

我国海水养殖生态效率影响因素分析*

张莹¹ 韩立民^{1,2} 秦宏^{1,2①}

(1. 中国海洋大学管理学院 山东青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋发展研究院 山东青岛 266100)

摘要 近年来,如何实现海水养殖经济与生态的协调发展逐渐引起学界的关注。前人研究海水养殖生态效率时,较多关注对环境非期望产出的衡量,较少考虑海水养殖的环境正外部效应。以海水养殖碳汇量作为衡量海水养殖环境正外部效应的期望产出,以海水养殖氮、磷污染产出量作为非期望产出,运用包含非期望产出的 SBM 模型对 2008~2017 年我国海水养殖生态效率进行测度,在此基础上运用 Tobit 回归模型,通过构建海水养殖专业化程度、规模化程度和集约化程度三个变量衡量海水养殖生态效率的内部影响因素,并综合考虑科技、经济、管理、外贸等外部影响因素,考察海水养殖生态效率的影响因素。研究表明: (1) 考察期内我国海水养殖生态效率呈现出波动上升的趋势,但总体尚未达到最优状态; (2) 不同海域海水养殖生态效率均值存在显著的阶梯式区域失衡; (3) 海水养殖规模化程度与科技管理水平对海水养殖生态效率具有正向影响,海水养殖专业化程度、集约化程度、培训强度、经济发展水平和外贸依存度对海水养殖生态效率具有负向影响,海水养殖环境规制对海水养殖生态效率的影响不显著。在此基础上,从转变发展方式、加强科技研发与推广投入、加强海水养殖进出口与环境管理等方面提出了改善我国海水养殖生态效率的对策建议。

关键词 海水养殖生态效率; 海水养殖双重环境外部效应; 影响因素; SBM 模型; Tobit 回归

中图分类号 F326.4 **doi:** 10.11693/hyh20211200340

随着陆地资源开发逐渐饱和,海水养殖业作为人类优质动物蛋白供给的主要来源,在缓解人口增长所造成的食品需求压力,弥补世界性粮食不足以及增加渔民收入等方面发挥着日益重要的作用。大力发展海水养殖业,建设“蓝色粮仓”,已成为我国新时期海洋事业发展中的重要战略任务(韩立民, 2018)。统计数据显示,我国的海水养殖面积和产量已经分别由 1979 年的 11.65 万 hm^2 和 41.59 万 t 增长为 2020 年的 199.56 万 hm^2 和 2 135.31 万 t。伴随着海水养殖业发展规模的不断扩大,学界在关注海水养殖业水产品生产功能和经济功能的同时,对海水养殖业生态功能的关注也日益增多。海洋水产品中的贝类与藻类在生长过程中可以吸收固定水体中的二氧化碳,并伴随着水生生物收获的过程,将水体中的碳转移出水体,从而达到减弱水体酸化、缓解气候变暖的效果,即“渔业碳汇”(唐启升, 2011),从而产生环境正外部效应。同时,

在海水养殖规模扩张的过程中,部分投饵型高密度养殖方式也会对养殖区域的海洋水环境造成一定的环境压力,产生一定的环境负外部效应。

2020 年 9 月,我国提出力争在 2030 年前实现“碳达峰”,2060 年前实现“碳中和”。在“双碳”目标背景下,如何在有效提升海水养殖业生产能力,满足国民水产品消费需求的基础上,有效发挥海洋渔业碳汇功能,降低养殖水域环境负影响是新时期海水养殖业绿色转型发展的关键问题。在综合考虑海水养殖环境正负双重外部效应并客观评价海水养殖生态效率的基础上,分析海水养殖生态效率影响因素,探讨海水养殖生态效益与经济效益协调发展的实现路径,对于保障海产品稳定供给,改善水域生态环境,实现海水养殖业绿色可持续发展具有重要意义。

海水养殖生态效率是对海水养殖生产过程中的资源、环境 and 经济之间协调状况的综合反映,是海水

* 国家社科基金重大项目, 21&ZD100 号。张莹, 博士研究生, E-mail: openwin_ying@163.com

通信作者: 秦宏, 博士, 教授, E-mail: qinhong@ouc.edu.cn

收稿日期: 2021-12-23, 收修改稿日期: 2022-02-11

养殖生产中各项资源投入与水产品产出及其造成的环境影响之间的比值,这种环境影响既包含其对生态的改善作用,也包含其对环境造成的污染负荷。回顾以往文献发现,学界多侧重于从经济角度对海水养殖的生产效率进行评价(Karagiannis *et al*, 2000; 林东年等, 2007; 王春晓等, 2018; 徐敬俊等, 2018; 高晶晶等, 2018), 主要关注海水养殖生产中的要素投入与经济产出之间的关系。从研究方法上来看,以数据包络分析(DEA)为代表的非参数方法(林东年等, 2007; 徐敬俊等, 2018)与以随机前沿函数(SFA)为代表的参数方法(高晶晶等, 2018; 王春晓等, 2018)均有涉及。随着我国海水养殖业环境问题日益显现,部分学者开始关注环境因素对海水养殖生产效率的影响,将海水养殖的环境损失作为环境指标,衡量考虑环境因素的海水养殖生产效率,代表性研究包括 Wang 等(2017)、纪建悦等(2017)。此外,部分学者尝试改进非期望产出的测度方法,通过估算海水养殖的污染产出作为非期望产出指标,测度海水养殖生态经济综合效率。Martinez-Cordero 等(2004)在分析墨西哥西北部对虾养殖场全要素生产效率时,将氮、磷盈余纳入考量。秦宏等(2018)通过估算海水养殖业氮、磷污染产出量,以氮、磷作为非期望产出,运用 SBM 模型对我国海水养殖生态经济效率进行测度。相似的研究还有纪建悦等(2019)。

在测度海水养殖效率的基础上,部分学者已尝试探索效率损失因素或影响因素。如 Wang 等(2017)选取技术推广设施水平、养殖结构、规模、渔民培训、技术推广人员教育水平和工厂化养殖比重等作为衡量影响因素的主要指标;秦宏等(2018)在衡量海水养殖生态经济效率的基础上通过变量松弛度分析了海水养殖效率损失因素;许瑶等(2020)在研究中发现养殖人员培训水平、推广人员学历水平和机构密度、经济发展水平的差异是造成我国养殖海域利用效率空间差异的主要因素;纪建悦等(2021)选取养殖水域、养殖方式、养殖种类、推广人员密度以及地区经济发展水平五项指标对我国各海域海水养殖绿色技术效率影响因素进行分析,提出养殖水域、养殖方式和地区发展水平具有正向影响,而养殖种类对其影响是负向的。但囿于海水养殖业统计数据相对匮乏,主要以变量松弛度或现有数据指标或简单折算为基础进行影响因素分析,缺乏从海水养殖业内部、外部影响因素的双重视角的全面分析,即海水养殖产业发展本身的哪些因素造成了海水养殖生态效率的损失?

外部环境对海水养殖生态效率具有什么样的影响?一系列问题尚待研究。

综合前人研究成果,对海水养殖环境影响的研究关注逐渐增多,为后续研究提供了参考。但是,现有研究仅关注海水养殖环境负外部效应的产生,忽视了海水养殖的环境正外部效应。同时,现有对海水养殖生态效率影响因素的分析往往受困于现有统计指标,而难以进行全面的、有针对性的研究。本文首先运用包含非期望产出的 SBM 模型,综合考虑海水养殖环境正负双重外部效应,测算我国沿海省(区、市)2008~2017 年海水养殖生态效率的变化趋势和分布特征,在此基础上运用 Tobit 回归模型,选取海水养殖专业化程度、规模化程度和集约化程度三个变量,衡量海水养殖产业发展的内部因素,与海水养殖技术、经济、管理、外贸等外部环境因素进行综合,对海水养殖生态效率影响因素进行全面分析,以期为我国海水养殖业协调发展提供思路。

1 研究方法与变量选择

1.1 数据包络分析法(SBM): 方法简介与指标选择

(1) 方法简介:

数据包络分析法是基于对评价单元间的相互比较,从投入或者产出方向出发,通过保持决策单元的输入或者输出不变,确定生产前沿面,从而测算出每组评价单元相对效率的非参数分析方法。得益于其原理相对简单、适用范围局限性小、能够分析多投入产出情况的优势,被广泛应用于生态效率评价的研究中。非径向、非角度并包含非期望产出的 SBM 模型是基于对传统数据包络分析 DEA 模型的改进,将无效 DMU 的松弛改进部分在效率值测量中加以体现,同时也可以实现在投入一定的情况下,同时满足期望产出最大化和非期望产出最小化。本文选取非径向、非角度并包含非期望产出的 SBM 模型测度海水养殖生态效率。假设每个沿海省(区、市)海水养殖生态经济系统有 n 个决策单元,有 m 种投入,并同时包含 s_1 种期望产出和 s_2 种非期望产出。其定义矩阵为: $X = [(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad R^{(m \times n)}, x \quad R^m, Y^g = [y_1^g, y_2^g, \dots, y_n^g] \quad R^{(s_1 \times n)}, y^g \quad R^{s_1}, Y^b = [y_1^b, y_2^b, \dots, y_n^b] \quad R^{(s_2 \times n)}, y^b \quad R^{s_2}$, 其中, $x_i > 0, y_i^g > 0, y_i^b > 0$ 。此时的生产可能性集为: $P = \{(x, y^g, y^b) \mid x \geq X\lambda, y^g \geq Y^g\lambda, y^b \geq Y^b\lambda\}$ 。

此时, λ 代表权重向量, $\lambda \in R^n$ 。为使处于不同时期的决策单元间具有可比性,本文将所有生产可能集共同构建生产前沿,将所有时期的生产可能集共同

进行包络。将此 SBM 模型定义为:

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{S_1 + S_2} \left(\sum_{r=1}^{S_1} \frac{S_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{S_2} \frac{S_r^b}{y_{r0}^b} \right)}, 0 \leq \rho^* \leq 1, \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} X_0 = X\lambda + S^- \\ y_0^g = Y^g\lambda - S^g \\ y_0^b = Y^b\lambda + S^b \\ S^- \geq 0, S^g \geq 0, S^b \geq 0, \lambda \geq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中, ρ^* 为严格递减的目标函数, 即所求的海水养殖生态效率值。 S^- 、 S^g 和 S^b 分别代表投入、期望产出和非期望产出的松弛变量。当且仅当 $\rho^*=1$, 且 S^- 、 S^g 、 S^b 同时为 0 时, 可以得到最优解, 此时决策单元有效。

(2) 指标选择:

受海水养殖生物特性及人工调控等因素的共同作用, 海水养殖生产会对海水养殖水域生态环境产生一定的影响, 包括对养殖水域造成的生态环境压力或对养殖水域生态环境的改善。具体来说, 海水养殖生态效率评价指标可以分为三部分(见表 1):

表 1 指标选取和变量说明
Tab.1 Index selection and variable description

指标	指标类别	变量	变量说明
投入	资源投入	面积	海水养殖面积/hm ²
		劳动力	海水养殖专业从业人员数量/人
	养殖渔船数	海洋机动渔船(养殖渔船)	年末拥有量/kW
		海水养殖中间消耗	渔业中间消耗 × $\frac{\text{海水养殖总量}}{\text{渔业总产值}}$
产出	期望产出	产值	各省(区、市)海水养殖产值/万元
		产量	各省(区、市)海水养殖产量/t
		净碳汇量	各省(区、市)海水养殖净碳汇量/t
	非期望产出	氮污染产出量	各省(区、市)海水养殖氮污染产出/t
		磷污染产出量	各省(区、市)海水养殖磷污染产出/t

① 投入指标 参考前人研究, 本文主要选取海水养殖面积、海水养殖从业人员数、海水养殖渔船投入、海水养殖中间消耗作为投入指标。其中, 海水养殖中间消耗由于统计数据缺失, 结合渔业中间消耗以及海水养殖总产值在渔业总产值中的占比, 对海水养殖中间消耗进行折算(王端岗, 2013), 并根据农产品生产资料价格指数调整为 2008 年的可比价格。

② 期望产出指标 海水养殖业的期望产出主

要包含经济价值和生态价值两方面。

选取海水养殖业产值和产量两个指标衡量海水养殖的经济产出, 并根据农业生产者价格指数统一将海水养殖产值调整为 2008 年的可比价格。

生态价值方面, 海水养殖是“渔业碳汇”的重要类型, 在其生产活动中通过养殖生物吸收水体中的二氧化碳, 并以沉积、收获等形式将水体中的二氧化碳转移形成碳汇。本文借鉴邵桂兰等(2019)的研究思路, 以海水养殖业“净碳汇”, 即海水养殖业碳汇量与其碳排放量之间的差值作为指标, 以反映海水养殖对生态环境的真实影响。其中, 海水养殖碳汇作用主要来源于动物固碳和植物固碳两方面, 海水养殖动物(主要指贝类)通过外壳和软组织生长固定水体中的碳, 海水养殖植物(主要指藻类)通过呼吸作用吸收水体中的碳。碳排放主要来源于海水养殖投苗、投饵、采收等过程中机械、渔船的使用。为避免部分省份可能出现净碳汇为负值的情况, 参照沈江建等(2015)的思路, 通过数据矩阵的初等行变换进行处理。

其中, 海水养殖净碳汇指标缺少相应统计数据。具有碳汇功能的海洋生物主要为贝类、藻类、滤食性鱼类等养殖生物, 也包括以藻类和浮游生物类为食的鱼类、甲壳类、头足类和棘皮类水生生物(肖乐等, 2010)。本文借鉴邵桂兰等(2019)的研究方法, 运用干物质质量法估算海水养殖碳汇总量。

$$C_T = \sum C_s + \sum C_a, \quad (3)$$

$$\sum C_s = \sum_{i=1,2} Q_i \cdot \alpha_{ij} \cdot \omega_{ij}, \quad (4)$$

$$\sum C_a = \sum Q_k \cdot \alpha_k \cdot \omega_k, \quad (5)$$

式中, C_T 为海水养殖碳汇总量, $\sum C_s$ 为海水养殖贝类碳汇总量, $\sum C_a$ 表示海水养殖藻类碳汇总量。 Q_i 代表第 i 种生物的产量, α 和 ω 分别代表海水养殖生物的干重系数和固碳系数, i 和 k 代表贝类和藻类的种类, j 代表贝类外壳或软组织。

同时, 以碳排放较为典型的养殖方式为基础, 估算海水养殖碳排出量。具体计算公式为:

$$C_e = P \cdot \mu \cdot \theta_1 + \sum (Q_i \cdot \rho_i + S_i \cdot \eta_i) \cdot \theta_2, \quad (6)$$

式中, C_e 为海水养殖碳排放量, P 代表渔船功率, Q 和 S 分别代表池塘养殖、工厂化养殖的产量、面积或体积。 θ_1 、 θ_2 分别代表柴油和电力的碳排放系数, μ 、 ρ 、 η_i , 则代表不同的能源消耗转化系数。

③ 非期望产出指标 海水养殖生产过程中未被食用的饵料残渣、养殖生物的代谢废物以及投放在养殖水域中的化学药品残留物等排放到自然水体中, 会造成水质污染。本文以海水养殖氮、磷污染产出量作为非期望产出指标, 指标数据结合《水产养殖业污

染源产排污系数手册》以及宗虎民等(2017)的测量数据进行估算得出。计算公式为:

$$S_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K_{ij} P_{ij}, \tag{7}$$

$$P_{ij} = \frac{P_j}{P_T} \cdot P_i, \tag{8}$$

式中, S_T 为污染物产出总量, K_{ij} 为第 i 种养殖品种在 j 养殖方式下的产污系数, P_{ij} 表示第 i 种养殖品种在 j 养殖方式下的产量, P_T 为当年海水养殖总产量, P_j 为 j 养殖方式下的产量, P_i 为第 i 种养殖品种的产量。根据《水产养殖业污染源产排污系数手册》, 以及《中国渔业统计年鉴》对海水养殖品种和养殖方式的划分, i 的取值为 1 到 28 间的整数, j 的取值为 1~5 的整数。

1.2 受限因变量 Tobit 模型: 方法简介与变量选择

(1) 方法简介:

经 SBM 模型测算出来的海水养殖生态效率值在区间[0,1]内, 被解释变量部分连续分布或离散分布, 属于两端删截受限被解释变量, 运用普通最小二乘法估计系数会产生一定的偏误。本文选取由经济学家 Tobin 提出的 Tobit 模型处理受限因变量回归问题, 模型可以描述为:

$$\begin{cases} Y^* = \alpha + \beta X + \varepsilon, Y^* > 0 \\ 0, Y^* \leq 0 \end{cases}, \tag{9}$$

式中, Y^* 表示被解释变量, 本文中为 SBM 模型所测算出的海水养殖生态效率值; α 表示截距项, X 表示解释变量, 本文中为海水养殖生态效率的各项影响因素, β 表示回归系数, ε 为随机扰动项, $\varepsilon \sim N(0, \sigma)$ 。

(2) 变量选择:

海水养殖生态效率的本质反映的是海水养殖经济增长与资源环境影响之间的关系。现有理论尚未形成对海水养殖生态效率影响因素的权威性分析框架, 但前人对经济增长与环境变化关系的相关研究指出, 二者之间的关系不仅受到经济结构的影响, 也与科技水平、国际贸易以及管理政策等方面因素密切相关(胡聃等, 2004)。

结合海水养殖业的产业特征, 分别从内部因素(反映海水养殖业生产结构特征)和外部因素(反映影响海水养殖业发展的外部环境)两方面入手选取解释变量, 以 SBM 模型测算出的各省海水养殖生态效率作为被解释变量, 运用 Tobit 回归分析模型, 分析海水养殖生态效率的影响因素。变量定义见表 2 所示。

外部影响因素:

在 Wang 等(2017)、许瑶等(2020)、纪建悦等(2021)研究的基础上, 主要选取培训强度、科技投入、环境规制、外贸依存度和经济发展水平五个变量进行分析。

表 2 变量定义表
Tab.2 Definitions of the variables

变量类型	变量名称	变量说明
被解释变量	各地区海水养殖生态效率	根据 SBM 模型测算出的各地区海水养殖生态效率
内部因素	专业化程度	海水养殖业专业化指数
	规模化程度	海水养殖业规模化指数
	集约化程度	网箱、工厂化养殖产量/海水养殖总产量
解释变量	培训强度	培训人次/渔业从业人数
	科技投入	海洋科研教育管理服务业增加值*(海水养殖业增加值 ¹⁾ /GDP/海水养殖业增加值
	环境规制	地区环境污染治理投资额*(海水养殖业增加值/地区 GDP)/地区 GDP
	外贸依存度	水产品进出口贸易总额*(海水养殖业总产值/渔业经济总产值)/海水养殖业总产值
外部因素	经济发展水平	地区人均 GDP

注: 1) 由于统计信息变动, 2016~2017 年海水养殖业增加值采用平滑指数法(二次平滑), 根据 2008~2015 年数据进行预测得出

a. 培训强度: 海水养殖生产过程是在人工调控下进行的, 人的知识和能力对海水养殖的生产过程具有重要影响, 而相关技术培训是海水养殖从业者掌握专业知识的主要途径之一, 也是渔业技术推广的主要着力点, 预期为正向影响。

b. 科技投入: 海洋科研教育投入是实现海水养殖技术创新的必要手段, 科研教育水平越强的地区,

越能够提升资源利用效率, 降低环境影响, 预期为正向影响。参照前人做法(秦宏等, 2018), 以海水养殖业增加值占比结合海洋科研教育管理服务业增加值进行折算。

c. 环境规制: 环境规制是海水养殖生产中相关从业者环境行为的重要约束力量, 环境规制强度越高, 越有利于海水养殖生产者经营者采取友好型环

境行为, 从而提升海水养殖生态效率, 预期为正向影响。参照盖美等(2019)研究方式, 选取地区海水养殖环境污染治理投资额占海水养殖产值比重作为代表。

d. 外贸依存度: 商品的流动可以带动生产要素价格均等化, 生产要素的国际流动一定程度上可以带动要素配置更趋合理化, 从而引发企业技术效率变化(薛安伟, 2017), 预期为正向影响。参照纪建悦等(2019)的研究, 以海水养殖产品进出口贸易总额占海水养殖业总产值的比重进行测度。

e. 经济发展水平: 地区经济发展能够为海水养殖产业提供必要的资金、技术以及基础设施支撑, 推动海水养殖业发展, 本文以区域人均 GDP 作为衡量指标, 预期影响为正。

内部影响因素:

选取海水养殖专业化程度、规模化程度和集约化程度三个变量, 研究海水养殖产业结构本身对其生态效率的影响。

a. 专业化程度: 海水养殖业专业化是指一个地区或一个海水养殖生产单位从经营多品种海水养殖生产或加工转向重点经营某一种或某几种海水养殖专业化生产或加工的过程。一般而言, 越具有特殊的地理和气候特征, 或邻近特定消费市场的地区, 越有利于相关生产资源的聚集(杨钧, 2016), 海水养殖专业化程度就越高, 越有利于降低生产成本, 预期为正向影响。借鉴樊福卓(2007)对于地区专业化程度的测度方法, 根据《中国渔业统计年鉴》中对海水养殖产品的五类划分, 构建海水养殖专业化指数来测度海水养殖专业化程度。具体公式如下:

$$SPE = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^5 |S_i^j - S^j|, \quad (10)$$

$$S^j = \frac{\sum_{i=1}^9 E_i^j}{\sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^5 E_i^j}, \quad (11)$$

$$S_i^j = \frac{E_i^j}{\sum_{j=1}^5 E_i^j}, \quad (12)$$

式中, SPE 是专业化指数, i 代表参与评价的 9 个省份, j 代表鱼类、甲壳类、贝类、藻类和其他类五种类型的海水养殖产品, S_i^j 代表 i 省份某年度第 j 种海水养殖生物养殖面积占该地区海水养殖总面积的比重, S^j 代表某年度全国第 j 种海水养殖生物养殖面积占全国

海水养殖总面积的比重, E_i^j 代表第 i 个省份的第 j 个品种海水养殖面积。

b. 规模化程度: 海水养殖规模化经营是指在一定区域范围内, 在市场需求牵引和政府政策导向的共同作用下, 集中了一定规模的水域、资金、劳动力等生产要素, 通过对生产要素进行合理配置, 提高产出效率和经济效益。在当前阶段, 预期规模化程度为正向影响。海水养殖业的投入规模主要体现为对机械(渔船为代表)与养殖水域面积的投入, 因此分别选取人均海水养殖产值(生产能力)、人均海水养殖渔船总动力(机械投入规模)、单位面积水域海水养殖产值和单位面积水域海水养殖渔船总动力等四项指标, 运用熵值法测度各地区海水养殖规模化程度。

c. 集约化程度: 海水养殖集约化是指在一定的区域范围内通过提高要素质量, 优化要素投入和组合等方式提升整体效益的经营方式。现阶段, 我国网箱养殖、工厂化养殖是海水养殖集约化发展的典型代表(董双林, 2015), 因此选取网箱和工厂化养殖产量占海水养殖总产量的比重代表沿海地区海水养殖集约化程度, 预期为正向影响。

2 实证分析: 我国海水养殖生态效率及其影响因素分析

2.1 数据来源

本文数据主要来源于《中国渔业统计年鉴》(2008~2018)、《中国统计年鉴》(2009~2018)、《中国农村统计年鉴》(2009~2018)、《中国海洋统计年鉴》(2009~2018)。其中, 部分数据由于无法从年鉴公开数据中获得, 需要单独进行核算。考虑数据的可得性¹⁾, 本文选取 2008~2017 年我国河北、辽宁、江苏、浙江、福建、山东、广东、广西、海南 9 个沿海省份的数据进行分析, 上海、天津、香港、澳门、台湾由于数据缺失严重, 且其海水养殖产量占比小, 未将其纳入分析。

2.2 我国海水养殖生态影响分析

海水养殖业对生态环境的影响主要分为正向影响和负向影响两部分, 即贝类、藻类养殖过程中所产生的“渔业碳汇”和部分高密度、投饵类养殖方式在养殖过程中所形成的氮、磷污染。根据前文所述方法, 利用我国海水养殖品种以及养殖方式等相关统计数据对海水养殖生态影响进行估算, 结果如图 1 所示。

1) 由于本文撰写期间《中国海洋统计年鉴》(2018 年版本已更名为《中国海洋经济统计年鉴》)最新版仅更新至 2017 年的数据, 因此确定最终年份区间为 2008~2017 年

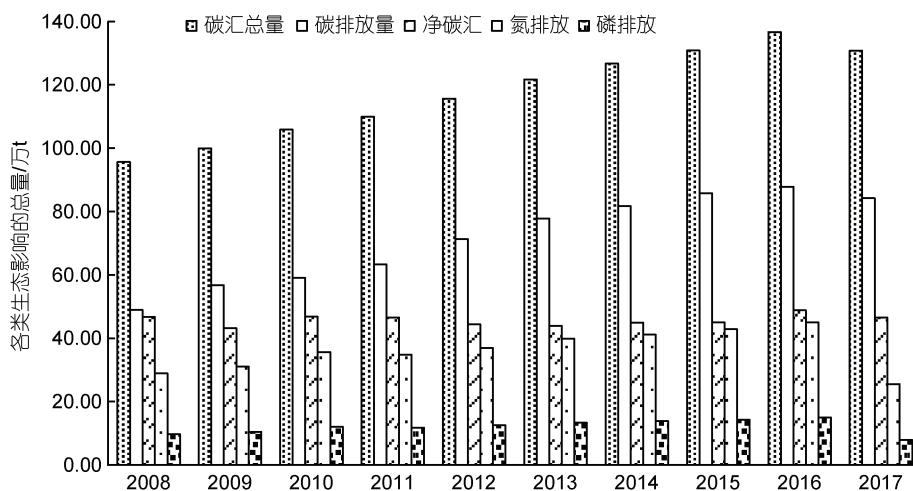


图1 2008~2017年我国海水养殖生态影响与时间变化

Fig.1 Ecological impact and temporal change of mariculture in China from 2008 to 2017

由图1可以看出,从总量上看,我国海水养殖对环境的正向影响远超过对环境的负向影响,即海水养殖碳汇总量远超过氮、磷污染的排放量。说明总体上,我国海水养殖的生态影响以正向的生态改善作用为主。目前我国海水养殖业的品种结构以贝类养殖为主,贝类养殖面积占海水养殖总面积的60%左右。贝类、藻类养殖和收获过程中通过生物体自然生物规律,可以吸收水体中的二氧化碳,并在养殖生物的收获过程中将吸收的二氧化碳转移出水体,或被储存、再利用,因此,也被称为“可移出的碳汇”(唐启升,2011)。同时,贝类养殖对近海水质和浮游植物群落具有重要的调控作用,还能有效减轻水体富营养化和酸化,具有改善区域海洋环境的生态功能。相较而言,海水养殖业的污染问题远低于其形成的生态正效益,一般性的海水养殖产生的氮、磷污染以水污染排放为主,而海水养殖所排放的氮、磷是可以转化为海水水体初级生产力的营养元素,对海洋水环境影响远低于工业污染。仅有个别高密度、投饵型的粗放型养殖模式会对环境造成一定的影响。

2008~2017年间我国海水养殖碳汇总量呈现出逐步上升趋势,海水养殖净碳汇量比较稳定,氮、磷污染水平相对稳定且呈现出下降趋势。说明我国海水养殖的环境正外部效应正在逐步增强,通过海水养殖吸收和移除水体中的碳,发展“碳汇渔业”可以成为改善海洋水环境,服务国家“双碳”战略的重要抓手。同时,在我国近年来海洋生态环境要求不断趋紧的政策背景下,我国海水养殖业污染水平也呈现出了一定的下降趋势。通过加强养殖废水处理,合理调整

海水养殖方式,发展生态健康养殖等形式控制养殖污染是促进海水养殖业健康发展的现实路径。

2.3 我国海水养殖生态效率测算

不同沿海省份的海水养殖生态效率一般认为是可变的,即在规模报酬可变的前提下,寻求期望产出的最大化,以及投入和非期望产出的最小化。根据投入产出指标数据,基于DEA-Solver pro 5.0软件平台,运用包含非期望产出的SBM模型对2008~2017年我国沿海各省份海水养殖生态效率进行测度。结果如表3所示。

从表3测算结果可以看出,2008~2017年我国各沿海省份效率值在0.7以上的47个,占比52.22%,效率值在0.5以上的59个,占比65.56%。说明总体而言,我国海水养殖生态效率相对良好。海水养殖业作为我国渔业产业的重要组成部分,具有高产出的经济特征(唐启升,2011)。海水养殖业的发展不仅能够提供大量的优质蛋白,同时还能够通过海水养殖碳汇发挥良好的生态功能。但从均值来看,2008~2017年间我国各沿海省份海水养殖生态效率均值为0.69,并未达到有效,这说明我国海水养殖业的经济发展与生态环境保护还未达到最佳协调状态。长期以来,我国的海水养殖产量与产值的快速增长是以较高的资源消耗为代价的。虽然海水养殖具有一定的碳汇功能,可以产生环境正外部效应,但同时也对养殖水域环境造成了一定程度的污染。各沿海省份效率均值极差接近0.8,不同省份间效率差异明显。

从时间变化看(图1),全国海水养殖生态效率均值整体呈现波动式上升的趋势。海水养殖生态效率的逐步上升说明我国海水养殖业快速发展的同时,发

表 3 2008~2017 年各省海水养殖生态效率值
Tab.3 Eco-efficiency value of marine aquaculture in each province from 2008 to 2017

省份	所属海域	总体效率	总体排名	各期效率									
				2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
广东	南海	0.99	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.91	1.00	1.00
广西	南海	0.98	2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.80	1.00	0.97	1.00	1.00
福建	东海	0.96	3	1.00	1.00	0.83	1.00	0.81	1.00	0.96	1.00	1.00	1.00
山东	黄、渤海	0.85	4	0.75	1.00	0.48	1.00	0.63	0.71	0.94	1.00	1.00	1.00
海南	南海	0.69	5	1.00	0.30	0.51	0.64	0.52	0.54	0.75	0.62	1.00	1.00
江苏	东海	0.57	6	0.29	0.41	0.30	0.22	0.31	0.83	0.71	0.61	1.00	1.00
浙江	东海	0.47	7	0.54	0.50	0.52	0.47	0.47	0.42	0.43	0.46	0.39	0.53
辽宁	黄、渤海	0.38	8	0.51	0.29	0.32	0.33	0.34	0.36	0.40	0.42	0.46	0.34
河北	黄、渤海	0.99	9	0.37	0.20	0.27	0.26	0.29	0.31	0.33	0.31	0.35	1.00
平均效率*	—	0.69	—	0.72	0.63	0.58	0.66	0.6	0.66	0.72	0.7	0.8	0.87

注: *平均效率为 2008~2017 年各沿海省份海水养殖生态效率的平均数

展质量也在逐渐提升。尤其是 2012 年以来,国家对海洋生态环境治理和保护的高度重视程度不断提升,各项政策措施陆续出台,海水养殖生态效率提升趋势明显。如 2015 年《国务院关于印发水污染防治行动计划的通知》中提出要推进生态健康养殖,同年发布的《中共中央国务院关于加快推进生态文明建设的意见》中明确提出要控制发展海水养殖,科学合理布局,整治生产空间,均对海水养殖生态效率的提升产生了积极影响。2012~2017 年间,我国海水养殖生态效率均值由 0.58 提升至 0.87,增长近 50%,海水养殖生态与经济协调程度快速提升。

从海域分布来看(图 2),不同海域海水养殖生态效率均值存在显著的区域差异,效率值由高到低大致呈现出南海海域>东海海域>黄渤海海域的分布趋势。其中,南海海域海水养殖生态效率最高,2008~

2017 年效率均值达 0.88,考察期内各年份效率均值均在 0.7 以上,效率值呈现高位平稳状态。(1)南海海域海水养殖生态效率最优,主要源于我国南海海域生态环境良好,海域浅海、滩涂资源丰富,海域生产能力较强,有利于减少海水养殖资源投入。从海水养殖产排污系数来看,南海海域的多项养殖品种氮磷污染产排污系数也相应低于其他海域,海水养殖污染水平相对较低,因此其生态效率位列三大海域之首。(2)东海海域海水养殖生态效率居中,接近我国海水养殖生态效率的平均水平,整体呈现出上升趋势,海水养殖经济发展与资源、环境之间逐步趋向协调。东海海域包含的浙江、江苏、福建三省均是我国沿海经济发达省份,海珍品市场空间广阔,致使海水养殖生产结构中名贵海水鱼类的养殖比重较大(秦宏等,2018)。而这部分鱼类的主要特征是经济效益水

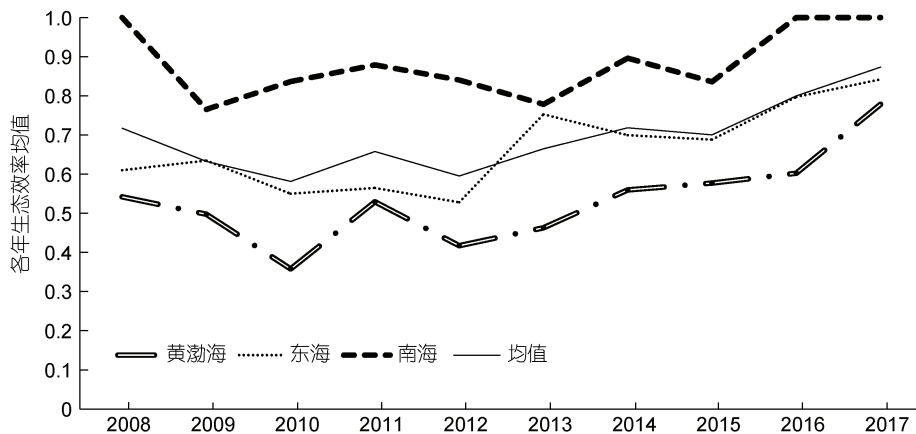


图 2 2008~2017 年我国海水养殖生态效率时间变化

Fig.2 Time variation of ecological efficiency of mariculture in China from 2008 to 2017

平高,但其以网箱养殖为主的养殖方式在所有养殖方式中产排污系数最高,因此造成其高收益、高污染的特征。因此,其海水养殖氮磷污染的非期望产出过多影响了其经济效益的正向作用,效率值在三大海域中居中。(3)黄、渤海海域海水养殖生态效率最差,考察期内效率值始终处于三大海域中的末位,波动较为平缓,其海水养殖发展具有较强的路径依赖。黄、渤海海域是我国海水养殖业发展的核心区域,养

殖历史悠久,海水养殖业规模较大。但长期以来过度依赖于扩大养殖规模、增加要素投入实现产量增长,产业结构升级缓慢,转型发展较为缓慢,致使其海水养殖生态效率损失严重。

2.4 我国海水养殖生态效率影响因素分析

根据我国海水养殖生态效率测度结果,基于 Stata 14.0 软件平台,运用 Tobit 回归模型分析我国海水养殖生态效率的影响因素,回归结果如表 4 所示。

表 4 Tobit 模型回归结果
Tab.4 Results of regression in Tobit model

类别	变量名称	回归结果			
		系数	标准误差	t	P 值
内部因素	专业化程度	-0.453 5	0.095 0	-4.77	0.000***
	规模化程度	0.656 7	0.088 7	7.41	0.000***
	集约化程度	-0.116 1	0.064 0	-1.81	0.074**
	培训强度	-0.178 7	0.048 4	-3.69	0.000***
外部因素	科技投入	0.263 2	0.060 6	4.34	0.000***
	环境规制	0.013 1	0.045 6	0.29	0.775
	外贸依存度	-0.169 7	0.063 7	-2.67	0.009***
	经济发展水平	-0.724 9	0.160 2	-4.53	0.000***
	常数项	3.380 0	1.200 7	2.82	0.006***

注:表格中运用*的数量标识显著性水平检验结果。其中,***表示极显著($P<0.01$),**表示显著($P<0.05$),不标者表示不显著($P\geq 0.1$)

2.4.1 内部因素回归结果

(1) 专业化程度的 P 值小于 0.01, 通过了 1% 水平下的显著性检验, 且系数为负, 说明养殖专业化程度的提升对海水养殖生态效率值具有显著的负向影响。从我国海水养殖业发展来看, 海水养殖生产经营者进行品种选择主要依靠价格驱动, 而目前的高价格水产品重要集中于鱼、虾、蟹类等需要投饲养殖的种

类。2006~2017 年的 11 年间, 我国海水养殖中鱼、虾、蟹类养殖产量占比从 11.43% 上升至 15.25%。虽然, 鱼、虾、蟹类等高价值水产品养殖产量比例的增加可以在一定程度上提升经济效益, 但在更大程度上, 海水养殖种类逐渐向鱼、虾、蟹类等投饲型养殖品种的集中也使海水养殖的污染排放逐渐增加, 由此对海水养殖生态效率产生了负向影响。

(2) 规模化程度的 P 值小于 0.01, 且系数为正, 说明规模化程度对海水养殖生态效率具有显著的正向影响。规模化养殖可以整合分散的生产资源, 改变传统一家一户小规模养殖的生产布局, 通过规模化生产降低生产成本, 实现规模效益。并且, 规模化养殖会大幅增加海水养殖生产者采取短期冒险行为的机会成本, 促使其更加重视其生产经营管理, 及时引进更新环保设

备, 采取绿色安全的生产行为, 以实现可持续性发展。同时, 规模化经营可以将政府管理客体集中整合, 便于政府加强对海水养殖生产的行政管理, 对污染物进行集中排放和处理等方式, 降低海水养殖的环境影响, 因此对海水养殖业效率提升具有正向作用。

(3) 集约化程度的 P 值小于 0.05, 且系数为负, 说明目前海水养殖集约化程度对海水养殖生态效率具有一定程度的负向影响。目前集约化海水养殖主要是通过加大投饲型品种的养殖比重、增加单位面积养殖设施投入、利用投饲技术、增氧技术进行高密度养殖, 从而实现单位水域面积产量增加的经营方式。网箱、工厂化等集约化养殖方式的发展可以有效提升海水养殖单位面积产量和产值, 实现良好的经济效益。但在发展过程中伴随着投饲养殖比例的升高, 导致了养殖排污的大幅增加。同时, 集约化养殖具有能源依赖性, 如工厂化养殖单位产品耗电量为 8.66 kWh/kg, 是池塘养殖的 23 倍, 大幅增加了海水养殖中间消耗(董双林, 2015)。因此, 如何有效解决高排污、高能耗的问题, 是集约化海水养殖持续发展的关键。

2.4.2 外部因素回归结果

(1) 培训强度的 P 值小于 0.01, 且系数为负, 说

明现阶段我国渔业技术培训并未实现提升海水养殖生态效率的效果,甚至具有一定的负向作用。一般而言,技术培训是渔业技术推广的主要着力点,通过组织技术培训,能够促进海水养殖技术的宣传教育推广,引导养殖户学习和了解渔业主导品种和主推技术,提升生产技能。但目前我国渔业技术推广活动主要受到行政干预作用,技术培训以具有普遍性指导意义的内容为主,无法满足被培训对象的多元化技术需求,致使培训内容与实际养殖生产需求脱节(金炜博等, 2015)。此外,现有渔业技术培训多由地区渔业技术推广站为主导,部分渔业技术推广站为达到绩效考核目标,采取发放奖励、报销往返路费等多种形式吸引渔民参与培训,但其中不乏部分非渔户为获取奖励到培训现场“凑人头”,严重影响技术培训的实际效果,过多地参与培训活动也会在一定程度上影响生产活动的顺利进行,由此对海水养殖生态效率产生一定的负向影响。

(2) 科技投入的 P 值小于 0.01, 且系数为正, 说明渔业技术研发投入可以显著提升海水养殖生态效率。纵观我国的五次海水养殖产业浪潮, 每一次海水养殖产业的跨越式发展都是以关键性技术的突破为前提, 渔业技术进步是渔业经济发展的动力源泉。科技投入代表地区对海水养殖科技发展的投入力度, 当地区海洋科研水平越强, 越有利于高效生产技术以及绿色养殖技术等的使用, 从而改善生产环境、降低资源消耗和环境污染、提升生产效率, 推动海水养殖生态效率的增长。

(3) 外贸依存度的 P 值小于 0.01, 且系数为负, 说明其对海水养殖生态效率具有负向影响。外贸依存度代表一个地区海水养殖产品的进出口贸易水平, 水产品贸易是我国唯一一类存在贸易顺差的农产品贸易。地区海水养殖外贸依存度越高, 为提高水产品产量, 海水养殖生产者容易关注短期的经济利益, 忽视环境影响。同时, 在国际贸易中, 发达国家倾向于将高资源消耗、高污染的生产活动通过国际贸易转嫁到发展中国家, 容易对我国海水养殖业造成一定影响。因此, 其对海水养殖生态效率产生显著的负向影响。

(4) 经济发展水平的 P 值小于 0.01, 且系数为负, 说明其对海水养殖生态效率具有负向影响。一般情况下, 经济发展水平的提高在一定程度上有利于刺激海水养殖产品消费, 拉动海产品市场需求, 为海水养殖产品提供广阔的市场空间。但区域经济发展中围海造地、港口建设等二、三产业开发活动会形成对海水

养殖空间的严重挤占, 同时也加剧了区域性环境污染, 影响海水养殖生产环境, 因此对海水养殖生态效率具有负向影响。

(5) 环境规制未通过显著性检验, 说明其对海水养殖生态效率并未产生明显的影响。虽然加大环境规制的强度可以有效治理海洋环境污染, 通过制定养殖尾水排放标准、养殖水体定期抽检等制度有助于约束海水养殖生产经营者的生产行为, 推动其生产中更关注绿色环保, 降低养殖排污水平。但我国目前海水养殖生产仍以一家一户的家庭式小规模经营为主, 大部分个体养殖户受教育程度不高, 生态环境保护意识较差, 更倾向于规避环境保护行为可能造成的生产成本增加, 而相关部门也很难对为数众多的小规模养殖户实施监管, 因此现有小规模经营为主的行业格局下环境规制的作用能力尚未充分体现。

3 结论及建议

3.1 结论

本文采用包含非期望产出的 SBM 模型, 以海水养殖碳汇量作为衡量海水养殖环境正外部效应的期望产出, 以海水养殖氮、磷污染产出量作为非期望产出, 对 2008~2017 年间我国海水养殖生态效率进行测度, 并运用 Tobit 回归模型对海水养殖生态效率的影响因素进行分析。主要得出以下结论: 2008~2017 年间我国海水养殖生态效率相对良好, 且效率值呈现出波动式上升的趋势。但海水养殖生态效率均值为 0.69, 说明总体上我国海水养殖业经济发展与资源、环境之间的协调程度尚未达到最优状态。从空间分布状况来看, 目前我国海水养殖生态效率呈现出阶梯性失衡, 南海海域海水养殖生态效率值最高, 东海次之, 黄、渤海最低。从我国海水养殖生态效率的影响因素来看, 目前我国海水养殖生态效率主要受到海水养殖业规模化程度与科技投入的正向影响以及专业化程度、集约化程度、培训强度、经济发展水平和外贸依存度的负向影响。

3.2 对策与建议

(1) 加快推进海水养殖业转型升级

我国海水养殖经济发展与资源、环境之间的协调程度还不高, 必须转变传统生产方式, 推动产业转型升级。一是合理控制海水养殖业规模。我国海水养殖业生态效率的提升受到规模化程度的显著正向影响, 实现规模化生产可以在一定程度上促进海水养殖业发展。但目前我国养殖规模扩大所带来的经济效益提

升速度已经开始减弱,如1995~2015我国扇贝养殖面积扩大29.28倍,而相应的产量却只增加了1.95倍(董双林,2019)。因此,要适当抑制海水养殖规模的盲目扩张,通过优化生产要素配置,提高生产效率。二是要改进集约化养殖模式,大力发展生态化健康养殖。一方面,要重视对现有集约化养殖方式的生态化改造。在现行工厂化养殖系统中,添加更多的生态因素,如建设阳光工厂化养殖,在养殖单元中加入阳光因素,降低养殖能耗,在养殖池水中栽种大型沉水型植物,从而吸收富余营养物质,实现集约化海水养殖模式的节能减排。另一方面,大力推广以桑沟湾养殖模式等为代表的多营养层次生态养殖模式,利用藻类、滤食性贝类等海水养殖生物的习性,通过贝藻综合养殖更有效发挥海水养殖碳汇功能,实现养殖废物的有效转化利用,提高水体自我修复能力。三是要拓展养殖空间,大力发展离岸、深远海养殖,降低海水养殖对近岸海域的环境影响,缓解与其他产业发展以及城市建设之间的矛盾。

(2) 提升海水养殖技术研发和推广水平

实证分析结果显示,政府科技投入对我国海水养殖生态效率具有正向促进作用。为此,需重视海水养殖科技研发,加大研发资金投入力度,完善涉海科研激励机制,打通科研机构与市场对接渠道,强化科研力量对海水养殖业发展的引领和支撑作用。同时,培训强度的影响作用为负,主要是由于现有培训针对性较差,培训效果不佳。因此,为充分发挥养殖技术培训作用,应进一步改善培训方式,综合考虑养殖户的知识基础和接受能力,选择灵活多样的培训推广模式。创新培训方式,通过发放调查问卷、实地走访调研等方式了解养殖主体的培训需求,根据实际需求合理安排培训内容,增强培训效果。并且,要重视专业化技术培训,积极组织海水养殖病害防治技术、苗种选育技术、优质饲料选择和推广、绿色清洁化生产等关系海水养殖生产效率提升和绿色发展关键领域的技术培训。

(3) 加大水产品进出口与环境管理力度

一方面要适度控制水产品进出口贸易规模。通过一定的经济手段限制高资源消耗型或高污染型海水养殖品种的出口规模,适当扩大其进口贸易,缓解环境压力。注重调整优化进出口水产品结构,制定和完善水产品绿色贸易清单,通过出口退税、差别化关税等手段,以资源消耗和污染排放为依据指导水产品进出口结构调整与升级。同时,要加强对海水养殖生

产的环境规制力度,综合运用命令型和激励型环境政策,强化末端治理和源头控制,加强政府环境政策的执行与管理能力。加快落实养殖污水达标排放制度,严格执行养殖废水排放标准,通过市场手段淘汰海水养殖业中对环境污染较严重的落后产能。另外,要鼓励企业、媒体、公众等多元环境主体参与海洋环境治理,提升养殖环境治理效果。

参 考 文 献

- 王春晓,李森,2018.基于DEA和SFA的我国海水养殖技术效率[J].海洋开发与管理,35(4):9-15.
- 王端端,2013.中国水产养殖业的生产效率及其影响因素研究[J].海洋开发与管理,30(2):94-98.
- 许瑶,纪建悦,许玉洁,2020.中国养殖海域利用效率空间非均衡格局及成因[J].资源科学,42(11):2158-2169.
- 纪建悦,许瑶,李艳明,2021.中国养殖海域绿色技术效率测度及其影响因素分析[J].科技管理研究,41(5):205-212.
- 纪建悦,李艺菲,2019.我国海水养殖业绿色技术进步测度及其影响因素研究[J].中国海洋大学学报(社会科学版)(2):45-50.
- 纪建悦,曾琦,2017.考虑非期望产出的中国海水养殖业全要素生产率研究——基于Global Malmquist-Luenberger指数[J].中国海洋大学学报(社会科学版)(1):43-48.
- 杨钧,2016.城镇化发展与农村产业结构调整相互关系研究[D].长沙:湖南大学.
- 肖乐,刘禹松,2010.碳汇渔业对发展低碳经济具有重要和实际意义 碳汇渔业将成为新一轮渔业发展的驱动力——专访中国科学技术协会副主席、中国工程院院士唐启升[J].中国水产(8):4-8.
- 沈建建,龙文,2015.负产出在DEA模型中的处理——基于软件DEAP的运用[C]//第十届(2015)中国管理学年会论文集.合肥:中国管理集约化研究会:1-6.
- 邵桂兰,孔海峰,李晨,2019.中国海水养殖的净碳汇及其与经济耦合关系[J].资源科学,41(2):277-288.
- 林东年,古新标,冯波,2007.基于DEA的茂名市渔业生产技术效率评价[J].茂名学院学报,17(3):70-73.
- 金炜博,汪艳涛,高强,2015.沿海地区水产技术推广体系分析及优化研究[J].中国渔业经济,33(6):60-67.
- 宗虎民,袁秀堂,王立军,等,2017.我国海水养殖业氮、磷产出量的初步评估[J].海洋环境科学,36(3):336-342.
- 胡聃,许开鹏,杨建新,等,2004.经济发展对环境质量的影响——环境库兹涅茨曲线国内外研究进展[J].生态学报,24(6):1259-1266.
- 秦宏,张莹,卢云云,2018.基于SBM模型的中国海水养殖生态经济效率测度[J].农业技术经济(9):67-79.
- 徐敬俊,覃恬恬,2018.基于Malmquist指数的广东省海水养殖生产效率的实证分析[J].海洋开发与管理,35(11):98-103.
- 高晶晶,史清华,卢昆,2018.中国海水养殖技术效率测评[J].农业技术经济(1):132-144.
- 唐启升,2011.碳汇渔业与又好又快发展现代渔业[J].江西水产科技(2):5-7.

- 盖美, 展亚荣, 2019. 中国沿海省区海洋生态效率空间格局演化及影响因素分析[J]. 地理科学, 39(4): 616-625.
- 董双林, 2015. 论我国水产养殖业生态集约化发展[J]. 中国渔业经济, 33(5): 4-9.
- 董双林, 2019. 多维视角下的新时代水产养殖业发展[J]. 水产学报, 43(1): 105-115.
- 韩立民, 2018. 我国海洋事业发展中的“蓝色粮仓”战略研究[M]. 北京: 经济科学出版社.
- 樊福卓, 2007. 地区专业化的度量[J]. 经济研究, 42(9): 71-83.
- 薛安伟, 2017. 国际直接投资与进出口对技术效率的影响——基于中国省际面板数据的实证分析[J]. 世界经济研究(2): 78-87, 136.
- KARAGIANNIS G, KATRANIDIS S D, TZOUVELEKAS V, 2000. Measuring technical, allocative and cost efficiencies of seabass and seabream farms in Greece [J]. Aquaculture Economics & Management, 4(3/4): 191-207.
- MARTINEZ-CORDERO F J, LEUNG P, 2004. Sustainable aquaculture and producer performance: measurement of environmentally adjusted productivity and efficiency of a sample of shrimp farms in Mexico [J]. Aquaculture, 241(1/2/3/4): 249-268.
- WANG P P, JI J Y, 2017. Research on China's mariculture efficiency evaluation and influencing factors with undesirable outputs—an empirical analysis of China's ten coastal regions [J]. Aquaculture International, 25(4): 1521-1530.

FACTORS ON ECOLOGICAL EFFICIENCY OF MARICULTURE IN CHINA

ZHANG Ying¹, HAN Li-Min^{1,2}, QIN Hong^{1,2}

(1. School of Management, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Institute of Marine Development, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract In recent years, how to realize the coordinated development of mariculture economy and ecology has gradually attracted academic attention. Previous studies on the ecological efficiency of mariculture focused more on the negative environmental factors in mariculture but less considered the positive effects. Taking carbon sequestration as the expected environmental output of mariculture and nitrogen and phosphorus pollution of mariculture as the unexpected output, we calculated the ecological efficiency of mariculture in China from 2008 to 2017 by using the SBM (slacks-based measure) model that includes the unexpected output. In addition, using Tobit regression model, three indexes of mariculture specialization degree, production scale, and intensification degree are employed as the internal factors to measure the ecological efficiency of mariculture, while science and technology, economy, management, and foreign trade are used as external factors to comprehensively investigate the impact factors on mariculture ecological efficiency. The results show that during the study period, the ecological efficiency of mariculture in China showed a fluctuating upward trend, but it had not reached the optimal state as a whole. There is a significant stepped regional imbalance in the average ecological efficiency of mariculture in different sea areas. The scale of mariculture and the level of scientific and technological management have a positive impact on the ecological efficiency of mariculture. The degree of specialization, intensification, training intensity, economic development level, and dependence on foreign trade have a negative impact on the ecological efficiency of mariculture. The impact of mariculture environmental regulation on the ecological efficiency of mariculture is not significant. Finally, we proposed some countermeasures and suggestions to improve the ecological efficiency of mariculture in China from the aspects of optimizing the development mode, increasing the investment into scientific and promoting technological R & D, and intensifying the import and export of mariculture and environmental management.

Key words ecological efficiency of mariculture; dual environmental external effects of mariculture; influence factor; SBM model; Tobit regression