

# 养殖贝类碳汇价格核算研究

温瑞<sup>1</sup>, 张继伟<sup>1</sup>, 高超<sup>1</sup>, 高宇<sup>1</sup>, 羊艳<sup>2</sup>

(1. 自然资源部第三海洋研究所 厦门 361005; 2. 西南交通大学 成都 611756)

**摘要:** 养殖贝类是最有效的生物固碳方式之一, 其碳汇功能作为海洋生态系统功能的一部分, 兼具生态和经济属性, 碳汇价格的核算可为海水贝类养殖产业补贴提供数据参考, 提高碳汇养殖产业的生产积极性, 对海洋 GEP 核算等提供一定借鉴。目前碳汇价格研究较为缺乏, 碳汇价格受限于碳汇计量方法的不完善, 因此文章基于碳储量变化原理, 对养殖环境中的养殖贝类固碳基础公式进行改进, 补充了附着贝类固碳与生物沉积物固碳两个计算参数, 以此为切入点选取并改进海洋牧场碳汇定价方法, 以东方云溪海洋牧场作为研究区进行案例计算, 结果为: 海湾扇贝、栉孔扇贝与褶牡蛎的碳汇价格分别为 165 元/t、185 元/t 和 272 元/t; 使用改进后的碳汇计量方法得到的养殖贝类单位个体固碳量较高, 其中生物沉积固碳对提高单位个体固碳量的作用最为突出, 约占贝类自身固碳的 91%, 主要与养殖海域的水文条件有关; 较高的固碳量形成了较低的碳汇价格, 固碳量与成本收益因素共同影响养殖贝类的碳汇价格; 长远来看, 碳汇价格会随着固碳计量的愈加完善而降低。

**关键词:** 养殖贝类; 碳汇计量; 碳汇价格; 海洋牧场

中图分类号: P74; F307.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2022)03-0016-08

## Study on Carbon Sink Price Accounting of Farmed Shellfish

WEN Rui<sup>1</sup>, ZHANG Jiwei<sup>1</sup>, GAO Chao<sup>1</sup>, GAO Yu<sup>1</sup>, YANG Yan<sup>2</sup>

(1. The Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** Farming shellfish is one of the most effective ways of biological carbon sequestration, whose carbon-sink function was one part of marine ecological system function, with both ecological and economic properties. Carbon price accounting can provide reference data for seawater shellfish aquaculture industry subsidies, increase carbon sink aquaculture industry production enthusiasm, and provide certain reference to marine GEP accounting. However, there is a lack of research on carbon sink prices at present, and carbon sink prices of cultured shellfish are limited by imperfect carbon sink measurement methods. Therefore, based on the principle of carbon storage changes, this paper improved the basic formula for carbon sequestration in farming shellfish

收稿日期: 2021-05-21; 修订日期: 2022-02-17

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901105).

作者简介: 温瑞, 硕士, 研究方向为环境经济、生态补偿

通信作者: 张继伟, 教授级高工, 博士, 研究方向为环境经济学、环境规划与管理

aquaculture environment, and two calculation parameters of attached shellfish carbon sequestration and biological deposits were added as a starting point to select and improve the pricing method of carbon sequestration in marine ranch, the selection of the Dongfang Yunxi sea ranch was calculated as a case study, the result was: The carbon sink prices of bay scallop, *Chlamys farreri* and wrinkled oyster were 165 yuan/t, 185 yuan/t and 272 yuan/t, respectively. The carbon sequestration per unit of cultured shellfish obtained by the improved carbon sink measurement method was relatively high. Among them, the effect of bio-sediment carbon sequestration on increasing the carbon sequestration per unit was the most prominent, accounting for about 91% of the shellfish's own carbon sequestration. It was related to the hydrological conditions of aquaculture sea areas; higher carbon sequestration results in lower carbon sequestration prices, and carbon sequestration and cost-benefit factors together affected the carbon sequestration price of cultured shellfish. In the long run, carbon sequestration prices will decrease as carbon sequestration metering becomes more perfect.

**Keywords:** Cultured shellfish, Carbon sink metering, Carbon sink price, Marine ranch

## 0 引言

在我国大力发展低碳经济的背景下,一方面通过减排措施减少向大气中排放二氧化碳;另一方面通过生物固碳技术增汇成为当前热门领域<sup>[1-2]</sup>。随着海洋生物固碳作用逐渐进入人们的视野,养殖贝类的碳汇功能和碳汇价值受到更多关注。养殖贝类具有很强的滤水能力,提高水体二氧化碳分压的能力,促使养殖水域吸收更多二氧化碳,降低大气中二氧化碳浓度<sup>[3]</sup>;其净固碳能力是森林的10倍,产生的直接碳汇量是海藻养殖产生碳汇量的1.5倍<sup>[4]</sup>。因此贝类养殖能有效提高海水养殖的碳汇效率,是最具扩增潜质的碳汇活动之一,是未来可产业化的蓝碳项目<sup>[5-6]</sup>。

当蓝碳交易市场建立,碳汇产品有完善的计量体系和定价机制时,蓝碳将发展成为一种符合经济系统运行规律的具有经济价值的高效生产活动<sup>[7-8]</sup>。但是由于当前我国没有形成一套独立自主的蓝碳交易体系,养殖贝类碳汇交易市场作为蓝碳交易体系下的分支,更是面临定价难、价格研究缺乏的问题。主要原因在于:碳汇总量的全面测定是定价的前提,但当前养殖贝类固碳的基础计量方法与标准方面相对薄弱,固碳计量指标的不完善造成估算值与实际值之间较大的误差,制约了定价研究的发展。

因此本研究对学界普遍使用的养殖贝类固碳基础计量方法进行改进,选取合适的海洋牧场碳汇定价方法并结合案例计算,探讨总固碳量与成本收益等因素对养殖贝类碳汇价格的影响。有利于丰富养殖贝类碳汇核算领域的基础研究,使贝类养殖产业的生态服务价值通过碳汇交易得到补偿,促进渔民增收;在海洋生态系统生产总值(GEP)核算过程中提供借鉴,对渔业碳汇的生态服务价值核算提供一定参考。

## 1 养殖贝类碳汇核算方法研究

碳汇计量是碳汇价格核算的前提,当前养殖贝类碳汇计量相关研究主要基于碳储量变化法基本原理构建,固碳基础公式计量指标不够完善,即计量指标仅包含了养殖贝类的贝壳与软体部分固碳,缺乏附着生物固碳与生物沉积物固碳两个方面的计量,不能较为全面地体现养殖贝类的全部固碳过程。目前学界对于碳汇定价的研究缺乏,碳汇定价方法还在积极的探索中。沈金生等<sup>[9]</sup>借鉴国外的森林碳汇定价思路初步构建了海洋牧场碳汇的定价方法,得到了海洋牧场的碳汇价格,但此定价方法在碳汇计量版块与学界普遍使用的养殖贝类碳汇计量基础公式存在同样的计量指标不完善的问题。本章分两个部分,先后介绍养殖贝类固碳计量方法的改进与海洋牧场碳汇定价方法的改进过程。

### 1.1 养殖贝类总固碳计量方法改进

当前学界对养殖双壳贝类碳汇的计量普遍基于碳储量变化法构建计量公式。虽然计量公式在形态上有一定区别,但总体计量思路一致,即在一个养殖周期内,通过养殖贝类收获的碳储量减去养殖贝类放苗的碳储量,得到养殖贝类的固碳总和。具体基础公式如下:

$$C_X^B = [(\alpha_{it} \cdot m_{it} - \alpha_{it_0} \cdot m_{it_0}) + (\beta_{it} \cdot n_{it} - \beta_{it_0} \cdot n_{it_0})] \quad (1)$$

式中:  $C_X^B$  为某养殖贝类在一个培育期  $T$  内的总固碳量;  $\alpha_{it}$ 、 $\beta_{it}$  分别代表第  $i$  种养殖贝类贝壳和软体组织的含碳系数;  $\alpha_{it_0}$ 、 $\beta_{it_0}$  分别代表第  $i$  种养殖贝类放苗时苗种的贝壳与软体组织含碳系数;  $m_{it}$ 、 $n_{it}$  分别代表第  $i$  种贝类养殖品种贝壳和软体组织干重;  $m_{it_0}$ 、 $n_{it_0}$  分别代表第  $i$  种养殖贝类苗种的贝壳和软体组织干重。(注:若无人工育苗过程,则  $\alpha_{it_0}$ 、 $\beta_{it_0}$  与  $m_{it_0}$ 、 $n_{it_0}$  可省去)。

上述养殖贝类固碳基础公式存在的不足之处体现在仅对养殖贝类自身的贝壳与软体固碳量进行计量,并未将贝类在养殖环境中的 3 个固碳过程体现出来,即缺乏附着生物与生物沉积物固碳两个部分的计量指标。一部分原因是疏忽,另一部分原因则主要是由于附着生物因海域的不同,在品种、数量分布方面存在较大差异,优势附着物种的固碳机理研究不足,统计难;而生物沉积物受海水动力作用,沉积速率与扩散范围等沉积物通量变化较大,加之没有准确评估的数据计量标准导致增加了这部分的碳汇计量难度。综上,附着生物与生物沉积物这两个部分在碳汇计量过程中被普遍忽视或遗漏。本研究基于养殖贝类固碳过程与养殖环境的密切关联性,以养殖贝类一个养殖期为时间尺度,参考 2017 年经海洋标准委员会审定的行业标准——《养殖贝类碳汇计量方法:碳储量变化法》的基本原理,在学界普遍使用的养殖贝类固碳基础公式中补充了附着生物固碳与生物沉积物固碳两个指标参数,养殖贝类固碳基础公式改进如下。

#### 1.1.1 可移出碳汇计量模型

附着生物与养殖贝类占据相同的生态位,与养殖贝类一同从海水中收获的一部分为滤食性双壳

贝类,如紫贻贝 (*Mytilus edulis*) 和褶牡蛎 (*Alectryonella plicatula*) 等,另一部分为以海鞘 (*Pyrosomella verticillata*) 为代表的脊索动物及其他物种。除了滤食性双壳附着贝类,目前对海鞘等脊索动物固碳机理的相关基础研究较少,因此本研究参考贝类软体部分的固碳计算方法把海鞘纳入附着生物固碳量计算;滤食性双壳附着贝类与养殖贝类具有大致相同的碳收支方式,其固碳量计算的基本原理与养殖贝类大致相同,可借鉴养殖贝类固碳基础公式。

附着生物的种类与数量因海域的不同存在较大差异,需结合所在养殖海域的实际调查数据与其他学者研究得到的经验值与经验公式来降低平均附着率数据的不确定性。附着生物的平均附着率可用其总重量占养殖笼(养殖挂绳)总重量的比值获得<sup>[10]</sup>。本节将附着生物固碳与养殖贝类固碳合并为养殖贝类可移出碳汇,补充后的养殖贝类可移出碳汇的计量模型为:

$$\sum S_1 = \sum S_j + \sum I_j \quad (2)$$

$$\sum S_j = P_j (R_{st} \cdot \omega S_{st} + R_s \cdot \omega S_t) \quad (3)$$

$$\sum I_j = \omega_j \cdot P_j (F_{st} \cdot \omega F_{st} + F_s \cdot \omega F_s) \quad (4)$$

式中:  $\sum S_1$  为补充后的养殖贝类可移出碳汇总固碳量;  $\sum S_j$  为第  $j$  种养殖贝类的贝壳与软体组织的总固碳量;  $\sum I_j$  为第  $j$  种附着生物的贝壳与软体组织的总固碳量;  $P_j$  为第  $j$  种养殖贝类的产量;  $R_{st}$  为养殖贝类软体组织质量比重;  $R_s$  为养殖贝类贝壳组织质量比重;  $\omega S_{st}$  与  $\omega S_t$  分别为养殖贝类软体组织碳含量和贝壳碳含量;  $\omega_j$  为第  $j$  种附着生物的平均附着率;  $F_{st}$  为附着生物软体组织质量比重;  $F_s$  为附着生物贝壳质量比重;  $\omega F_{st}$  与  $\omega F_s$  分别为附着生物软体组织和贝壳的碳含量(在对海鞘等脊索动物进行固碳量计算时将海鞘整体视为软体进行计算)。

#### 1.1.2 生物沉积物固碳计量模型

学界一般通过生物沉积速率得到的生物沉积物总量与碳含量的乘积法,来估算养殖贝类生物沉积物的总固碳量。但用此方法得到的估算结果比实际要大,原因是未考虑到生物沉积物从产生到沉降至海底的过程中会受到海水动力作用等原因产生物质溶失现象。实际上只有一部分最终到达海

底形成沉积碳库,只有到达海底碳埋藏的部分才能算是真正意义上的生物沉积固碳<sup>[11]</sup>。因此本节从养殖贝类的生物沉积物有机碳埋置的角度出发,初步建立了两种生物沉积物总固碳量计量模型:

$$\sum BC = FR_i \cdot C_i \cdot B \quad (5)$$

或

$$\sum BC = Voc_i \cdot N_i \cdot T \cdot B \quad (6)$$

式中: $\sum BC$ 为贝类的生物沉积总碳量; $FR_i$ 为第*i*种贝类1个养殖期内的生物沉积总质量; $C_i$ 为第*i*种贝类的生物沉积物含碳比重; $B$ 为生物沉积物沉降到海底的有机碳埋置率。 $Voc_i$ 为第*i*种贝类的有机碳沉积速率; $N_i$ 为第*i*种贝类的总个数; $T$ 为养殖时间,单位为天。

上述生物沉积物固碳公式中的有机碳埋置率与有机碳沉积速率是公式中的2个重要参数变量,由于受到养殖区物理、化学和生物等环境特征以及人为操作等因素的影响,在不同海域条件下会存在很大不确定性。目前尚未形成可以统一准确评估的相关数据标准与计算标准,因此本研究采用相关学者研究得到的经验公式、经验值等降低有机碳埋置率这个参数变量因自然条件以及人为主观因素导致的不确定性,以提高生物沉积物固碳计量公式的普遍适用程度,参数的计算与获取方法如下。

(1)目前有机碳埋置率(Organic carbon burial rate)这个参数的计算方法可采用相关学者使用的经验公式<sup>[12-13]</sup>:

$$\text{有机碳埋置率} = \frac{\text{有机碳沉积速率} - \text{有机碳矿化速率}}{\text{有机碳沉积速率}}$$

(2)有机碳沉积速率(Organic carbon deposition rate)的计算方法:

有机碳沉积速率 = 生物沉积速率 × 有机碳含量比

其中,生物沉积速率(Biodeposition rate, BDR)的计算方法为:

$$\text{生物沉积速率} = (D_t - D_c) / (t \times N)$$

式中: $D_t$ 和 $D_c$ 分别为实验组和对照组捕集器中的沉积物干重,单位为mg; $t$ 为实验时间,单位为天; $N$ 为实验生物样品数量,单位为个。

周毅、王俊等<sup>[14-16]</sup>通过开展实验得到了扇贝、贻贝、牡蛎等物种的沉积速率与地理位置关系不

大,主要与季节、大小规格有关的结论;同一品种的年平均沉积速率数值上区别不大,与大小规格成正相关,因此相同养殖贝类品种沉积速率的经验值差异性较低。

有机碳含量比的计算方法为:

$$\text{有机碳含量比} = \frac{TOC}{TBD}$$

式中:TOC为单位时间单位面积的有机碳总量;TBD(total biological deposit, TBD)为单位时间面积内生物沉积物总量。

目前有众多学者对生物沉积物中4个季节的有机碳含量与有机碳沉积速率进行了测定,积累了丰富的数据,有机碳含量主要与季节相关,呈现明显的季节差异,但4个季节的平均值相对固定<sup>[12,17]</sup>,在不具备实测条件的情况下可借鉴相关学者的经验值。

(3)有机碳矿化速率的计算方法

沉积物有机碳矿化速率(organic carbon mineralization rate)通过沉积物耗氧速率(OUR)和呼吸熵来推算,呼吸熵可借鉴Hargrave<sup>[18]</sup>给出的呼吸熵经验值0.85,即产出CO<sub>2</sub>量/消耗O<sub>2</sub>量=0.85。

有机碳矿化速率 = 沉积物耗氧速率 / 0.85

其中,沉积物耗氧速率采用实验室矿化管结合碘量法<sup>[13]</sup>测定水体的溶解氧含量获得。

综上所述,生物沉积物的有机碳埋置率与有机碳沉积速率是计算生物沉积物固碳的必要参数。其中主要的2个影响因素是生物沉积物中的有机碳含量比与生物沉积物耗氧速率,这2个数据可以在调查海域条件不允许的情况下,在实验室进行测定。同时,众多学者也在有机碳含量比与沉积物耗氧速率方面积累了丰富的经验值,数据规律总体上有迹可循。因此相对于学界普遍使用的生物沉积速率直接计算法,本研究通过给出一系列的参数计算方法减少公式改进过程造成的参数不确定性,提高生物沉积物固碳计算结果的准确度。

### 1.1.3 改进后的养殖贝类总固碳计量模型

改进后的总固碳计量模型包含以下3个方面:养殖贝类自身的固碳量、附着生物体的固碳量与生物沉积物固碳量。整理公式(2)至公式(6),可得到改进后的养殖贝类总固碳计量模型为:

$$C_{total} = \sum S_1 + \sum BC \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum S_1 = \sum S_j + \sum I_j = P_j (R_{st} \cdot \omega S_{st} + R_s \cdot \omega S_t) + \\ \omega_j \cdot P_j (F_{st} \cdot \omega F_{st} + F_s \cdot \omega F_s) + FR_i \cdot C_i \cdot B \text{ 或} \\ Voc_i \cdot N_i \cdot T \cdot B \end{aligned} \quad (8)$$

## 1.2 养殖贝类碳汇价格核算方法改进

目前我国学者沈金生等<sup>[9]</sup>参考 Pablo C. Benitez 等<sup>[19]</sup>对拉丁美洲林业碳汇效益的基本计算原理,提出对海洋牧场碳汇定价的思路:在长期经营的时间尺度下,经营者更愿意通过海洋牧场经营提供的养殖贝类碳汇的总净收益  $NPV^\infty$  不少于从事其他类型的渔业活动(如,投饵、投药式养殖)的净收益  $R^\infty$ ,即  $NPV^\infty \geq R^\infty$ ,就可得到海洋牧场碳汇的最低价格<sup>[9]</sup>。本研究借鉴海洋牧场碳汇定价方法的计算思路,首先将海洋牧场整体性的数据指标替换为特定养殖贝类品种的数据指标,采用此模型计算得到 3 个品种的养殖贝类碳汇价格;其次把海洋牧场定价模型中养殖贝类固碳基础公式替换为本研究改进后的养殖贝类总固碳计量模型,海洋牧场碳汇定价方法的运算与改进过程如下。

(1)一个培育期内,某种养殖贝类碳汇总收益:

$$NPV = NPV_M + NPV_C \quad (9)$$

$$NPV_M = -C_s + P_s \cdot M \cdot (1+r)^{-T} \quad (10)$$

$$NPV_C = P_C \cdot (1-k) \cdot \omega_T \cdot (1+r)^{-T} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \omega_T = \sum [P_j (R_{st} \cdot \omega S_{st} + R_s \cdot \omega S_t) + \omega_j \cdot \\ P_j (F_{st} \cdot \omega F_{st} + F_s \cdot \omega F_s)] + Voc_i \cdot N_i \cdot T \cdot B \end{aligned} \quad (12)$$

式中:NPV 为某种养殖贝类在一个养殖期的碳汇总净收益;NPV<sub>M</sub> 为该种养殖贝类的经济净收益;NPV<sub>C</sub> 为修正后的碳汇净收益;C<sub>s</sub> 为该种养殖贝类的碳汇总成本;P<sub>s</sub> 为该种养殖贝类的销售价格;M 为该种养殖贝类的产量;r 为贴现率;T 为养殖周期,单位为月;P<sub>C</sub> 为碳汇价格;k 为基线碳汇量,代表海水自身在物理泵作用下固定的碳汇量;ω<sub>T</sub> 为该种养殖贝类一个养殖期内的总固碳量。

(2)无限个培育期内,某种养殖贝类碳汇总净收益为:

$$NPV^\infty = NPV \cdot [1 - (1+r)^{-T}]^{-1} \quad (13)$$

(3)假设在该海域从事其他渔业用海方式养殖

与上文相同的品种贝类,设产量为 Y,则其他渔业用海方式下一个养殖期的净收益 R 为:

$$R = P_f \cdot Y \cdot (1+r)^{-T} - C_f \quad (14)$$

式中:P<sub>f</sub> 为该种养殖贝类的销售价格;C<sub>f</sub> 为该养殖贝类品种的成本。

(4)无限个培育期内其他渔业用海方式下净收益为 R<sup>∞</sup> 为:

$$R^\infty = R \cdot [1 - (1+r)^{-T}]^{-1} \quad (15)$$

(5)整合上述公式(13)与公式(15),令 NPV<sup>∞</sup> 大于等于 R<sup>∞</sup>,就可以得到某个品种养殖贝类的最低碳汇价格 P<sub>C</sub> 为:

$$P_C = \frac{L_f \cdot (1+r)^{-T} - C_f + C_s - L_s \cdot (1+r)^{-T}}{(1-k) \cdot (1+r)^{-T} \cdot \omega_T} \quad (16)$$

式中:L<sub>f</sub> 为其他渔业用海方式下某品种养殖贝类的销售收入;C<sub>f</sub> 为此种养殖贝类的养殖成本;C<sub>s</sub> 为此种养殖贝类碳汇养殖成本;L<sub>s</sub> 为此种养殖贝类的市场销售收入;ω<sub>T</sub> 为此种养殖贝类的总固碳量;r 为本年度贴现率;T 为养殖周期,单位为月。

## 2 实例分析

海洋牧场作为一种环境友好型渔业生产方式,成为当前我国发展碳汇渔业的重要途径,可有效降低养殖活动对海域生态环境的影响,促使海域生态环境可持续发展。本研究选取东方云溪海洋牧场作为研究区,将本研究改进后的养殖贝类总固碳计量模型与海洋牧场定价模型进行实例计算,探讨改进养殖贝类总固碳计量模型对碳汇价格的影响。

### 2.1 研究区概况

东方云溪海洋牧场为国家级海洋牧场示范区,位于山东省烟台市养马岛东部海域,濒临黄海,海域面积约为 1 216 hm<sup>2</sup>,此海域是我国扇贝养殖的主产区之一,研究区内养殖品种为褶牡蛎(*Alectryonella plicatula*)、海湾扇贝(*Argopecten irradians*)与栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)。主要附着生物为褶牡蛎(*Alectryonella plicatula*)、紫贻贝(*Mytilus edulis*)、玻璃海鞘(*Ciona intestinalis*)与柄海鞘(*Styela clava*),养殖数据见表 1。

表 1 东方云溪海洋牧场贝类养殖情况

类型	品种	面积 /m <sup>2</sup>	养殖期 /月	销售单价 元/kg	产量湿重 /t
养殖贝类	海湾扇贝	66 667	8	10	211
	栉孔扇贝	66 667	10	10	190
	褶牡蛎	66 667	12	10	174
附着生物	褶牡蛎	—	—	—	16
	紫贻贝	—	—	—	53*
	玻璃海鞘	—	—	—	48*
	柄海鞘	—	—	—	0.86*

注:—为无数据;\*为附着生物平均附着率与平均个体湿重的比值估算值。

## 2.2 材料与方法

### 2.2.1 数据获取

通过研究区实地踏勘确定附着生物优势种并计算的平均附着量,获取养殖贝类的产量、养殖面积、培育模式、培育期和销售价格等养殖信息;通过实验室实测养殖贝类的干湿转换比例与含碳量等理化参数。养殖贝类有机碳沉积速率、有机碳埋置率相关计算参数、海洋牧场养殖成本数据、其他渔业用海方式下的经济贝类产量、养殖成本等数据通过文献获得;假定培育模式、成本等不随时间变化,涉及的价格、贴现率、案例计算等基于 2020 年;基线  $k$  值来自沈金生等<sup>[9]</sup>的研究结果;贴现率  $r$  采用 2020 年人民银行规定最低贴现率 3.24%。

### 2.2.2 数据处理

数据处理采用 Excel.2018 完成。

## 2.3 计算与讨论

### 2.3.1 总固碳量计量

贝类碳汇能力核算系数实验室实测结果如表 2 所示。

表 2 贝类碳汇能力核算系数

类型	品种	干湿 系数%	质量比重%		碳含量%	
			软组织	贝壳	软组织	贝壳
养殖贝类	海湾扇贝	66.77	5.45	61.32	42.25	11.32
	栉孔扇贝	68.75	5.36	63.39	43.84	11.41
	褶牡蛎	60.10	3.67	56.43	47.47	12.08
附着生物	褶牡蛎	50.62	3.07	47.55	44.12	11.48
	紫贻贝	39.96	3.15	36.81	40.75	12.09
	玻璃海鞘	40.02	40.02	—	21.71	—
	柄海鞘	2.11	2.11	—	27.79	—

注:—为无数据;为简化计算,本研究将质量比重设置为软组织干重、贝壳干重分别占总湿重的比重。

牡蛎、扇贝养殖区有机碳沉积速率参考刘鹏等<sup>[17]</sup>在山东省养殖海域的研究结果;有机碳矿化速率参考张学雷等<sup>[13]</sup>的相关研究结果计算得到的养殖贝类生物沉积物固碳相关数据如表 3 所示。

表 3 生物沉积物有机碳相关数据

区域	有机碳沉积速率 mg/(ind·d <sup>-1</sup> )	有机碳矿化速率 mg/(m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	有机碳埋置速率 mg/(m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> )
扇贝养殖水域	14.65	141	40
牡蛎养殖水域	18.38	141	40

注:扇贝与牡蛎养殖区的有机碳埋置率本研究均采用最高值。

### 2.3.2 碳汇价格核算

其他渔业用海方式下的成本单价见表 4<sup>[9,20-22]</sup>,海洋牧场成本数据见表 5<sup>[9,23-25]</sup>。

其他渔业用海与碳汇渔业养殖方式下的销售收入与养殖总成本的计算参考苏群、宋金明、仓萍萍等<sup>[20-22]</sup>研究结果与表 4 和表 5,养殖贝类各部分固碳量与碳汇价格汇总结果见表 6。

表 4 一个养殖期内其他渔业用海贝类养殖成本

种类	明细	单价 元/m <sup>2</sup>
固定资产成本	海域承包费	0.015
	渔船费	0.011
	养殖场建设费	0.038
	建筑物折旧费	2.100
	养殖设备折旧费	1.800
	维修管理费	0.022
养殖成本	种苗费用	0.345
	饵料费用	1.765
	雇佣费(元/m <sup>2</sup> ·月)	0.458
	增殖放流费	0.045

表 5 一个培育期内海洋牧场养殖贝类碳汇成本

种类	明细	单价
建设成本	海域使用费	0.214/(元·m <sup>-2</sup> )
	建筑物折旧费	0.21/(元·m <sup>-2</sup> )
	人工鱼礁费	22.8/(元·m <sup>-3</sup> )
	藻场建设费	18.75/(元·m <sup>-2</sup> )
养殖成本	海区改造费	1.5/(元·m <sup>-2</sup> )
	种苗费	0.004/(元·个 <sup>-1</sup> )
	增殖放流费	398/(元·t <sup>-1</sup> )
	雇佣费	0.458/(元/m <sup>2</sup> ·月)
	监测费	0.22/(元·m <sup>-2</sup> )
	运营维护费	0.03/(元·d <sup>-1</sup> )

表 6 养殖贝类固碳量与碳汇价格结果汇总

物种	贝壳与 软体固碳 /t	附着生物 固碳 /t	生物沉积 固碳 /t	总固 碳量 /t	平均单位 个体固碳 /(g·ind <sup>-1</sup> )	碳汇 价格 /(元·t <sup>-1</sup> )
海湾扇贝	19.50	3.21	15.81	38.52	3.83	165
栉孔扇贝	18.30	2.9	19.57	40.77	4.06	185
褶牡蛎	14.89	2.19	12.42	29.5	3.30	272
合计	52.69	8.3	47.8	108.79	—	—

注:—为无数据。

### 2.3.3 讨论

(1)改进后的养殖贝类总固碳计量模型反映出的总固碳结果差异。以栉孔扇贝为例,本研究计算得到一个养殖期内栉孔扇贝单位个体固碳量为 3.83 g/ind,沈金生等<sup>[9]</sup>计算得到一个养殖期内栉孔扇贝在浅水区与深水区的单位个体固碳量为 1.82 g/ind、2.74 g/ind、平均值为 2.28 g/ind,本研究计算得到栉孔扇贝单位个体固碳量是沈金生等<sup>[9]</sup>使用养殖贝类固碳基础公式得到栉孔扇贝单位个体固碳量的 1.4~2.1 倍,多出来的部分即为附着生物与生物沉积物两部分的固碳量,附着生物固碳约占养殖贝类自身固碳量的 14%~16%,生物沉积物固碳占养殖贝类自身固碳的比重约为 91%,证实了生物沉积固碳对养殖海域的海底碳库形成起到的重要作用<sup>[11]</sup>。本结果一定程度上可量化反映这部分“被遗漏的碳汇”相对直观的数量比例。

(2)改进后的养殖贝类总固碳计量模型对养殖贝类碳汇价格的影响。东方云溪海洋牧场不同物种的养殖贝类碳汇价格存在较大差异,扇贝的碳汇价格低于牡蛎的碳汇价格;褶牡蛎的碳汇价格较高,原因在于同样养殖面积下,褶牡蛎的单位个体相对于扇贝的单位个体固碳量低,因此碳汇价格较高。本研究两种扇贝的碳汇价格均低于沈金生等<sup>[9]</sup>对海洋牧场碳汇计算得出的碳汇价格 253 元/t,原因是其他渔业用海净收益与碳汇养殖净收益的单位差值不变的情况下,本研究将附着生物与生物沉积物纳入养殖贝类总固碳的计算,较高地体现了养殖贝类的固碳能力,因而价格较低。较高的固碳量反映出较高的生态服务功能,会使碳汇价格更贴近于消费者的消费意愿,提高优质碳汇产品的受欢迎程度。

## 3 结论与展望

### 3.1 结论

对养殖贝类的碳汇计量方法进行改进与碳汇价格的核算,有利于丰富碳汇渔业领域的相关基础性研究,为海洋 GEP 核算体系中关于碳汇渔业的生态系统服务价值核算提供数据参考。本研究对学界普遍使用的养殖贝类固碳基础公式补充了附着生物与生物沉积物固碳两个计算参数,并对参数的获取提供了相关计算方法,以减少本研究补充的两个计算参数的不确定性。改进后的养殖贝类总固碳计量方法得到的养殖贝类单位个体固碳量约是相关学者的 1.4~2.1 倍,可量化反映附着生物与生物沉积物固碳这两个“被遗漏的碳汇”,虽然关于生物沉积对养殖环境的负面冲击已被广泛研究,但是也应考虑生物沉积固碳起到的正面效应。不同品种的养殖贝类碳汇价格不同,固碳总量计算结果的提高一方面反映了养殖贝类较高的生态服务价值;另一方面又会降低碳汇价格,较低的碳汇价格更具市场优势。随着人们生态意识与生态需求的不断提高,消费者会更愿意支付碳汇价格较低的养殖贝类碳汇产品。

我国沿海各省(直辖市、自治区)海域的环境条件与养殖产业经济发展水平不同,未来对碳汇渔业相关的养殖产业进行生态系统服务价值核算与补偿标准的制定中,需要根据养殖现状结合海域条件进行相对完善、合理的计算,并根据养殖海域环境质量、养殖模式等相关指标采取不同的补偿力度,制定相应的碳汇补偿系数<sup>[26]</sup>。若碳汇价格可以通过蓝碳市场渠道及生态补偿等举措实现对渔民的补贴,可以使渔民获得更多的资金投入渔业养殖活动中,最大限度地开发养殖贝类的碳汇功能,促使粗放养殖模式向精细化的海洋牧场经营方式转型。

### 3.2 不足与展望

本研究的不足之处主要体现在以下两点:一是总固碳计量方法上,补充的附着生物固碳与生物沉积物固碳这两个计算参数缺乏标准评估的数据指标,本研究虽提供了参数计算方法,降低了不确定性,但还需完善;附着生物固碳方法只提供了滤食

性双壳类与海鞘等脊索动物,其他种类还有待补充。二是数据计算方面,局限于相关基础研究的不足,文中选定的生物沉积物的有机碳埋置率是季度平均最大值,比实际上全年平均埋置率要高;参考的成本信息数据非全国统一性的数据,结果的精确度有待提高,暂时无法代表全国海域的养殖贝类碳汇价格。

未来应探索更先进、精准和完善的碳汇计量方法,在全国沿海地区展开渔业碳汇的专项调查,对所有品种的经济性养殖品种及附着生物的基础性数据进行更为准确的测定并纳入蓝色碳汇数据库,以便逐步开展大范围的渔业碳汇的统一核算工作;加强蓝色碳汇的定价方法的相关研究,制定科学合理的定价标准,在政府的主导下,逐步在沿海地区开展碳汇交易试点工作,利用市场资金补偿养殖海域的海洋生态建设,不断调整碳汇价格与市场补偿标准的融合,形成中国特色的蓝色碳汇交易市场机制与生态补偿机制。

### 参考文献

- [1] 焦念志. 研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(2): 179-187.
- [2] 张继红, 刘纪化, 张永雨, 等. 海水养殖践行“海洋负排放”的途径[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 7.
- [3] 吴杭, 纬经, 赵泓睿, 等. 贝藻混养对舟山东极岛养殖海域二氧化碳的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(15): 53-55+59.
- [4] 曹俐, 王莹. 海水养殖的碳汇潜力估算及其与经济脱钩分析: 以三大沿海地区为例[J]. 海洋经济, 2020, 10(5): 48-56.
- [5] 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.
- [6] 胡学东. 国家蓝色碳汇研究报告: 国家蓝碳行动可行性研究[M]. 北京: 中国书籍出版社, 2020.
- [7] WAN X, XIAO S, LI Q, et al. Evolutionary policy of trading of blue carbon produced by marine ranching with media participation and government supervision[J]. Marine Policy, 2020, 124: 104302.
- [8] 朱骅. 从碳汇渔业到蓝色粮仓的发展机制[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(6): 968-975.
- [9] 沈金生, 梁瑞芳. 海洋牧场蓝色碳汇定价研究[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1812-1821.
- [10] 齐占会, 方建光, 张继红, 等. 桑沟湾贝藻养殖区附着生物群落季节演替研究[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(4): 72-77.
- [11] 张永雨, 张继红, 梁彦韬, 等. 中国近海养殖环境碳汇形成过程与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(12): 1414-1424.48-852.
- [12] 闫家国. 亚热带海湾滤食性贝类生物沉积及其生态效应研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013.
- [13] 张学雷. 滤食性贝类与环境间的相互影响及其养殖容量研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
- [14] 周毅, 杨红生, 毛玉泽, 等. 桑沟湾栉孔扇贝生物沉积的现场测定[J]. 动物学杂志, 2003, 38(4): 40-44.
- [15] 王俊, 姜祖辉, 陈瑞盛. 太平洋牡蛎生物沉积作用的研究[J]. 水产学报, 2005, 29(3): 344-349.
- [16] 王俊, 姜祖辉, 陈瑞盛. 栉孔扇贝生物沉积作用的研究[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 11(3): 225-230.
- [17] 刘鹏, 周毅, 王峰, 等. 浅水区(潮间带)滤食性贝类生物沉积的现场测定[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(2): 253-258.
- [18] HARGRAVE B T, PHILLIPS G A, DOUCETTE L I, et al. Assessing benthic impacts of organic enrichment from marine aquaculture[J]. Water Air & Soil Pollution, 1997, 99(1-4): 641-650.
- [19] BENÍTEZ P C, OBERSTEINER M. Site identification for carbon sequestration in Latin America: a grid-based economic approach[J]. Forest Policy & Economics, 2006, 8(6): 636-651.
- [20] 苏群, 陈智娟. 水产养殖的生产经营状况及成本收益分析: 以江苏省淮安市为例[J]. 江苏农业科学, 2008(3): 1-4.
- [21] 宋金明. 中国近海生态系统碳循环与生物固碳[J]. 中国水产科学, 2011, 18(3): 703-711.
- [22] 仓萍萍, 杨正勇, 吴庆东. 立体化海水养殖成本收益分析: 基于辽宁省东港市海水池塘养殖(上)[J]. 科学养鱼, 2015, 31(4): 43-44.
- [23] 李可闻, 冷传慧. 海参典型养殖生产方式的投入产出及风险评估[J]. 中国渔业经济, 2015(3): 88-94.
- [24] 李纯厚, 贾晓平, 齐占会, 等. 大亚湾海洋牧场低碳渔业生产效果评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2346-2352.
- [25] 董婧. 渤海与黄海北部大型水母生物学研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
- [26] 沈金生, 吕金诺, 刘荣建. 我国海洋牧场蓝色碳汇补偿方案设计探讨[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2020(3): 68-75.