结构”阶段(2016—2020年),淡水渔业资源得到维护,因此黑龙江淡水养殖生态经济取得平稳发展^[38]。2011—2021年,山西淡水养殖碳排放与经济产出的耦合关系呈现“弱脱钩-强脱钩-强负脱钩-弱脱钩-扩张性负”的波动趋势,属于无序型,说明其耦合关系较不稳定,这可能与山西渔业发展规模小、池塘养殖受阻以及先进技术和模式推广慢等因素有关,因此山西需加强对生态环境的重视。

③西部地区。西部地区的淡水养殖碳排放

与经济增长的脱钩弹性指数及耦合关系结果见表6,由于篇幅有限,仅展示部分年份数据。2011—2021年,四川、青海、陕西淡水养殖碳排放与经济之间的耦合关系整体趋向于弱脱钩,属于稳定型,经济增长速率较碳排放增速更为突出,但其生态经济仍有提升空间。其次,重庆在2011—2020年的耦合关系呈现“弱脱钩-强脱钩-弱脱钩”的平稳态势,而在2021年耦合关系恶化为强负脱钩,可能原因在于重庆淡水养殖受地形限制,池塘面积小、分布散,加之养殖密度大、尾水处理差等因素,造成重庆淡水养殖生态经济的巨大损失。2011—2021年,广西壮族自治区淡水养殖碳排放与经济之间的耦合关系表现为“弱脱钩-强脱钩-衰退脱钩-弱脱钩-扩张性负”,属于无序型,可能是广西壮族自治区对于如何处理生态与渔业经济间的关系尚未明确。2011—2021年,云南、贵州、内蒙古自治区淡水养殖碳排放与经济之间的耦合关系整体呈现“弱脱钩-扩张性负/衰退弱脱钩/衰退脱钩-弱脱钩/强脱钩”,属于改善型。云南具有气候和资源优势,水资源利用潜力大,云南淡水渔业种业迅速发展,优化了水产养殖的品种结构,提高了水产品竞争力,推动了产业升级改造,

表 6 西部地区淡水养殖业脱钩弹性指数

Tab. 6 Decoupling elasticity index of freshwater aquaculture in western China

省级行政区 provincial districts	2011	2012	2014	2015	2017	2018	2020	2021
内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region	0.12 弱脱钩	-0.06 强脱钩	0.32 弱脱钩	-0.75 强脱钩	0.44 衰退弱	-7.65 强负脱钩	-9.10 强脱钩	-0.11 强脱钩
广西壮族自治区 Guangxi Zhuang Autonomous Region	0.06 弱脱钩	0.12 弱脱钩	0.79 弱脱钩	-0.04 强脱钩	0.08 弱脱钩	0.15 弱脱钩	-0.03 强脱钩	1.25 扩张性负
重庆 Chongqing	0.07 弱脱钩	0.29 弱脱钩	0.41 弱脱钩	0.30 弱脱钩	0.19 弱脱钩	0.04 弱脱钩	0.06 弱脱钩	-1.54 强负脱钩
四川 Sichuan	0.07 弱脱钩	0.29 弱脱钩	0.60 弱脱钩	0.30 弱脱钩	0.27 弱脱钩	0.33 弱脱钩	0.02 弱脱钩	0.08 弱脱钩
贵州 Guizhou	0.13 弱脱钩	-1.01 强负脱钩	-0.10 强脱钩	0.07 弱脱钩	-1.87 强负脱钩	1.33 扩张性负	0.10 弱脱钩	0.20 弱脱钩
云南 Yunnan	0.10 弱脱钩	0.39 弱脱钩	0.76 弱脱钩	0.39 弱脱钩	0.07 弱脱钩	-8.63 强负脱钩	-0.46 强脱钩	-0.40 强脱钩
陕西 Shaanxi	0.03 弱脱钩	-0.01 强脱钩	-0.15 强脱钩	-3.22 强脱钩	-667.80 强脱钩	361.10 扩张性负	0.32 弱脱钩	0.02 弱脱钩
甘肃 Gansu	0.12 弱脱钩	0.55 弱脱钩	1.41 扩张性负	0.12 弱脱钩	0.62 衰退弱	-0.30 强脱钩	-0.24 强脱钩	-0.58 强负脱钩
青海 Qinghai	0.00 弱脱钩	0.18 弱脱钩	0.00 强脱钩	-0.01 强脱钩	0.00 弱脱钩	0.00 强脱钩	0.00 弱脱钩	20.88 扩张性负
宁夏回族自治区 Ningxia Hui Autonomous Region	0.07 弱脱钩	-2.12 强负脱钩	0.14 弱脱钩	0.21 弱脱钩	-0.03 强脱钩	1.79 衰退脱钩	0.03 弱脱钩	0.09 衰退弱
新疆维吾尔自治区 Xinjiang Uygur Autonomous Region	-0.06 强脱钩	-0.02 强脱钩	-0.06 强负脱钩	0.23 弱脱钩	-0.31 强脱钩	1.43 衰退脱钩	-0.08 强脱钩	0.04 衰退弱

进而促进生态经济和谐发展^[39]。贵州在“十三五”期间大力推广稻田养鱼的生态养殖模式, 坚持生态优先, 把握产业转型契机, 基本形成了生态渔业的现代化发展态势^[40]。2011—2021年, 甘肃、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区淡水养殖碳排放与经济之间的耦合关系整体呈现“弱脱钩-扩张性负/强负脱钩-衰退脱钩/衰退弱-强负脱钩/衰退弱”的趋势, 属于衰退型发展, 可能原因在于这些省级行政区仍属于粗放式发展, 生产方式较落后、观念更新滞后、创新动力不足、产品结构不合理等因素导致生态经济效益低下。

2.2 碳排放变化的分解因素

弹性脱钩指数描述的是淡水养殖碳排放和经济产出二者之间的同步关系, 并未解释碳排放变化的内在机制, 因此, 运用LMDI模型分解我国淡水养殖碳排放驱动因素, 各因素贡献值及占比结果见表7, 各因素的分解弹性见表8。

由表7结果可知, 2011—2021年我国淡水

养殖碳排放量累积下降105.75万t, 在生产效率、劳动力强度的作用下产生的碳排放累积变化量分别为-2146.74万和-447.37万t, 这两类因素促进碳排放的下降, 其中生产效率占有所有驱动因素的比例为42.2%, 对降低碳排放的贡献率达到82.8%, 是拉动碳减排的最大马车。而在产业结构和经济强度效应的驱动下对碳排放量累积变化的贡献分别为751.39万和1736.98万t, 说明这两个因素助力碳排放的增长, 其中在所有驱动因素中经济强度占比34.2%, 对增加碳排放的贡献率达到69.8%, 因此经济强度是碳排放上升的最主要驱动因素。

生产效率和劳动力强度抑制碳排放(表7, 表8), 该结果与贺青等^[19]研究一致。其中生产效率推动渔业碳减排, 可能原因在于通过推广低碳渔业绿色生产技术、加强渔民生产技术的培训、加大低碳科技政策的扶持等方式来提高生产效率, 进而降低碳排放。劳动力强度由渔业专业从业人员衡量且其弹性均为负值, 说明劳动力强度对碳排放起负效应, 这可能与从业

表 7 2011—2021 年淡水养殖业碳排放各驱动因素贡献值

Tab. 7 Contributions of driving factors of carbon emissions in freshwater aquaculture from 2011 to 2021

年份 year	$\Delta\beta_1$ /万t	$\Delta\beta_2$ /万t	$\Delta\beta_3$ /万t	$\Delta\beta_4$ /万t	ΔC /万t
2011	-751.65	554.96	292.03	-19.96	75.38
2012	-171.86	-8.21	229.09	-4.49	44.53
2013	-152.09	23.66	168.13	-18.88	20.82
2014	-77.12	18.23	110.64	-22.51	29.24
2015	-167.79	58.40	167.76	-45.59	12.78
2016	-274.22	-29.43	81.54	-30.63	-252.74
2017	-60.41	-70.87	134.72	-61.34	-57.90
2018	-178.84	72.04	62.11	-45.80	-90.49
2019	-2.44	-21.22	167.76	-90.86	53.24
2020	-279.47	75.28	291.17	-88.18	-1.19
2021	-30.86	78.55	32.04	-19.15	60.57
贡献值 score	-2 146.74	751.39	1 736.98	-447.37	-105.75
占比/% percentage	42.2	14.8	34.2	8.8	

表 8 各驱动因素脱钩弹性指数分解

Tab. 8 Decomposition of decoupling elasticity index of each driving factor

年份 year	碳排放强度 carbon emission intensity	产业结构 industrial structure	经济强度 economic strength	劳动力强度 labor intensity
2011—2012	-0.745 9	0.550 7	0.289 8	-0.019 8
2012—2013	-0.761 0	-0.036 3	1.014 4	-0.019 9
2013—2014	-0.847 6	0.131 9	0.937 0	-0.105 2
2014—2015	-0.711 8	0.168 2	1.021 1	-0.207 7
2015—2016	-0.892 8	0.310 7	0.892 6	-0.242 6
2016—2017	-11.924 2	-1.279 6	3.545 6	-1.331 9
2017—2018	-23.705 8	-27.813 8	52.868 2	-24.070 7
2018—2019	-1.924 0	0.775 1	0.668 2	-0.492 7
2019—2020	-0.043 7	-0.381 0	3.011 1	-1.630 9
2020—2021	-0.927 1	0.249 8	0.966 0	-0.292 5

人员科学文化水平和技术创新能力等综合素质的提升相关^[19]。经济强度的脱钩值均为正值,且经济强度的脱钩值的绝对值基本大于碳排放和经济产出之间的脱钩指数(表 8),表明经济强度对碳排放增长具有强正效应,经济飞速发展导致碳排放增加的环境负效应较显著。产业结构的弹性值正负反复变化,从最终结果看,产业结构效应推动碳排放增加,但其对碳排放的

影响较小且不稳定。

3 讨论

3.1 从宏观、地区层面以及影响因素方面总结

分析淡水养殖业碳排放变化趋势,发现 2011—2021 年全国淡水养殖碳排放量先增长再下降随后缓慢上升,在 2016 年碳排放达到峰值,2017—2019 年碳排放为负增长。

宏观层面 2011—2021 年淡水养殖碳排放与经济产出的耦合关系呈现弱脱钩、强脱钩、扩张连接三种不同的状态,耦合状态整体较稳定。2011—2019 年,我国淡水养殖业从弱脱钩向强脱钩的理想状态过渡,属于改善期。2019—2021 年,淡水养殖耦合状态为扩张连接和强脱钩,耦合状态变化较大,说明在此期间生态经济关系不稳定。

地区层面 根据各省级行政区淡水养殖碳排放与经济产出之间耦合状态的特点,将其耦合关系分为以下四类:稳定型、改善型、衰退型、无序型。①东部区域的耦合关系差异较大,改善型发展以北京最具代表,其次是江苏和浙江,北京主要通过提高生态渔业规模化、标准化促使耦合关系得以改善。衰退型发展以天津、辽宁和海南为代表,河北和广东属于稳定型发展,广东主要通过重视生态修复、加快产业绿色转型、实行结构优化等举措促进生态经济和谐平稳发展;上海、福建和山东是耦合关系无序性的代表,东海和渤海资源利用率低且水域遭受严重污染,导致其耦合关系不稳定。②中部地区耦合关系具有改善型、稳定型、无序型的特点,河南和吉林属于改善型发展;黑龙江、安徽、江西、湖北和湖南是稳定型的代表;山西属于无序型发展,耦合关系不稳定。③西部地区稳定型的耦合关系以四川、重庆、陕西和青海最具代表性,整体趋向于弱脱钩,生态经济仍有改善空间。改善型发展以云南、贵州和内蒙古自治区为代表,这些省级行政区根据当地气候、地理环境因地制宜开拓出属于自己的现代化生态渔业发展道路。广西壮族自治区的生态经济耦合关系为无序型,较不稳定。衰退型为甘肃、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区,由于这些省级行政区渔业综合发展相对落后,导致其生态经济发展不协调。

影响因素 生产效率和劳动力强度对淡水养殖碳减排具有正向作用, 生产效率是促进碳减排的最主要因素; 经济强度和产业结构对碳减排具有负效应, 经济强度是碳排放增加的主要驱动因素。

3.2 政策建议

基于以上的研究结论, 结合淡水养殖业碳排放的实际状况, 为了促进淡水养殖业实现有效碳减排目标, 提出以下几点建议。

一是构建淡水养殖业“1+N”政策体系。在宏观层面的顶层设计上, 我国生态安全法律法规建立了较全面、完善的体系, 对生态污染的制约具有促进碳减排、改善生态环境的协同作用。然而, 我国针对淡水养殖业碳减排的相关政策体系的制定尚未完备、成熟。因此, 应着力构建中国淡水养殖业“1+N”政策体系, “1”指的是推动中国淡水养殖业节能减排、低碳绿色转型发展的宏观政策方案, “N”围绕淡水养殖业碳减排重点任务的N个配套政策, 这将完成从零到有、从有到全的突破。“N”个配套政策可以是: 制定淡水养殖业碳排放监管政策, 各省级行政区因地制宜设定碳减排目标和奖惩措施, 通过倒逼机制推动渔业企业降低碳排放; 建立低碳渔业示范基地, 加大低碳技术的研发投入, 推广和应用节能养殖设备、数字化养殖系统等先进技术; 加强政府、科研院所和渔业企业之间的多方合作机制, 鼓励科研机构和企业开展低碳科技研究项目, 加快技术成果转化; 提出渔业人才引进和培养的政策, 提高渔业从业人员的低碳意识和技能水平。

二是鉴于生产效率是拉动淡水养殖碳排放减少的主要驱动因素, 应发展低碳技术, 提高能源效率。我国的能源仍以消耗煤炭、化石等一次能源为主, 一方面, 应提高低碳技术以降低传统一次能源的碳排放比例, 从而提高能源利用效率; 另一方面, 用可以替代化石能源的可再生低碳能源, 从源头上解决燃烧一次能源导致的碳排放污染问题。在淡水养殖领域的低碳技术成果主要有循环水养殖系统、微孔增氧技术、淡水池塘养殖小区构建等技术, 这些技术对促进碳减排起到了积极影响, 但由于投入和维护成本过高等困难, 仍需要在发展中完善。

三是优化产业结构, 开发并推广使用新能

源。研究表明, 加大淡水养殖产业结构会增加碳排放, 因此需合理控制产业结构、优化促进产业低碳生产模式转型。促进淡水养殖产业链上下游企业之间的紧密合作, 形成协同效应, 如与养殖企业与饲料企业、技术研发机构等建立合作, 共同加快推进整个产业链的低碳化转型。经济发展水平会导致碳排放增加, 但经济发展效应同时也是一把“双刃剑”, 各地区应根据当地经济发展实力, 开发并推广清洁能源, 以实现低碳经济健康协调发展。经济发展水平较高的地区应加大低碳技术的研发力度, 共享低碳养殖成果, 促进各省级行政区之间的协同发展。

参考文献 (References):

- [1] 张永年. 中国城市碳排放效率动态演进、区域差异及空间收敛性[J]. 城市问题, 2023(7): 33-42,83.
Zhang Y N. Dynamic evolution, regional differences, and spatial convergence of carbon emission efficiency in Chinese cities[J]. Urban Problems, 2023(7): 33-42,83 (in Chinese).
- [2] 李晓梅, 黄俊. 中国省域物流碳排放效率的演化特征及收敛性分析[J]. 世界地理研究, 2024, 33(4): 155-166.
Li X M, Huang J. Evolution characteristics and convergence analysis of carbon emission efficiency of provincial logistics in China[J]. World Regional Studies, 2024, 33(4): 155-166 (in Chinese).
- [3] 吴静颖. 中国淡水养殖碳排放效率研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
Wu J Y. Carbon emission efficiency of freshwater aquaculture in China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021 (in Chinese).
- [4] 曾冰. 长江经济带渔业经济碳排放效率空间格局及影响因素研究[J]. 当代经济管理, 2019, 41(2): 44-48.
Zeng B. Spatial pattern and influencing factors of carbon emission efficiency of fishery economy in the Yangtze River Economic Belt[J]. Contemporary Economic Management, 2019, 41(2): 44-48 (in Chinese).
- [5] Fiorito G. Can we use the energy intensity indicator to study “Decoupling” in modern economies?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 47: 465-473.
- [6] Yang J, Hao Y, Feng C. A race between economic growth and carbon emissions: what play important roles towards global low-carbon development?[J]. *Energy Economics*, 2021, 100: 105327.
- [7] Chen C C, Lu Y L, He G Z. Driving mechanisms for decoupling CO₂ emissions from economic development in the ten largest emission countries[J]. *Ecosystem Health and Sustainab-*

- ility, 2022, 8(1): 2059016.
- [8] 郑凌霄, 周敏. 我国碳排放与经济增长的脱钩关系及驱动因素研究 [J]. 工业技术经济, 2015, 34(9): 19-25.
Zheng L X, Zhou M. Decoupling and driving factors analysis between the relationship of carbon emissions and economic growth in China[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2015, 34(9): 19-25 (in Chinese).
- [9] 王安静, 郭琳, 赵景峰. 中国经济与碳排放脱钩的时空异质性及其驱动因素分析 [J/OL]. 软科学: 1-12. (2023-08-18)[2023-11-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20230818.1351.006.html>.
Wang A J, Guo L, Zhao J F. Spatial and temporal heterogeneity of the decoupling between economy and carbon emissions and its driving factors[J/OL]. Soft Science: 1-12. (2023-08-18)[2023-11-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20230818.1351.006.html> (in Chinese).
- [10] 李晨, 迟萍, 邵桂兰. 我国远洋渔业碳排放与行业经济增长的响应关系研究——基于脱钩理论与 LMDI 分解的实证分析 [J]. 科技管理研究, 2016, 36(6): 233-237,244.
Li C, Chi P, Shao G L. Research on the responsive relationship between China's deep-sea fishery carbon emissions and industry economic growth: an empirical analysis based on decoupling theory and LMDI decomposition[J]. Science and Technology Management Research, 2016, 36(6): 233-237,244 (in Chinese).
- [11] 张懿, 纪建悦. 中国海水养殖生态经济系统耦合关系及驱动因素分解 [J]. 农业技术经济, 2020(4): 94-106.
Zhang Y, Ji J Y. The decoupling and influencing factors analysis of blue granary eco-economy system[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2020(4): 94-106 (in Chinese).
- [12] 张华明, 元鹏飞, 朱治双. 黄河流域碳排放脱钩效应及减排路径 [J]. 资源科学, 2022, 44(1): 59-69.
Zhang H M, Yuan P F, Zhu Z S. Decoupling effects of carbon emissions and reduction path in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2022, 44(1): 59-69 (in Chinese).
- [13] 张永凯, 田雨. 黄河流域城市群碳排放与经济增长脱钩状态及驱动因素 [J]. 人民黄河, 2023, 45(5): 30-35.
Zhang Y K, Tian Y. Decoupling condition between carbon emission and economic growth in Yellow River Basin urban agglomeration and its driving factors[J]. Yellow River, 2023, 45(5): 30-35 (in Chinese).
- [14] 公维凤, 范振月, 王传会, 等. 黄河流域碳排放区域差异、成因及脱钩分析 [J]. 人民黄河, 2021, 43(12): 12-17.
Gong W F, Fan Z Y, Wang C H, et al. Regional difference and driving factors of carbon emissions and the decoupling between carbon emissions and economic growth of the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2021, 43(12): 12-17 (in Chinese).
- [15] 王思博, 庄贵阳, 窦晓铭. 中国省域碳达峰梯次划分与差异化排放路径——基于碳排放与经济发展双重视角的考察 [J]. 武汉大学学报 (哲学社会科学版), 2023, 76(3): 136-150.
Wang S B, Zhuang G Y, Dou X M. Tiered division of peak carbon emissions and differentiated emission paths among provinces in China based on the dual perspectives of carbon emissions and economic development[J]. Wuhan University Journal (Philosophy & Social Science Edition), 2023, 76(3): 136-150 (in Chinese).
- [16] 王靖添, 马晓明. 中国交通运输碳排放影响因素研究——基于双层次计量模型分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2021, 57(6): 1133-1142.
Wang J T, Ma X M. Influencing factors of carbon emissions from transportation in China: empirical analysis based on two-level econometrics method[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(6): 1133-1142 (in Chinese).
- [17] 翁钢民, 李聪慧, 潘越, 等. 中国旅游业碳排放脱钩效应及影响因素研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(2): 114-120.
Weng G M, Li C H, Pan Y, et al. Decoupling effect and influencing factors of carbon emissions in China's tourism industry[J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(2): 114-120 (in Chinese).
- [18] 郭艺, 张鹏飞, 葛力铭, 等. 长江经济带电力碳排放时空变化及影响因素——基于区域和产业视角 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(3): 1438-1448.
Guo Y, Zhang P F, Ge L M, et al. The spatio-temporal variation and influencing factors of electricity-related carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt from the region and industry perspectives[J]. China Environmental Science, 2023, 43(3): 1438-1448 (in Chinese).
- [19] 贺青, 张俊飏. 粮食主产区农业碳排放的动态演进及驱动因素研究 [J]. 生态经济, 2023, 39(6): 123-128,162.
He Q, Zhang J B. Research on the dynamic evolution and driving factors of agricultural carbon emissions in major grain-producing areas[J]. Ecological Economy, 2023, 39(6): 123-128,162 (in Chinese).
- [20] 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.
Shao G L, Sun H Z, Yu J K, et al. Decomposition of driving factors of marine fishery carbon emissions in China based on LMDI method[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2015(6): 119-128 (in Chinese).
- [21] 田鹏, 汪浩瀚, 李加林, 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.
Tian P, Wang H H, Li J L, et al. Spatiotemporal variation characteristics and system dynamic simulation of China's marine fishery carbon emissions[J]. Resources Science, 2023, 45(5): 1074-1090 (in Chinese).
- [22] Wang H, Ang B W, Su B. A multi-region structural decomposition analysis of global CO₂ emission intensity[J]. Ecological

- Economics*, 2017, 142: 163-176.
- [23] Ang B W, Zhang F Q, Choi K H. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition[J]. *Energy*, 1998, 23(6): 489-495.
- [24] 胡林林, 贾俊松, 毛端谦, 等. 基于 IPAT 模型的江西旅游业碳排放分析 [J]. *广东农业科学*, 2013, 40(20): 168-170,177.
Hu L L, Jia J S, Mao D Q, *et al.* Analysis on carbon emissions of tourism based on IPAT model in Jiangxi Province[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(20): 168-170,177 (in Chinese).
- [25] 张江艳. 基于扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的碳排放脱钩因素 [J]. *环境科学*, 2024, 45(4): 1888-1897.
Zhang J Y. Research on carbon emission decoupling factors based on STIRPAT model and LMDI decomposition[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(4): 1888-1897 (in Chinese).
- [26] 王凤婷, 方恺, 于畅. 京津冀产业能源碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的实证 [J]. *工业技术经济*, 2019, 38(8): 32-40.
Wang F T, Fang K, Yu C. Decoupling between industrial energy-related carbon emissions and economic growth and its driving factors in Beijing, Tianjin and Hebei urban agglomeration——Empirical study based on Tapio decoupling and LMDI model[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2019, 38(8): 32-40 (in Chinese).
- [27] Ma Y C, Sun L Y, Liu C Y, *et al.* A comparison of methane and nitrous oxide emissions from inland mixed-fish and crab aquaculture ponds[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638: 517-523.
- [28] 徐皓, 刘晃, 张建华, 等. 我国渔业能源消耗测算 [J]. *中国水产*, 2007(11): 74-76,78.
Xu H, Liu H, Zhang J H, *et al.* Calculation of fishery energy consumption in China[J]. *China Fisheries*, 2007(11): 74-76,78 (in Chinese).
- [29] 李为学, 吴本凤. 合理配备与正确使用水产养殖机械 [J]. *福建农业*, 2013(7): 33.
Li W X, Wu B F. Rational allocation and correct use of aquaculture machinery[J]. *Fujian Agricultural*, 2013(7): 33 (in Chinese).
- [30] 顾权, 李刚, 胡国宏. 使用投饵机的几点体会 [J]. *渔业现代化*, 2002(3): 30.
Gu Q, Li G, Hu G H. Some experiences of using feeder[J]. *Fishery Modernization*, 2002(3): 30 (in Chinese).
- [31] 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, 41(8): 873-876.
Yue D D, Wang L M, Wang Q, *et al.* GHG emissions estimation and efficiency analysis of marine fisheries[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2013, 41(8): 873-876 (in Chinese).
- [32] 刘晃, 车轩. 中国水产养殖二氧化碳排放量估算的初步研究 [J]. *南方水产*, 2010, 6(4): 77-80.
Liu H, Che X. Elementary study on evaluation of CO₂ emissions from aquaculture in China[J]. *South China Fisheries Science*, 2010, 6(4): 77-80 (in Chinese).
- [33] Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [34] Yang J, Cai W, Ma M D, *et al.* Driving forces of China's CO₂ emissions from energy consumption based on Kaya-LMDI methods[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134569.
- [35] 蔡景丽, 顾佳艳, 陈敏, 等. 2000—2020 年中国种植业碳排放驱动因素及预测分析 [J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(2): 159-167.
Cai J L, Gu J Y, Chen M, *et al.* Drivers and prediction of carbon emissions in the China's planting industry from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(2): 159-167 (in Chinese).
- [36] 史佳林, 宋建辉, 刘欣宇. 天津滨海新区现代渔业发展方向与空间布局 [J]. *中国农业资源与区划*, 2012, 33(4): 72-77.
Shi J L, Song J H, Liu X Y. Developing direction and spatial arrangement of modern fishery in Tianjin Binhai New Area[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2012, 33(4): 72-77 (in Chinese).
- [37] 李应南. 浅析河南渔业的优势及其利用 [J]. *河南水产*, 2022(2): 40-41.
Li Y N. Analysis on the advantages and utilization of Henan fishery[J]. *Henan Fisheries*, 2022(2): 40-41 (in Chinese).
- [38] 张明. 黑龙江省淡水渔业发展研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
Zhang M. Study on the development of freshwater fishery in Heilongjiang Province[D]. Changchun: Jilin University, 2018 (in Chinese).
- [39] 庄平, 毕保良, 赵峰, 等. 云南淡水渔业种业发展战略的若干思考 [J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(9): 1-7.
Zhuang P, Bi B L, Zhao F, *et al.* Perspective on the development strategy of freshwater fishery seed industry in Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(9): 1-7 (in Chinese).
- [40] 罗斌, 周贤君. 贵州地区碳汇渔业潜力研究 [J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(3): 79-85.
Luo B, Zhou X J. Potential for carbon sink fishery development in Guizhou Province[J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(3): 79-85 (in Chinese).

Decoupling relationship and driving factors between carbon emissions and economic growth in China's freshwater aquaculture industry: based on Tapio decoupling and LMDI model

WU Daqing^{1,2*}, LIU Lichen^{1,2}

1. School of Economics and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Strategic Research and Development Center of China Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: A series of chain reactions, such as global warming, rising sea levels, endangered species, and oxygen depletion, have caused serious damage to ecosystems and posed tremendous challenges to the survival of humans and other living organisms. Consequently, the task of reducing global carbon emissions has become imperative and urgent. In response, China demonstrated its firm determination in 2020 by committing to achieve carbon peak by 2030 and carbon neutrality by 2060. As climate change and environmental pollution issues become increasingly prominent, the need for China to reduce carbon emissions and achieve low-carbon, green, and sustainable development has become more critical. Freshwater aquaculture, as an important production activity, has attracted widespread attention due to its carbon emissions. Under the influence of scientific and technological progress and policy guidance, China has begun to explore a decoupling path for the freshwater aquaculture industry, aiming to separate economic growth from carbon emissions and seek a sustainable development model. To promote the absolute decoupling of carbon emissions and economic growth in freshwater aquaculture, this paper employs the decoupling model and Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) decomposition model. It calculates the decoupling index of freshwater aquaculture carbon emissions and economic growth in China from 2011 to 2021 at both the national and regional levels. The study also analyzes the underlying reasons for the decoupling status among different provinces and explores the driving factors of this decoupling state. The results showed that: ① At the macro level, freshwater aquaculture carbon emission in China exhibited an initial increase, followed by a decrease, and then an increase again during the study period. The coupling relationship between carbon emissions and economic growth in freshwater aquaculture remained relatively stable. ② At the regional level, the coupling relationship was categorized into four types, with significant differences observed among provinces. ③ In terms of influencing factors, production efficiency and labor intensity had a positive effect on reducing carbon emissions in freshwater aquaculture, while economic development intensity and industrial structure contributed to increased carbon emissions. The research also found that the coupling relationship between freshwater aquaculture carbon emissions and economic growth was unbalanced. Economic intensity is the primary driver of increased carbon emissions, and improving production efficiency and labor intensity can help enhance its coupling relationship. This paper provides a basis and reference for the formulating carbon emission reduction policies in freshwater aquaculture. It holds significant practical importance for promoting the coordinated development of freshwater aquaculture ecology and economy, accelerating industrial transformation, and contributing to the achievement of China's "dual carbon" goals.

Key words: freshwater aquaculture; carbon emissions; economic growth; Tapio decoupling; LMDI model

Corresponding author: WU Daqing. E-mail: dqwu@shou.edu.cn

Funding projects: Sub-theme of the Major Project of the National Social Science Council, Research on Development Potential of Deep Blue Fishery Industry under Climate Change (21 & ZD100); China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-47-G29); Shanghai Philosophy and Social Science Planning Project "Optimization of O2O Decision Making of Fresh Food E-commerce under New Retail Mode" (2020EGL011)