

文章编号: 1674-5566(2024)06-1463-10

DOI: 10.12024/jsou.20230504187

基于CSW-DEA的贝藻类养殖业碳汇效率与碳吸收配额分析

郑建明¹, 刘康¹, 汪雪铭¹, 任乐²

(1. 上海海洋大学 经济管理学院, 上海 201306; 2. 宁夏回族自治区农产品质量安全中心, 宁夏 银川 750002)

摘要: 为了探究海水养殖业的碳汇机理,以贝、藻养殖碳汇为研究对象,运用4种效率分析模型对我国贝藻类养殖业的碳汇效率作出评价。结果表明:在沿海各地中,辽宁省贝藻类的养殖过程不仅注重实践生产中的效率值,也比其他地区更关注实际投入产出过程中的效果现实程度,能将可移出碳汇的“生态-经济-社会”综合效益最大化地实现,对于其他区域具有一定的示范作用;广西的劳动力投入规模和土地投入规模存在严重失衡,并且对应着“高效率低效果”的贝藻类养殖投入产出,其专业从业人员的管理方式存在低效率;海南省贝藻类碳汇量产出率十分有限,其碳汇效应对海南省经济、社会及生态系统的影响不显著。另外,基于投入产出规模的公共权重方法,提出我国贝藻类养殖业中二氧化碳的初始吸收额度的分配方案。本文的边际贡献在于:首次将绩效型综合效率模型应用到贝藻类养殖碳汇的测算,使碳汇值兼顾效率和效果;且以基于公共权重的投入产出规模角度提出贝藻类养殖碳汇的碳吸收配额;通过公共权重方式,将效率因素纳入碳吸收配额,用投入产出规模和效率相结合来分配碳吸收配额,补充了基于DEA的新的分配方法。对我国沿海地区渔业碳汇发展和碳交易市场机制的完善具有一定政策意义。

关键词: 贝藻类养殖碳汇;数据包络分析;绩效型综合效率;碳吸收配额

中图分类号: F 326.4 **文献标志码:** A

20世纪70年代至今,全球碳排放与经济增长成正比,工业化和经济全球化加剧了各国碳排放。碳排放议题超越环保范畴,触及经济发展权利与国际政治角力的核心。各国对减少碳排放达成了不同程度的共识,我国政府积极履行国际责任与义务,习近平总书记提出中国的二氧化碳排放在2030年之前达到峰值,在2060年之前实现碳中和的两个阶段奋斗目标^[1]。除了减少环境中二氧化碳的排放量,增加环境中二氧化碳的固定量也是达成“双碳目标”的重要途径。

唐启升院士首次提出了“碳汇渔业”概念,即利用渔业手段促进水体中二氧化碳的吸收固定,并通过渔业收获过程将其移出水体^[2]。张继红等^[3]研究指出,大型藻类如海带、紫菜能将无机碳转换为有机碳,而滤食性贝类则通过摄食减少颗粒有机碳,其形成的贝壳富含碳酸钙,实现碳的埋藏。研究强调,中国大规模的贝藻养殖对浅海

碳循环的影响是明显的,成为一个“可移出的碳汇”。

让可移出的碳汇资源呈现出“生态-经济-社会”效益是碳汇渔业成为双碳目标显著驱动力的核心内容。这要求加速海洋碳汇资源的资本化,吸引更多私人投资,增加渔民收益。在国家层面需制定海洋渔业碳汇市场发展战略,评估碳汇潜力,特别是建立海水养殖碳汇核算体系,作为生态保护修复监测基础和推动碳交易及生态产品价值实现的关键。目前,众多研究采用碳综合系数法评估海洋碳汇渔业的固碳能力,通过考虑生物量转换、成分比例等因素估算碳汇量。BOLTON、STOLL及国内学者纪建悦、王萍萍从物质质量角度证实了贝藻类的显著碳汇潜力^[4-5]。许冬兰等^[6]运用此方法结合超效率SBM模型分析了中国沿海地区近十年的碳汇效率及其空间特征,并探讨了影响因素的空间相互作用。孙康

收稿日期: 2023-05-20 修回日期: 2024-08-07

基金项目: 农业农村部现代农业产业技术体系建设专项(CARS-46)

作者简介: 郑建明(1975—),男,博士,教授,研究方向为渔业经济与管理、海洋环境治理。E-mail: jmjzheng@shou.edu.cn

通信作者: 任乐, E-mail: renle1004@126.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

等^[7]采用碳综合系数法,并根据碳税法和人工造林法测算海水养殖碳汇经济价值,研究表明,2008—2017年碳汇量和经济价值均呈上升趋势,2017年经济价值达到91.8亿元。邵桂兰等^[8]针对中国沿海省份,聚焦贝类和藻类,详细计算了2008—2015年的碳汇贡献。张榭榭等^[9]应用Super-SBM模型进一步分析了中国海洋碳汇渔业的绿色效率。总之,这些研究共同强调了碳综合系数法在评估海洋碳汇中的广泛应用及贝藻养殖的碳汇重要性。

此外,渔业碳汇交易市场构建难题重重。一者,全球范围内,海洋渔业碳汇交易机制的研究理论与实践均十分稀缺;二者,我国碳交易市场初兴,实证分析样本时段有限,抑制了海洋渔业碳汇机制的探索。然而,碳汇交易机制和交易市场的建立健全是让可移出的碳汇资源呈现出经济效益的重要前提。碳排放交易遵循科斯定理,基于市场机制,以优化市场均衡和资源配置为目标,将二氧化碳排放权视为一种特殊的公共商品^[10]。碳排放配额的初始分配一直是市场交易机制构建过程的重点和难点,数据包络分析(DEA)为这一问题提供了新的效率分析观点。AN等^[11]根据DEA的分配方法分配了中国省际碳排放配额。分配结果表明,该方法可以用最少的费用分配碳排放配额。LI等^[12]提出了一种集成合作博弈的DEA方法来解决碳减排配额分配问题,结果表明,五大子产业和广东、山东两省将分配10%以上的二氧化碳减排配额。冯青等^[13]考虑各省份的投入产出规模,提出了一种基于公共权重(Common set of weights, CSW)的DEA方法分配我国各省份的碳排放配额,结果显示,只有以投入产出规模为基础的分配方法,才能兼顾各省的投入和产出,提高分配后的效率。作者认为碳吸收与碳排放是一个能相互转化的命题,多“吸收”意味着让“排放”处于强势地位。因此,本研究借鉴碳排放交易,通过提出的碳吸收配额构建渔业碳汇市场,释放渔业碳汇红利的经济价值。

综上所述,一方面,作者发现对我国贝藻类养殖业碳汇能力测度和评价的研究已较为丰富,本研究在贝藻类的碳汇核算方面仍采用碳综合系数法,但在渔业碳汇效率评价上与以往的碳汇效率评价研究不同,本研究通过贝藻类碳汇的绩效型效率分析来反映目标的渔业碳汇效率,绩效

型效率分析关注了我国贝藻类养殖业碳汇能力的两个方面——效率与效果,以期为中国海水养殖业的绿色发展评价提供新的参照模式。另一方面,作者聚焦于渔业碳汇交易市场的构建,基于省际海洋碳汇的可交易属性,参考碳排放交易中的碳排放配额研究,提出渔业碳汇市场交易中的碳吸收配额构想,采用CSW-DEA方法以评估各地贝藻类养殖的二氧化碳吸收配额,为各地进行跨省的碳汇交易或者是省内的行业之间的碳汇交易提供实现基础,释放相关地区贝藻类养殖业的碳汇红利,为渔业碳汇领域中的生态产品的价值实现提供新的思路,并进一步促进我国碳交易市场的完善与相关机制的建立。

1 研究方法与数据来源

DEA是一种评价具有多个投入和产出的同质决策单元(Decision-making unit, DMU)性能的非参数方法^[14],起源于FARRELL在1957年对单一投入和单一产出的技术效率研究,随着研究者对DEA分析法的进一步探究,DEA分析法的纵向发展迅速,有CCR(规模报酬不变的DEA模型)、BCC(规模报酬可变的DEA模型)、三阶段DEA模型和超效率DEA模型等更加完善的DEA分析法应运而生,现已广泛应用于各个行业和区域的效率测算,例如中国银行的效率分析和企业运营效率研究等。本研究将使用基于DEA模型的4种不同的效率评价方法考量我国沿海地区的渔业碳汇能力,并以投入产出规模为导向,确定各地区的碳吸收额度。

1.1 指标选择与数据处理

将我国沿海9个地区(河北、辽宁、江苏、浙江、福建、山东、广东、广西、海南)当作9个DMU,由于我国海水养殖业碳汇能力的主要来源是贝类和藻类,因而选取贝藻类养殖专业从业人员和贝藻类养殖面积作为每个DMU的投入指标。关于产出指标,主要有产量和产值,鉴于贝类产品的质量主要集中于外壳部分,可食用部分的质量占比较低,因而用产量指标作为产出并不能真实反映海水养殖的经济贡献,故选取贝藻类的产值作为产出指标之一,另一个产出指标则为贝藻类的碳汇总量。在SBM效率模型和Super-SBM模型中,贝藻类的碳汇量作为非期望产出,贝藻类的经济产值作为期望产出。

由于《2022中国渔业统计年鉴》中没有直接提供贝藻类养殖专业从业人员数量和贝藻类的产值,所以借鉴张樾樾等^[9]的研究,将贝藻类养殖面积占海水养殖总面积的比例作为权数,乘以海水养殖从业人员数,近似替代贝藻类从业人员数,用权数乘以海水养殖业产值替代贝藻类

的经济价值。另外,测算贝藻类碳汇总量时将贝类分为蛭、蛤、扇贝、贻贝、牡蛎及其他贝类,将藻类分为紫菜、江蓠、海带、裙带菜及其他藻类。借鉴张继红等^[3]的研究确定贝藻类碳汇系数、贝类贝壳和软组织干湿系数及质量比重,测算所有贝藻类的碳汇总量。

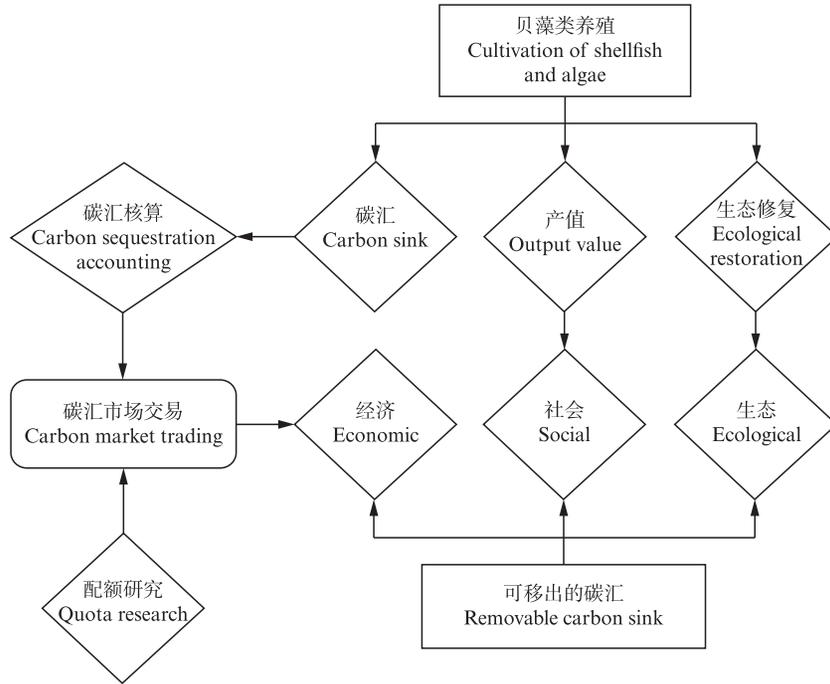


图1 可移出碳汇的“生态-经济-社会”效益
Fig. 1 "Ecological-economic-social" benefits of removable carbon sinks

应用DEA进行分析时应该保证DMU的数量是投入产出指标的至少2倍以上^[15],本文DMU个数为9个,而投入产出指标为4个,因而满足适用条件。另外,投入指标和产出指标之间应该具有显著的正相关关系,以避免出现某投入指标数量增加却引起产出指标数量减少的情况^[15]。经过计算,贝藻类养殖面积与贝藻类产值的Pearson相关系数为0.560,通过了10%显著水平下的检验,贝藻类养殖面积与贝藻类碳汇量的Pearson相关系数为0.642,通过了10%显著水平下的检验;贝藻类养殖专业从业人员数与贝藻类产值的Pearson相关系数为0.890,通过了1%显著水平下的检验,贝藻类养殖专业从业人员数与贝藻类碳汇量的Pearson相关系数为0.859,通过了1%显著水平下的检验。因而,可认为投入指标与产出指标具有显著的正相关关系,适合进行DEA分析。以上提及的有关数据见表1。

1.2 投入产出公共权重的确定

许多学术研究都探讨了确定公共权重的问题。杨锋等^[16]开发了一种利用公共权重DEA模型对决策单元进行排序的技术,以解决效率评估不可比性的问题。JOSÉ建立了一个标准参照组,可作为其他决策单元的参照目标^[17],从而构建了一个模型得出的公共权重计算DMU的效率分数。总之,各种DEA研究提出了确定CSW的3种主要方法。第一种方法是将一个共同的DMU作为所有DMU的参考,从而减少偏差总和^[18];第二种方法是采用多目标规划程序来确定CSW,确保所有DMU同时最大化其效率分数^[19];第三种方法是以整体效率为指导原则,通过最大化DMU的投入和产出来实现最高效率,这意味着将DMU的总和作为整个组织的投入和产出,以便在遵守生产可能性限制的前提下最大化组织效率的CSW^[13]。本文为了让碳吸收配额分配方式更容易被各DMU所接受,进而确立相对应的渔业碳汇交易机制,

需要综合衡量贝藻类养殖业的投入与产出指标, CSW 方法。因而选取冯青等^[13]的基于投入产出规模确立的

表 1 各地区 2021 年投入产出数据
Tab. 1 Input-output data by region for 2021

地区 Regions	贝藻类产值 Value of shellfish and algae production/10 ⁴ 元	贝藻类总碳汇量 Total carbon sink of shellfish and algae/t	贝藻类养殖专业从业人员数 Number of persons specialising in shellfish and algae farming/人	海水养殖面积 Mariculture area/hm ²
河北 Hebei	1 073 078	41 950	15 322	69 294
辽宁 Liaoning	2 923 964	225 537	40 290	451 648
江苏 Jiangsu	2 607 958	55 421	32 893	144 533
浙江 Zhejiang	1 539 562	113 114	29 786	51 728
福建 Fujian	7 453 651	386 612	171 658	124 977
山东 Shandong	7 407 054	418 069	110 890	420 030
广东 Guangdong	2 749 773	169 747	42 007	63 265
广西 Guangxi	1 408 532	99 551	75 136	36 519
海南 Hainan	180 139	2 173	3 962	2 096

借鉴冯青等^[13]的基于投入产出规模确立的 CSW 方法, 设共有 n 个 DMU, 第 k 个 DMU 消耗 h 个不同投入 $x_{ik}(i=1, 2, \dots, h)$ 产生 s 个不同的产出 $y_{rk}(r=1, 2, \dots, s)$, 则对应的投入产出规模 W_k 表达式为

$$W_k = W_k^P + W_k^O = \sum_{i=1}^h v_i \times x_{ik} + \sum_{r=1}^s u_r \times y_{rk} \quad (1)$$

式中, 权重为 (v_i, u_r) , 满足线性约束:

$$\begin{cases} \text{Max } \lambda = \sum_{r=1}^s u_r \times \sum_{k=1}^n y_{rk} \\ \text{s.t.}: \textcircled{1} \sum_{i=1}^h v_i \times \sum_{k=1}^n x_{ik} = 1 \\ \textcircled{2} \sum_{r=1}^s u_r \times y_{rk} - \sum_{i=1}^h v_i \times x_{ik} \leq 0, \forall k \\ \textcircled{3} v_i, u_r \geq 0, \forall i, r \end{cases} \quad (2)$$

在线性约束(2)式中, λ 代表组织的整体效率, 本研究的 n 取值为 9; s 取值为 2; h 取值为 2, 带入表 1 中的投入产出数据, 利用数学软件 Lingo18.0 解此线性关系组得到 $v_1=0.183$; $v_2=0.003$; $u_1=0.002$; $u_2=0.009$ 。其中, 贝藻类养殖面积的权重为 0.003, 贝藻类养殖专业从业人员数的权重为 0.183, 贝藻类产值的权重为 0.002, 贝藻类碳汇量的权重为 0.009。

2 基于 DEA 的贝藻类碳汇效率测算

DEA 研究者对决策单元绩效的评价主要涉及这些决策单元的投入产出效率^[14, 20-21]或投入产出绩效^[22-23]。面对诸如此类的 DEA 效率与绩效研究, 王晓磊等^[23]指出, 工程学概念的效率与

作为管理学概念的绩效之间存在差异。他们认为绩效是一个综合考虑效率与效果因素的决策单元投入产出状况评价指标, 在评价决策单元的投入和产出时, 绩效既包括效率, 也包括效果, 效率衡量决策单元投入产出状况的有效性, 效果衡量的是决策单元投入产出目标的实现程度。

为了能兼顾考量贝藻类养殖业碳汇能力的效率与效果, 将借鉴王晓磊等^[23]的绩效型效率评价模型, 并将该模型下的结果与 BCC 模型下的 DEA 综合效率结果、SBM 模型结果和 Super-SBM 模型结果做一个对比分析。由于该绩效型效率评价模型的适用范围是投入与产出指标的公共权重已完全确立的决策单元, 所以在本文 1.2 节中已经先确立了各个决策单元投入产出的公共权重。 θ_{BCC} 模型是基于变动规模报酬情形下, 用来衡量纯技术和规模效率。SBM 模型由 TONE 提出, 它对效率衡量的结果是不受衡量投入和产出项所用单位的影响, 此外, 效率值与每个投入和产出的差额是单调递减的。Super-SBM 模型将超效率和 SBM 模型结合起来, 不仅能解决输入输出的非零松弛问题, 还能针对 SBM 模型中效率值为 1 的项进行再次计算, 从而区分更加相对有效的 DMU 的效率。 θ_{CE} 是王晓磊等^[23]的绩效型效率评价模型。

2.1 BCC 模型

$$\begin{cases} \min[\theta - \varepsilon(e^T S^- + e^T S^+)] \\ \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n x_j \lambda_j + S^- = \theta X_0 \\ \quad \quad \sum_{j=1}^n y_j \lambda_j - S^+ = Y_0 \\ \quad \quad \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \\ \quad \quad S^- \geq 0, S^+ \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

BCC模型的最优解为 $\lambda, S^-, S^+, \theta$ 。其中 x 表示投入变量; y 表示产出变量; θ 表示径向优化量; ε 是非阿基米德无穷小量(通常取 $\varepsilon=10^{-6}$)。 S^- 和 S^+ 表示松弛变量: S^- 表示投入冗余,即现有产出下可以减少的投入量, S^+ 表示产出不足,即现有投入情况下可以增加的产出量。

特别说明:若 $\theta < 1$,则非DEA有效;若 $\theta = 1$,且 $S^- = S^+ = 0$,则说明DEA有效;若 $\theta = 1$,且 $S^- \neq 0$ 或者 $S^+ \neq 0$,则说明弱DEA有效。

2.2 SBM模型和Super-SBM模型

SBM模型和Super-SBM模型在公式上的区别在于SBM的公式为等式约束,Super-SBM的公式为不等式约束,这里给出Super-SBM模型的数学表达式。

$$\begin{aligned} \min \rho &= \frac{1}{1 - \frac{1}{q} \sum_{r=1}^q \frac{s_r^+}{y_{rk}}} \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- \leq x_{ik} \\ &\sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j + s_r^+ \geq y_{rk} \\ &\lambda, s^-, s^+ \geq 0 \\ &i=1, 2, \dots, m; r=1, 2, \dots, q \\ &j=1, 2, \dots, n (j \neq k) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中: ρ 为最优解效率值; x 表示投入变量; y 表示产出变量; m, q 为投入和产出变量的个数; n 为决策单元的个数; S^- 和 S^+ 表示投入、产出的松弛变量。特别说明:当 $\rho \geq 1$ 时说明决策单元有效,当 $\rho < 1$ 时说明决策单元还有改进空间。

2.3 θ_{CE} 模型

设 $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$ 为被评价的各个DMU, x 与上文一样表示投入, y 则表示产出。 $x_k \in R_h^+, y_k \in R_s^+, k=1, 2, \dots, n$ 。记 T_{BCC} 为由这些DMU生成

的BCC型生产可能集, $A(x_k \in R_h^+)$ 为DMU投入指标的CSW, $E(y_k \in R_s^+)$ 为DMU产出指标的CSW。在属于 T_{BCC} 的DMU中,定义DMU的投入成本为 $\|x\| = A^T * x$,产出价值为 $\|y\| = E^T * y$,那么对给定的第 k 个DMU (x_k, y_k) 的绩效定义为 $\|y_k\| / \|x_k\|$,DMU的绩效型综合效率定义为

$$\theta_{CE} = (\|y_k\| / \|x_k\|) / \max_{(x, y) \in T_{BCC}} (\|y\| / \|x\|) \quad (5)$$

θ_{CE} 既能通过CSW体现评价的目的性和评价标准的统一性,又能通过生产可能集约束体现投入产出活动在工程技术上的可实现性,同时还能以效率形式反映当前投入产出状态的绩效与最优投入产出绩效的差距,因而 θ_{CE} 是一个基于管理学与工程学双重视角、将综合评价理论与数据包络分析方法相结合的决策单元投入产出绩效评价指标^[23]。

根据王晓磊和木仁等给出的绩效型综合效率的定义,代入数据,测算2021年各地区贝藻类养殖碳汇的绩效型综合效率并排序;同时,使用SPSSAU在线分析软件对基于DEA分析的BCC、SBM和Super-SBM模型下的效率进行测算并排序。具体计算结果见下表2。

3 贝藻类的碳汇效率分析及配额设置

3.1 贝藻类的碳汇效率分析

表2中的 $\theta_{SBM}, \theta_{BCC}, \theta_{CE}$ 和 θ_{S-SBM} 分别表示各决策单元在不同模型下的渔业碳汇效率值,排序(1)、(2)、(3)、(4)则是按照各模型效率值大小的纵向比较而得。

首先,Super-SBM模型得出的效率值是在SBM模型效率的基础上,对SBM效率值为1的山东省、福建省、江苏省、广东省和海南省进行相对有效的DMU的再区分测算,该再区分的结果显示江苏省、广东省和海南省的渔业碳汇效率值为null,即表明在考虑投入冗余时,只有江苏省、广东省和海南省的渔业碳汇效率值仍为DEA强有效,而山东省和福建省则表现出投入项的松弛值大于0,且山东省在专业从业人员数方面的投入冗余大约是福建省的33倍,在养殖面积方面的投入冗余大约是福建省的3.6倍,所以福建省的 θ_{S-SBM} 值为0.987,山东省的 θ_{S-SBM} 值为0.873。

表2 测算结果
Tab. 2 Result of calculation

地区 Regions	θ_{SBM}	排序(1) Arrange in order(1)	θ_{BCC}	排序(2) Arrange in order(2)	θ_{CE}	排序(3) Arrange in order(3)	θ_{S-SBM}	排序(4) Arrange in order(4)
河北 Hebei	0.701	2	0.942	3	0.928	5	0.701	4
辽宁 Liaoning	0.492	4	1.000	1	1.000	1	0.492	6
江苏 Jiangsu	1.000	1	1.000	1	0.981	3	null	1
浙江 Zhejiang	0.671	3	0.931	4	0.810	6	0.671	5
福建 Fujian	1.000	1	1.000	1	0.641	7	0.987	2
山东 Shandong	1.000	1	0.965	2	0.955	4	0.873	3
广东 Guangdong	1.000	1	1.000	1	0.988	2	null	1
广西 Guangxi	0.454	5	0.881	5	0.297	9	0.454	7
海南 Hainan	1.000	1	1.000	1	0.575	8	null	1

其次,从各模型效率值的纵向比较来说, θ_{BCC} 效率值的整体变化情况最小,最大值为1,有辽宁省、江苏省、福建省、广东省和海南省;渔业碳汇效率最低的是广西,效率值为0.881,效率最高值与最低值的差值仅为0.119,表明各地区渔业碳汇效率差异不明显。但 θ_{SBM} 效率值显示,广西渔业碳汇的效率值最低,为0.454,与最大值1相差0.546,差距过半,表明各地区渔业碳汇效率差异明显。究其本质, θ_{SBM} 效率值对比 θ_{BCC} 效率值的最大差异在于将贝藻类碳汇量作为非期望产出,即当广西将贝藻类碳汇量作为非期望产出后,其效率值从0.881降低为0.454,表明碳汇量对广西的投入产出效率影响显著,若将贝藻类产生的碳汇融入碳交易市场,那么广西的贝藻类养殖额外产生的经济收益巨大,可移出碳汇发挥的生态修复意义也同样巨大。同理,辽宁省的 θ_{BCC} 与 θ_{SBM} 的差值为0.508,是整组DMU间差值最大的,表明贝藻类的碳汇交易对辽宁省的意义比其他各地区都更为重要,能将可移出碳汇的“生态-经济-社会”效益最大化地实现。

最后,从各模型效率值的横向比较来说,有3个地区的效率值变化十分明显,分别是辽宁、广西和海南。辽宁省的 θ_{BCC} 效率值和 θ_{CE} 效率值都为1,属于模型中的DEA强有效,皆呈现规模报酬固定状态,且在各自模型的排序中均为第一名,这表明辽宁省的渔业碳汇效率不仅注重实践生产中的效率值,也关注实际投入产出过程中的效果现实程度,加之其 θ_{SBM} 效率值与 θ_{BCC} 效率值的差值最大,因而判断辽宁省是其他DMU的终极学习目标;广西效率值的大小虽然在排序(1)、排序

(2)、排序(3)中皆为最后一名,但不同模型下的效率值差异较大,其 θ_{SBM} 值为0.454, θ_{BCC} 值为0.881, θ_{CE} 值为0.297。广西 θ_{BCC} 与 θ_{SBM} 的显著差值肯定了广西贝藻类养殖产生渔业碳汇的重要作用,但极低的 θ_{CE} 值表现出传统综合效率评价与投入产出绩效型效率评价的不同,在原始数据中,会发现广西在贝藻类养殖中投入的劳动力(贝藻类养殖专业人员)远大于其投入的养殖面积(贝藻类养殖面积),劳动力投入约为土地投入的2倍,表现出两种投入规模的不合理性。虽然广西的产出指标并不算低,但其 θ_{SBM} 值与终极决策单元辽宁省的 θ_{SBM} 值仅差0.04,加之极低的 θ_{CE} 值,暴露出广西对应着的“高效率低效果”,换句话说,就是广西的贝藻类养殖碳汇能力的“高效率”是靠劳动力的大量投入累积起来的,从绩效型综合效率的表征含义来看,“低效果”则对应着管理活动目的实现程度偏低,即贝藻类养殖专业从业人员的管理方式或许存在低效性,当然,其中的管理模式机制是否真正存在相关问题需要进一步深入探究。另外,在 θ_{S-SBM} 模型中,广西投入指标的松弛变量(42 852和13 670)远大于0,这表明同其他省份相比,在保持产出不变的条件下,广西的投入要素可大力削减;海南省在 θ_{SBM} 和 θ_{BCC} 中的效率值均为1,这表明将碳汇量作为非期望产出计入海南省贝藻类的投入产出过程,并未降低该省的渔业碳汇效率值,暴露出海南省贝藻类碳汇量产出率十分有限。在表1中的原始产出数据,海南省与其他DMU的碳汇量根本不在一个量级,至少有大于10倍的差距,表明海南省贝藻类养殖产生的碳汇功能对海南省的经济、社会和

生态贡献十分有限。另外,同广西类似,海南省的劳动力投入约为土地投入的1.9倍,表现出两种投入规模的不合理性,是令其 θ_{ce} 值不高的一个先天性因素,也即表明海南省贝藻类的投入产出目标的实现程度偏低。

3.2 贝藻类的碳汇配额设置

借鉴碳排放交易的做法,创造性地提出用配额来处理贝藻类养殖业的碳吸收能力,并在此基础上构建渔业碳汇市场。这将把各地的渔业碳汇纳入我国的碳交易市场,通过发挥市场的资源配置能力,使贝藻类的碳汇得到充分利用。

碳吸收和碳排放是对立的过程。目前,研究问题主要集中在碳排放配额上,然而,作者认为碳吸收配额和碳排放配额是可以互换的概念,增

加吸收量将使排放处于更有利的位置。因此,在确定9个DMU被要求的二氧化碳吸收总量 G 时,基于投入产出规模的CSW-DEA方法将为沿海地区海养碳汇的初始吸收配额提供一个分配方案,即:

$$f_k = (W_k / \sum_{z=1}^n W_z) \times G \times 100\% \quad (6)$$

式中: W_k 为第 k 个DMU的投入产出规模; $\sum_{z=1}^n W_z$ 为整组DMU的投入产出规模; G 为所给定的二氧化碳被吸收总量;则 f_k 为第 k 个DMU分得的碳吸收额度,此处 $n=9$,同时,在表3中给出按投入规模和产出规模分配的额度,该额度分配方案以分配比例的形式给出,所以 G 的具体值在这里无需考虑。

依据(1)式、(2)式和(6)式,本文的碳吸收配额结果见表3。

表3 各种碳吸收配额结果
Tab. 3 Results of various CO₂ absorption quotas

地区 Regions	河北 Hebei	辽宁 Liaoning	江苏 Jiangsu	浙江 Zhejiang	福建 Fujian	山东 Shandong	广东 Guangdong	广西 Guangxi	海南 Hainan
按投入产出规模分配额度 Allocation by size of inputs and outputs	3.30%	9.89%	7.25%	5.78%	29.88%	23.90%	8.88%	10.47%	0.66%
按投入规模分配额度 Allocation by size of input	3.02%	8.76%	6.48%	5.63%	31.91%	21.64%	7.91%	13.91%	0.73%
按产出规模分配额度 Allocation by size of output	3.70%	11.53%	8.37%	6.00%	26.92%	27.20%	10.29%	5.44%	0.56%

在表3中,3种碳配额分配方式的共同点在于各规模分配方式使用的公共权重一样,皆由公式(2)得到,该公共权重既是测算绩效型渔业碳汇效率值的重要前提,又是得出表3各种碳配额分配方式的重要数据。公共权重作为绩效型效率和碳吸收配额之间的重要桥梁,让效率最优先天性的纳入到表3中的各种分配方式,赋予各分配方式具有管理学和工程学的双重视角,使得上述分配方式天然兼顾实际生产活动的效率和效果。换言之,不论采用表中哪种分配方式,对于渔业碳汇效率来说都是最优的选择。

3种碳配额分配方式的不同点在于规模类型不同,基于不同的规模类型得到的配额结果也不相同。基于投入规模的碳配额分配只依赖于各地区的投入消耗,而不依赖于其他因素(如各地区的产出),并且无论各地区的产出是多少,某地区投入的规模越大,分配的碳吸收配额也就越多。但是,若A地区与B地区的所有投入相同,且

A的产出值却远大于B,那么按照投入规模分配,A与B的碳吸收配额分配比例应当相等。然而,在实际中,决策者考虑到A地区的更优表现会下意识地分配更多的比例给A。同理,基于产出规模的碳配额分配方式则以产出值的多少作为分配准则,忽略了相关的投入消耗。总之,不管是基于投入规模的分配还是基于产出规模的分配,都不能得到令人满意的分配。因为这两种分配方式要么仅取决于投入,要么仅取决于产出。从表3中可知,各地区基于投入产出规模分配的比例是在基于投入规模分配和基于产出规模分配之间,因为按照投入产出规模的碳配额分配方式综合衡量了各个DMU的投入指标和产出指标,将较大的资源/成本分配给投入产出较大的DMU,同理,较小规模的DMU获得较小的资源/成本,投入产出越大,碳吸收配额分配越大,反之亦然,这是更合理且可接受的分配方式。

综上所述,3种碳配额分配方式具有相同点

和不同点。相同的公共权重使渔业碳汇效率达到最优;不同的规模类型中,基于投入产出规模的分配方式显然更为合理。在构建渔业碳汇市场中,针对碳配额分配方式可以考虑将投入产出规模和绩效型效率相结合来分配碳配额,即表3所给的按投入产出规模分配的方式,该分配更容易被执行和接受。

表3的贝藻类碳汇初始吸收配额结果是采用《2022中国渔业统计年鉴》的相关数据基于当年国家渔业碳汇效率最大化而得到的,所以该配额结果的初始年份便是2021年。之后,能够以2021年为基期,各地区根据当年和未来的碳汇交易的实际情况,增加或减少形成自己专属的“碳汇可吸收额度池”,融入碳汇交易市场,释放海水养殖业的碳汇红利。利用该配额结果,使碳吸收成果转化为碳排放增益,释放生态产品价值将是进一步研究的重点。

4 结论和政策建议

4.1 结论

以我国沿海9个地区的贝藻类养殖业发展为研究对象,评价了基于DEA模型的4种渔业碳汇效率,传统DEA模型下的效率结果与绩效型模型下的效率结果在渔业碳汇效率值的排序上颇有不同。研究表明:辽宁省贝藻类的养殖过程不仅注重实践生产中的效率值,也比其他地区更关注实际投入产出过程中的效果现实程度,且贝藻类的碳汇交易对辽宁省的意义比其他各地区都更为重要,能将可移出碳汇的“生态-经济-社会”效益最大化地实现。综合来看,辽宁省是其他DMU的终极学习目标;广西的劳动力投入规模和土地投入规模存在严重失衡,并且对应着“高效率低效果”的贝藻类养殖投入产出,其专业从业人员的管理方式存在低效性;海南省贝藻类碳汇量产出率十分有限,贝藻类养殖产生的碳汇功能对海南省的经济、社会和生态贡献十分有限,且其投入产出目标的实现程度偏低。

4.2 政策启示

在考虑如何利用沿海地区贝藻类养殖的碳红利时,作者认为碳吸收与碳排放是一个能相互转化的命题。通过对碳排放配额的研究,我们能对沿海地区贝藻类养殖业碳汇的初始吸收额度进行配额,该配额将根据CSW-DEA方法的投入

产出规模确定,使每个地区都能以2021年为基期形成自己独特的“碳汇可吸收额度池”,为渔业碳汇交易市场的构建提供一定的思路。

基于本文对贝藻类碳汇效率的分析和碳吸收配额结果的测算,提出如下建议:第一,合理配置劳动力和土地的生产投入,提升绿色海养技术。在劳动力投入方面,要加大碳汇渔业专业人才培养力度,鼓励企业与涉海高校建立碳汇渔业人才库,积极培育复合型、跨领域专业人才;在土地投入方面,亟须打破传统贝藻类养殖模式,建立高效生态养殖模式,推进养殖生产信息化建设,注重数字化等新型高效技术在养殖生产过程中的应用,大力提高养殖面积的使用效率,促进贝、藻养殖全面增汇。第二,关注地区自然禀赋差异,多路径组合提升贝、藻养殖业的碳汇效率。我国沿海各地区的海养特性具有先天差异,要厘清各地区比较优势,清楚各地区不同路径增汇的能力大小,并鼓励养殖业主结合市场需求适度提高贝藻类养殖比重,实现产量结构的优化,进而探索碳汇效益进一步释放的组合路径与创新模式。第三,基于本研究的碳吸收初始配额设置,积极构建渔业碳汇市场,探索渔业碳汇交易新模式。以往的许多政策和研究都致力于建设“碳排放”端的碳汇交易市场,本文却关注到“碳吸收”端的养殖碳汇红利。因而,提出构建以碳吸收初始额度为基础的符合我国国情的渔业碳汇交易模式,激发海洋碳汇渔业生态红利,优化渔业碳汇的产权制度安排和碳汇交易平台设计,构建全国蓝碳交易体系。另外,要加强碳汇交易与金融机构的合作,积极推动创新渔业碳汇金融产品,进一步促进海洋渔业碳汇红利释放。

参考文献:

- [1] 习近平. 习近平在“领导人气候峰会”上的讲话(全文)共同构建人与自然生命共同体——在“领导人气候峰会”上的讲话[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(5): 1-2.
XI J P. Speech at the Leaders' Climate Summit (full text) Jointly building a community of life between human beings and nature -- Speech at the Leaders' Climate Summit[J]. Environmental Science and Management, 2021, 46(5): 1-2.
- [2] 肖乐, 刘禹松. 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, 2010(8): 4-8.
XIAO L, LIU Y S. Carbon sink fishery is of great

- importance and practical significance to the development of low carbon economy. Carbon sink fishery will become the driving force of the new round of fishery development - Interview with Tang Qisheng, Vice Chairman of China Association for Science and Technology and Academician of Chinese Academy of Engineering [J]. *China Fisheries*, 2010(8): 4-8.
- [3] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 359-365. ZHANG J H, FANG J G, TANG Q S. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 359-365.
- [4] BOLTON C T, STOLL H M. Late Miocene threshold response of marine algae to carbon dioxide limitation [J]. *Nature*, 2013, 500(7464): 558-562.
- [5] 纪建悦, 王萍萍. 我国海水养殖业碳汇能力测度及其影响因素分解研究[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(6): 871-878. JI J Y, WANG P P. Research on China's mariculture carbon sink capacity and influencing factors [J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(6): 871-878.
- [6] 许冬兰, 宋晓敏, 郭宇钦. 中国海水养殖净碳汇效率的空间演进与外溢效应[J]. *海洋开发与管理*, 2023, 40(2): 56-66. XU D L, SONG X M, GUO Y Q. Spatial evolution and spillover effect of net carbon sink efficiency of mariculture in China [J]. *Ocean Development and Management*, 2023, 40(2): 56-66.
- [7] 孙康, 崔茜茜, 苏子晓, 等. 中国海水养殖碳汇经济价值时空演化及影响因素分析[J]. *地理研究*, 2020, 39(11): 2508-2520. SUN K, CUI X X, SU Z X, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of the economic value for mariculture carbon sinks in China [J]. *Geographical Research*, 2020, 39(11): 2508-2520.
- [8] 邵桂兰, 刘冰, 李晨. 我国主要海域海水养殖碳汇能力评估及其影响效应——基于我国9个沿海省份面板数据[J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2614-2625. SHAO G L, LIU B, LI C. Evaluation of carbon dioxide capacity and the effects of decomposition and spatio-temporal differentiation of seawater in China's main sea area based on panel data from 9 coastal provinces in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2614-2625.
- [9] 张樾樾, 郑珊, 余粮红. 中国海洋碳汇渔业绿色效率测度及其空间溢出效应[J]. *中国农村经济*, 2020(10): 91-110. ZHANG X X, ZHENG S, YU L H. Green efficiency measurement and spatial spillover effect of China's marine carbon sequestration fishery [J]. *Chinese Rural Economy*, 2020(10): 91-110.
- [10] STAVINS R N. Experience with market-based environmental policy instruments [J]. *Handbook of Environmental Economics*, 2003, 1: 355-435.
- [11] AN Q X, WEN Y, XIONG B B, et al. Allocation of carbon dioxide emission permits with the minimum cost for Chinese provinces in big data environment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 886-893.
- [12] LI F, EMROUZNEJAD A, YANG G L, et al. Carbon emission abatement quota allocation in Chinese manufacturing industries: an integrated cooperative game data envelopment analysis approach [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2020, 71(8): 1259-1288.
- [13] 冯青, 吴志彬, 徐玖平. 基于投入产出规模的省际碳排放配额分配研究[J]. *中国管理科学*, 2023; 31(3): 268-276. FENG Q, WU Z B, XU J P. Research on inter-provincial carbon emission allowance allocation based on input-output scale [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023; 31(3): 268-276.
- [14] 庞瑞芝. 我国主要沿海港口的动态效率评价[J]. *经济研究*, 2006(6): 92-100. PANG R Z. Dynamic evaluation of main sea ports in China's mainland based on DEA model [J]. *Economic Research Journal*, 2006(6): 92-100.
- [15] COOK W D, RAMÓN N, RUIZ J L, et al. DEA-based benchmarking for performance evaluation in pay-for-performance incentive plans [J]. *Omega*, 2019, 84: 45-54.
- [16] 杨锋, 杨琛琛, 梁樑, 等. 基于公共权重DEA模型的决策单元排序研究[J]. *系统工程学报*, 2011, 26(4): 551-557. YANG F, YANG C C, LIANG L, et al. Ranking decision making units using common-weight DEA model [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2011, 26(4): 551-557.
- [17] RUIZ J L, SIRVENT I. Common benchmarking and ranking of units with DEA [J]. *Omega*, 2016, 65: 1-9.
- [18] LIU F H F, PENG H H. Ranking of units on the DEA frontier with common weights [J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(5): 1624-1637.
- [19] DAVOODI A, REZAI H Z. Common set of weights in data envelopment analysis: a linear programming problem [J]. *Central European Journal of Operations Research*, 2012, 20(2): 355-365.
- [20] 赵林, 张宇硕, 焦新颖, 等. 基于SBM和Malmquist生产率指数的中国海洋经济效率评价研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(3): 461-475. ZHAO L, ZHANG Y S, JIAO X Y, et al. An evaluation of Chinese marine economy efficiency based on SBM and malmquist productivity indexes [J]. *Resources Science*, 2016, 38(3): 461-475.
- [21] 蒋萍, 王勇. 全口径中国文化产业投入产出效率研究——基于三阶段DEA模型和超效率DEA模型的分析[J]. *数量经济技术经济研究*, 2011, 28(12): 69-81. JIANG P, WANG Y. Research on China's cultural industries' input-output efficiency under the whole scope

- angle [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2011, 28(12): 69-81.
- [22] 高杨淑涵, 陈璇. 中国海洋捕捞业碳排放效率与经济高质量发展耦合协调关系研究[J/OL]. *上海海洋大学学报*, 2024: 1-20. (2024-07-18). https://www.shhydxxb.com/shhy/article/abstract/20240404483?st=recent_adopted.
- GAOYANG S H, CHEN X. A study on the coupling and coordination relationship between carbon emission efficiency of China's marine fishing fisheries and high quality economic development[J/OL]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2024: 1-20. (2024-07-18). https://www.shhydxxb.com/shhy/article/abstract/20240404483?st=recent_adopted.
- [23] 王晓磊, 木仁, 周黎, 等. 一种兼顾效率与效果的决策单元投入产出绩效评价方法[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(10): 128-135.
- WANG X L, MU R, ZHOU L, et al. An evaluation method of input-output performance of decision making units considering efficiency and effect[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(10): 128-135.

Analysis of carbon sink efficiency and carbon absorption quota in shellfish and algae aquaculture based on CSW-DEA

ZHENG Jianming¹, LIU Kang¹, WANG Xueming¹, REN Le²

(1. *College of Economics & Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 2. *Center of Agro-products safety and quality of Ningxia, Yinchuan 750002, Ningxia, China*)

Abstract: In order to investigate the carbon sink mechanism of marine aquaculture, the carbon sink of shellfish and algae aquaculture was taken as the research object, and four efficiency analysis models were applied to evaluate the carbon sink efficiency of shellfish and algae aquaculture in the coastal areas of China. The results of the study show that among the coastal areas, the shellfish and algae farming process in Liaoning Province not only pays attention to the efficiency value of practical production, but also pays more attention to the realistic degree of the effect of the actual input and output process than other regions, which can bring the "ecological-economic-social" benefits of removable carbon sinks into full play, and has a certain demonstration effect for other regions; In Guangxi, there is a serious imbalance between the scale of labor input and the scale of land input, which corresponds to the input and output of shellfish aquaculture with "high efficiency and low effectiveness", and the management of its professional practitioners is inefficient; in Hainan Province, the output rate of shellfish carbon sinks is very limited, and the function of carbon sinks generated by shellfish aquaculture makes very little economic, social and ecological contribution to Hainan Province. The economic, social and ecological contribution of shellfish aquaculture to Hainan Province is negligible. In addition, based on the public weighting method of input-output scale, the allocation scheme of the initial CO₂ absorption credit in shellfish aquaculture in China is proposed. The marginal contributions of this paper lie in the following. Firstly, applying the performance-based integrated efficiency model to the measurement of shellfish aquaculture carbon sinks for the first time makes the value of carbon sinks can take account into both efficiency and effectiveness. Secondly, it proposes the carbon absorption quota of shellfish aquaculture carbon sinks from the perspective of input-output scale based on the public weighting approach. Thirdly, it incorporates the efficiency factor into the carbon absorption quota by means of the public weighting approach, and allocates carbon absorption quota with the combination of input-output scale and efficiency. It supplements the new allocation method based on DEA. The research has certain policy significance for the development of fishery carbon sinks in China's coastal areas and the improvement of the carbon trading market mechanism.

Key words: shellfish and algae aquaculture carbon sinks; data envelopment analysis; performance-based integrated efficiency; carbon sequestration quotas