

# 红树林渔业碳汇功能及其影响研究进展\*

杨慧荣<sup>1,2</sup>, 曾泽乾<sup>1,2</sup>, 刘建新<sup>3</sup>

1. 华南农业大学海洋学院, 广东 广州 510642
2. 华南农业大学中山创新中心, 广东 中山 528400
3. 江门市自然资源局, 广东 江门 529000

**摘要:** 渔业碳汇是指利用渔业生产活动中的水生生物吸收大气溶解在水体中的 CO<sub>2</sub>, 通过收获将已转化为水产品的碳移出水体或生物沉积作用将其沉降于水底的过程和机制。由于这些水生生物所吸收的碳在该过程和机制中被再利用或被储存, 水域生态系统吸收和储存大气 CO<sub>2</sub> 的能力得到增强, 对实现“碳中和”具有重要意义。本文系统综述了近年来红树林渔业碳汇的研究进展, 通过分析红树林水生生物的碳汇功能, 描述红树林水域生态系统碳循环过程, 探讨了以红树林渔业碳汇为基础所形成的产业模式现状和前景, 为深入研究红树林生态系统物质循环及能量流动, 提高渔业碳汇增汇技术, 实现碳中和目标提供理论基础。

**关键词:** 渔业碳汇; 碳汇功能; 固碳能力; 碳收支

**中图分类号:** S937.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)02-0010-07

## Research progress of mangrove fishery carbon sink function and its impact

YANG Huirong<sup>1,2</sup>, ZENG Zeqian<sup>1,2</sup>, LIU Jianxin<sup>3</sup>

1. College of Marine Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
2. Zhongshan Innovation Center, South China Agricultural University, Zhongshan 528400, China
3. Nature Resources Bureau of Jiangmen, Jiangmen 529000, China

**Abstract:** Fishery carbon sink refers to the process and mechanism of using aquatic organisms in fishery production activities to absorb CO<sub>2</sub> dissolved in the atmosphere in the water body, and transfer the carbon converted into aquatic products out of the water body through harvesting or biodeposition to settle it on the bottom. Since the carbon absorbed by these aquatic organisms is reused or stored in this process, the ability of aquatic ecosystems to absorb and store atmospheric CO<sub>2</sub> is enhanced, which is of great significance for achieving “carbon neutrality”. This review systematically summaries the research progress of mangrove fishery carbon sink in recent years, describes the carbon cycle process of mangrove water ecosystem by analyzing the carbon sink function of mangrove aquatic organisms. Finally, the paper discusses the current situation and prospect of the industrial model formed on the basis of mangrove fishery carbon sink for further studying the material cycle and energy flow of mangrove ecosystem, improving the technology of fishery carbon sink and providing the theoretical basis to achieve carbon neutrality.

**Key words:** fishery carbon sink; carbon sink function; carbon sequestration capacity; carbon budget

\* 收稿日期: 2022-12-28

录用日期: 2023-02-02

网络首发日期: 2023-03-02

**基金项目:** 广东省自然资源厅海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(GDNRC[2022]50); 广东省林业局林业科技创新项目(2021KJCX012, 2022KJCX019); 台山市红树林保护与修复建设项目(XKJHT20222145)

**作者简介:** 杨慧荣(1977年生), 女; 研究方向: 渔业资源与环境关系; E-mail: hry@scau.edu.cn

曾泽乾(1999年生), 男; 研究方向: 渔业资源与环境关系; E-mail: zengzq0227@163.com

(杨慧荣、曾泽乾并列第一作者)

红树林因其储存大量有机碳的能力而被称为蓝碳生态系统(叶亨利, 2018)。它可以作为沿海鱼类和甲壳类动物的育苗场, 提供良好的商业渔业资源, 也可以凭借其广泛的根系保护海岸线免受飓风、海啸、风暴、洪水和海浪的影响(Field, 1995; Vermaat et al., 1995; Costanza et al., 1998; Rivera-Monroy et al., 1999; Barbier, 2000; Bouillon et al., 2003; Friess, 2019)。其中, 人类渔业生产活动对浅海生态系统碳元素的循环具有重要的影响, 渔业在海洋碳汇中的作用引起各界的广泛关注。渔业碳汇又称“可移出的碳汇”, 即利用渔业生产活动中的水生生物吸收大气溶解在水体中的 $\text{CO}_2$ , 成熟收获时将水生生物及其所吸收的碳一同从水体中移出的过程和机制(Chauvaud et al., 2003)。

我国于2020年9月正式提出碳中和、碳达峰这一目标后, “碳汇”和“渔业碳汇”在一些新发布的政策中被多次提及。可见, 渔业碳汇在实现“碳中和”目标中扮演着十分重要的角色。已有研究表明, 在渔业生产中, 碳汇功能发挥和增汇的方式主要包括水生藻类、滤食性贝类以及一些鱼类等渔业生物群体(唐启升等, 2022)。近年来, 相关人员对渔业碳汇开展了大量研究, 并取得了显著的成果, 如以渔业碳汇为基础的低碳渔业生态养殖技术、保护水生生物的人工渔场等(王宇丹等, 2022)。鉴于此, 本文系统综述了近年来红树林渔业碳汇功能及其影响的研究进展, 为研究红树林生态系统物质循环及能量流动, 完善渔业碳汇增汇技术, 实现碳中和目标提供理论基础。

## 1 红树林的物质循环与能量流动

红树林自身的固碳效率十分高效, 全球红树林系统中的平均储存碳量高达 $1\ 000\ \text{Mg}/\text{hm}^2$ , 其中70%以上固存在地下土壤中(Donato et al., 2011; Alongi, 2014)。而潮汐和海浪在某种程度上作为一种辅助能源补贴, 它们能使红树林能够储存和运输新的固定碳、沉积物、食物和养分, 并向大气和邻近的沿海水域进行物质交换和能量流动(Vo-Luong et al., 2008; Barr et al., 2013)。有研究学者对广东英罗湾的红树林进行了调查, 发现不同潮位红树林的土壤有机碳质量分数和碳密度差异显著, 两者在低潮位到高潮位中呈现递增的趋势, 在高潮位的植被生物量及其碳密度更高(陈瑶瑶等, 2019)。不过, 涨潮会使得土壤氧气含量和叶片气孔导度显著降低, 导致植物的光化学反

应效率降低, 其呼吸作用和光合作用均受到抑制, 最终影响生长(陈鹭真等, 2006)。光合作用正是这些绿色植物将大气中的 $\text{CO}_2$ 进行固定的途径, 绿色植物将其固定后将有机碳以凋落物和根系分泌物等形式向土壤输入, 土壤的盐度和pH均通过微生物的活性及生长来影响根系的分解, 进而影响有机碳的含量。潮汐除了影响植被, 也会影响栖息在红树林的一些动物种群。有研究表明, 红树林中部分水生生物群落与每个不同的潮汐阶段都有明显的关联, 说明生境是影响其分布的主要因素(姜成朴, 2019)。此外, 红树植物自身也会对部分水生生物群落产生影响。红树植物发达的根系不仅能吸收水体中的N、P等营养元素及重金属, 降低水体的富营养化程度, 还能减少来自陆地径流和内陆的污染, 净化水环境促进水生生物生长(余忠明等, 2005)。

## 2 藻类与贝类碳汇

生长于红树林的藻类包括鹧鸪菜(*Caloglossa leprieurii*)、绿球藻(*Cladophora aegagropila*)等和其他部分海生浮游植物是具有显著效果且快速固碳的生物, 它们运用光化学反应直接吸取海洋中的 $\text{CO}_2$ , 增强红树林水生生态系统的碳汇作用(林鹏等, 1997; Jones et al., 2022)。另外, 它们还增加了海气界面 $\text{CO}_2$ 分压的差, 使得在大气中的 $\text{CO}_2$ 向海水溶解和扩散的速度显著提升, 另外还增强了溶解度泵的效果, 这对降低空气中 $\text{CO}_2$ 浓度的效果非常明显, 能够起到增加碳汇的效果(Tang et al., 2011)。

而以这些藻类和浮游植物为食的贝类是海洋生物物质输送的关键, 这些贝类会运用海洋中大部分的水生浮游植物作为食物。在新陈代谢的进程中, 贝类已经起到了碳汇的效果(吕为群等, 2012)。不同种类的贝类, 其钙化作用、呼吸作用和对环境的作用也有所不同。如对桑沟湾的主要滤食性贝类进行研究, 结果表明栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)对碳的沉积率比长牡蛎(*Ostrea gigas*)和虾夷扇贝(*Painopekten yessoensis*)要高, 而虾夷扇贝通过呼吸排泄释放的碳量则最高(牛亚丽, 2014)。这些贝类促进了部分浮游植物的再繁殖和生长, 使得水体中 $\text{CO}_2$ 等碳元素的吸收和利用得到进一步增强, 产生了新的碳汇水产品。另外, 贝类软体组织中的碳会通过复杂的物质循环和能量流动重新回到大气中, 而其自身的壳可以通过艺

术加工、沉积填埋等方式将其中的碳进行长时间的封存,从而达到有效碳汇的标准(蒋增杰等, 2022)。贝类在形成坚硬的外壳时,能够将海洋中大量获得的碳酸氢根离子变成碳酸钙,然后每当形成 5 mol 碳酸钙的时候就能够固定 5 mol 的碳,这一过程通过碳酸盐体系实现(温瑞等, 2022)。

此外,在贝类生长过程中,还有一部分碳经过摄食分解后回到水体环境中,最后沉降到沉积物中被埋藏(蒋增杰等, 2022)。最新的研究表明,贝类释放的可溶性有机碳(DOC)可以很快再吸收和再利用,使得它很难在海水中积累,所以这部分碳对海水 DOC 库的贡献很小(Zhang et al., 2017)。因此,在海水贝类养殖中,只考虑生物量碳汇和颗粒有机碳(POC)碳汇,计算公式(Liu et al., 2022)

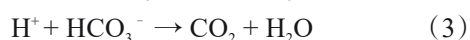
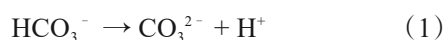
$$\begin{aligned} C_{S, \text{bio}2} &= C_{S, \text{shell}} + C_{S, \text{tissue}}, \\ C_{S, \text{shell}} &= \sum (Y_i \times r_i \times p_i \times l_i), \\ C_{S, \text{tissue}} &= \sum (Y_i \times r_i \times p'_i \times l'_i), \end{aligned}$$

式中  $C_{S, \text{bio}2}$  为海产贝类养殖的生物量碳汇(g/a);  $C_{S, \text{shell}}$  为壳层碳汇(g/a);  $C_{S, \text{tissue}}$  是软组织碳汇(g/a);  $Y_i$  为第  $i$  个贝类的产量(g/a);  $r_i$  为第  $i$  个贝类的干质量分数(%);  $p_i$  为第  $i$  个贝类壳的质量分数(%);  $l_i$  为第  $i$  个贝类壳碳的质量分数(%);  $p'_i$  为第  $i$  个贝类的软组织质量分数(%);  $l'_i$  为第  $i$  只贝类的软组织质量分数(%)。

相对于藻类来说,贝类被认为具有更加成熟的固碳机制,贝壳是更加稳定的碳汇。目前已熟知钙化过程的方程式为



事实上,这一钙化过程的发生,主要由以下 3 个相互关联的生化过程共同完成(Ross et al., 2019; McCulloch et al., 2017; Zhao et al., 2018)



从化学方程式角度出发,将(1)、(2)和(3) 3 个过程相加、去掉两侧的  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{H}^+$ , 可得出钙化过程的方程式。事实上,生化过程不是纯粹的化学方程式,反应过程中的所有反应物和生成物缺一不可,各自发挥着重要的作用,详细见图 1。外套膜外腔液(oEPS)、上皮细胞(包括外套膜上皮内表皮 IME 和外套膜上皮外表皮 OME)以及血淋巴(Hemo)这 3 个介质是完成整个钙化过程的关键,方程式两侧相同的物质,实际上其来源和发挥作

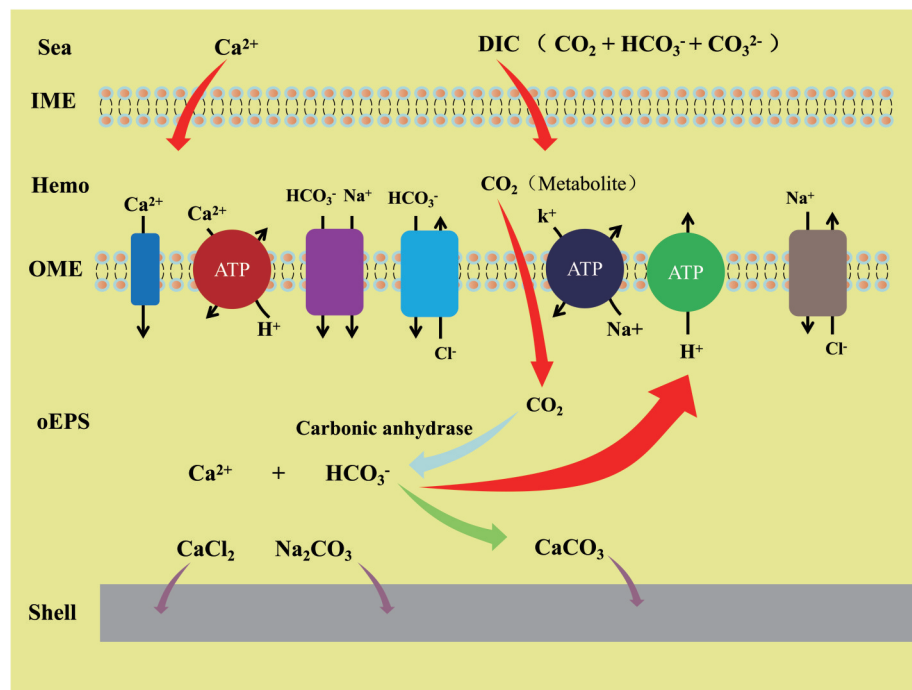
用时所处的介质并不完全相同。过程(1)和(2)发生在外套膜外腔液中,而过程(3)在血淋巴中进行,这些过程中存在如  $\text{CO}_3^{2-}$  等中间产物。中间产物既是反应物又是生成物,它与代谢底物和最终产物的区别在于中间产物是关联细胞内外一系列的生理生化反应的关键(蒋增杰等, 2022)。总体来说,这些物质虽然是在钙化过程中生成,但它们在细胞新陈代谢中扮演着不可缺少的角色,不能单纯地进行加减,忽略它们自身的生物学功能。

此外,贝类自身的固碳还存在一些分歧。如 Morris 等(2019)研究表明,虽然贝类在摄食和生长过程中通过呼吸作用和钙化作用吸收了水中的溶解无机碳,但是同时也使得水体中的碱度下降,后者对海水  $\text{CO}_2$  分压的影响比减小周边水体溶解无机碳的影响更高,造成了水体  $\text{CO}_2$  分压的剩余,即增加了  $\text{CO}_2$  的排放。因此,贝类钙化过程的碳酸系统变化过程还需要深入研究,以此准确地描述贝类的碳汇能力。

我国作为世界第一的渔业、水产养殖大国,以渔业碳汇为主的蓝色碳汇是我国目前优势的碳汇新途径。根据 2021 年《中国渔业年鉴》提供的数据,2020 年海水贝类产量为 1 480 万 t, 约占我国水产品总产量的 28%, 在常见的海水贝类养殖品种牡蛎、扇贝、蛤和贻贝中,牡蛎产量最高,达 542 万 t; 根据计算公式估算 2020 年我国海水贝类养殖碳汇,得到我国贝类固碳为 1 096 万 t, 其中牡蛎最高,固碳达 353 万 t(曹俐等, 2020)。以牡蛎为例,每亩(1 亩=666.67 m<sup>2</sup>)牡蛎每年固碳 1.4 t 左右,固碳能力是红树林的 7 倍。有研究表明,在不投饵的前提下,牡蛎通过滤食有机碎屑和颗粒物等方式发挥自身的增汇作用(张旭东等, 2019)。而这一过程,能使红树林生态系统碳吸收以及碳储存能力得到显著的提升。

### 3 鱼类碳汇

在红树林生态系统的食物网中,处于较高营养级的鱼类也是整个水域生态系统碳循环中不可缺少的一环。部分海水硬骨鱼类在吞饮海水时,大量  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和少量  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  等可由肠道吸收进入鱼体内,经肾脏由尿液排出;少量  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  经肾脏与尿液一同排出,而大部分  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  与肠道分泌的  $\text{HCO}_3^-$  在肠道中形成碳酸盐沉淀,该沉淀与粪便一同排出,最终成为碳酸盐岩泥。该沉淀的形成与肠细胞膜上离子转运和水的吸收相互关联



OME:外套膜上皮外表皮;IME:外套膜上皮内表皮;oEPS:外套膜外腔液;Hemo:血淋巴。

图1 贝类钙化机理图(Zhao et al., 2018)

Fig. 1 Calcification mechanism of shellfish(Zhao et al., 2018)

(Walsh et al., 1991; Wilson et al., 2002; Evans, 2005; Cooper et al., 2006)。这一过程, 间接促进了红树林水体生态系统的无机碳循环和碳汇作用。

此外, 红树林中也存在一部分淡水鱼类, 大部分淡水鱼类的碳含量占干质量比约为 50%~64.89%(袁立来等, 2022)。其中一部分滤食性鱼类通过摄入水体中的浮游生物和有机碎屑来促进自身生长, 而其自身代谢又会给水体带来一部分粪便碳; 当这些鱼类成熟并收获时, 大量的碳也随之从水体中移出(见图2)。

以鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙鱼(*Aristichthys nobilis*)为主的滤食性鱼类是较为典型的淡水碳汇生物。研究人员发现, 鲢和鳙体质量每增加 1 kg, 可分别从水体中吸收碳 121.5 g 和 115.7 g, 两者的碳汇系数分别为 16.19 和 13.40(解绶启等, 2013; 袁立来等, 2022)。除滤食性鱼类外, 罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)、金钱鱼(*Scatophagus argus*)和中华乌塘鳢(*Bostrychus sinensis*)等杂食性或肉食性鱼类在红树林中也广泛分布。有研究表明, 红树林中尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的主要饵料为有机碎屑、浮游植物和植物凋落物, 栖息地生境的红树植物如木榄(*Bruguiera gymnorrhiza*)和红海榄(*Rhizophora stylosa*)、盐沼植物如喜盐草(*Halophila ovalis*)和

二药藻(*Halodule uninervis*)和浮游植物如蓝藻和硅藻也是尼罗罗非鱼食源的重要组成部分(徐姗楠等, 2010)。可见, 红树林中部分鱼类可利用红树植物的凋落物有效吸收自身生长过程中代谢产生的氮、磷等营养元素, 从而降低水体污染, 避免养殖海区富营养化, 使得水产动物健康生长(Chu et al., 1998)。因此, 碳源对生态系统所产生的影响逐渐引起研究人员的关注。鱼类碳收支方程

$$C=F+R+U+P$$

式中  $C$ 、 $F$ 、 $R$ 、 $U$  和  $P$  分别代表摄食碳、粪便碳、代谢碳、排泄碳和生长碳。鱼类摄食饵料中的碳即为摄食碳, 鱼的产量近似于式中的生长碳(Xian et al., 2003)。大量研究结果表明, 鱼类的碳收支平衡受到体质量、摄食水平等多个因素的影响(康斌等, 2007; 陈忠祥等, 2011)。当鱼体自由摄食时, 生长碳与粪便碳相同, 其余大部分通过呼吸作用消耗; 当鱼体质量每增长 1 g, 979.56 mg 碳就会随之流失(章超桦等, 2011)。长期以来, 由此形成了一种红树林种植—养殖生态耦合模式。

红树林种植—养殖生态耦合模式是基于渔业碳汇功能下所衍生出的一种新颖的、环境友好型的滩涂海水养殖模式, 该模式的目的是最大限度减轻水产养殖动物残饵及粪便的污染, 利用红树植物对水体的净化作用, 促进水产养殖动物

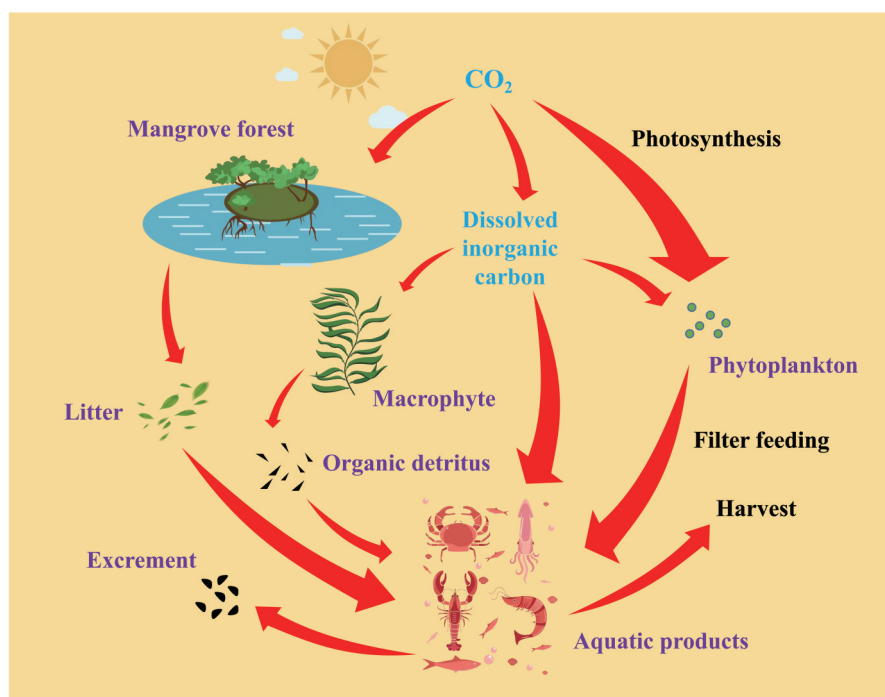


图2 红树林碳循环过程

Fig. 2 Mangrove forest carbon cycle

健康生长。在该模式中,如桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)等红树植物除了具有对氮磷等营养元素的吸收作用外,其土壤自身还能固定部分来自水体中的可溶性污染物;红树植物能使生态系统中的微环境如微生物、浮游生物等的种类分布、数量发生改变,生态系统的自净能力得到加强(陈康等,2017)。较早之前,有学者已将美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)和星洲红鱼(*Labidochromis flavigulus*)作为养殖对象进行实验,结果发现桐花树在耦合模式中具有一定程度的推广作用(彭友贵等,2004)。不过,这种耦合模式还存在一些争议,有学者在湛江港红树林生态系统的营养贡献中发现,在贝、虾、蟹和鱼类的有机碳来源中,底栖藻类贡献率最高,红树植物的营养贡献最少(易志全,2010)。该结论与红树植物拥有巨大生产力相矛盾,这有可能是部分类群生物不以红树植物为主要食源,也有可能是红树植物的大部分生产力转移到毗邻的生态系统发挥作用,具体情况有待深究。另外,该耦合模式还有许多问题待解决,如硫化细菌和硝化细菌等微生物在该模式中参与物质循环与耦合的机制尚未清楚,淡水鱼类和海水鱼类的碳收支动态模型还未建立,海水鱼类是否都形成碳酸盐沉积物,这些都有待进一步研究。

#### 4 红树林渔业碳汇现状与前景

红树林被称为近海典型生态系统之一,是近海重要的水产育苗繁殖场和庇护所,拥有巨大的生产力(李娇等,2022)。而渔业的主要形式分为水产养殖与捕捞,具有碳源和碳汇双重属性,既在水生生物生长代谢环节和人类生产活动过程中排放碳,也在水生生物吸收和利用水体碳元素的过程中形成碳汇,并通过捕捞水产品将水生生物汇集的碳从水体中移出,提高水生生态系统储存和吸收碳的能力(徐皓等,2007)。换言之,渔业碳汇主要通过水产养殖与捕捞实现(李雪等,2022)。

目前,发展红树林渔业碳汇存在一定问题。一是红树林渔业碳汇基础研究不足,如缺乏对水产动物尤其是海水鱼类和甲壳类的碳汇测算参数的研究,只能参考生活习性和可食部营养成分相近的淡水水产动物;二是渔业碳汇增汇技术开发和相关政策扶持等内容还未完善,未形成整体的推进方案,从而缺乏有效的组织和引导;三是核算方法和市场化交易机制不成熟,渔业碳汇交易价格普遍偏低。为此,在未来需要加强渔业碳汇理论研究,结合我国国情建立一套红树林渔业碳汇计量数据方法或体系,如《养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法 碳储量变化法》(HY/T 0305-2021)(张继红等,2022)等,并逐渐完善渔业减排

增汇方法学,为渔业碳汇交易提供参考。

## 5 小 结

由于红树林自身拥有强大的初级生产力和水体净化能力,红树林种植—养殖生态耦合等养殖模式应运而生。在红树林进行渔业生产活动时,养殖对象能通过自身的生理代谢所产生碳,同时能促进水体生态系统的物质循环与能量流动,与

红树林共同形成一个巨大的流动的碳库。但是目前对碳汇的基础研究不足,如水生生物的碳收支动态模型还未建立;碳汇计量体系尚未完全形成等。只有解决上述问题,才能更好地探究水生动物参与红树林渔业碳汇的过程,为2030年CO<sub>2</sub>排放达到峰值、在2060年实现碳中和的“双碳”目标提供理论基础。

### 参考文献:

- 曹俐,王莹,2020.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,10(5):48-56.
- 陈康,刘妮,唐以杰,等,2017.中华乌塘鳢红树林种植-养殖耦合系统养殖试验[J].广东第二师范学院学报,37(5):76-79.
- 陈鹭真,林鹏,王文卿,2006.红树植物淹水胁迫响应研究进展[J].生态学报,26(2):586-593.
- 陈瑶瑶,张雅松,娄铎,等,2019.广东英罗湾不同潮位红树林-滩涂系统碳密度差异[J].生态环境学报,28(6):1134-1140.
- 陈中祥,牟振波,2011.滤食性鱼类在淡水渔业中碳汇作用初探[J].水产学杂志,24(3):65-68.
- 姜成朴,2019.漳江口红树林区鱼类群落结构变化及其压力因素分析研究[D].厦门:厦门大学.
- 蒋增杰,方建光,毛玉泽,等,2022.滤食性贝类养殖碳汇功能研究进展及未来值得关注的科学问题[J].渔业科学进展,43(5):106-114.
- 解绥启,刘家寿,李钟杰,2013.淡水水体渔业碳移出之估算[J].渔业科学进展,34(1):82-89.
- 康斌,线薇薇,武云飞,2007.不同摄食水平条件下鲮的碳收支研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),37(2):247-250,304.
- 李娇,李梦迪,公丕海,等,2022.海洋牧场渔业碳汇研究进展[J].渔业科学进展,43(5):142-150.
- 李雪,刘子飞,赵明军,等,2022.我国水产养殖与捕捞业“双碳”目标及实现路径[J].中国农业科技导报,24(11):13-26.
- 林鹏,陈贞奋,刘维刚,1997.福建红树林区大型藻类的生态学研究[J].Acta Botanica Sinica,(2):176-180.
- 吕为群,陈阿琴,刘慧,2012.鱼类肠道的碳酸盐结晶物:海水鱼类养殖在碳汇渔业中的地位和作用[J].水产学报,36(12):1924-1932.
- 牛亚丽,2014.桑沟湾滤食性贝类碳、氮、磷、硅元素收支的季节变化研究[D].浙江:浙江海洋学院.
- 彭友贵,陈桂珠,余忠明,等,2004.红树林滩涂海水种植-养殖生态耦合系统初步研究[J].中山大学学报(自然科学版),43(6):150-154.
- 余忠明,林俊雄,彭友贵,等,2005.红树林与水产养殖系统初步研究[J].生态学杂志,24(7):837-840.
- 唐启升,蒋增杰,毛玉泽,2022.渔业碳汇与碳汇渔业定义及其相关问题的辨析[J].渔业科学进展,43(5):1-7.
- 王宇丹,兰德平,梁爽,等,2022.中国碳汇渔业发展现状与前景[J].农业展望,18(6):41-45.
- 温瑞,张继伟,高超,等,2022.养殖贝类碳汇价格核算研究[J].海洋开发与管理,39(3):16-23.
- 徐皓,刘晃,张建华,等,2007.我国渔业能源消耗测算[J].中国水产,(11):74-76+78.
- 徐姗楠,陈作志,黄洪辉,等,2010.红树林种植-养殖耦合系统中尼罗罗非鱼的食源分析[J].中山大学学报(自然科学版),49(1):101-106.
- 叶亨利,2018.基于牡蛎养殖业的广西茅尾海海洋空间资源承载力评价研究[D].厦门:国家海洋局第三海洋研究所.
- 易志全,2010.湛江港红树林生态系统有机碳源对渔业资源的贡献率研究[D].湛江:广东海洋大学.
- 袁立来,穆希岩,王琳,等,2022.碳中和与淡水碳汇渔业[J].中国水产,(3):65-68.
- 张继红,刘毅,吴文广,等,2022.海洋渔业碳汇项目方法学探究[J].渔业科学进展,43(5):151-159.
- 张旭东,徐承旭,2019.我国科学家养殖近江牡蛎获得成功[J].水产科技情报,46(4):236.
- 章超桦,曹文红,吉宏武,等,2011.水产资源低碳高效利用技术[J].水产学报,35(2):315-320.
- ALONGI D M, 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests [J]. Ann Rev Mar Sci, 6: 195-219.
- BARBIER E B, 2000. Valuing the environment as input: Review of applications to mangrove-fishery linkages [J]. Ecol Econ, 35(1): 47-61.
- BARR J G, FUENTES J D, DeLONGE M S, et al, 2013. Summer-time influences of tidal energy advection on the surface energy balance in a mangrove forest [J]. Biogeosciences, 10(1): 501-511.
- BOUILLON S, DAHDOUH-GUEBAS F, RAO A V V S, et al, 2003. Sources of organic carbon in mangrove sediments: Variability and possible ecological implications [J]. Hydrobiologia, 495(1): 33-39.
- CHAUVAUD L, THOMPSON J K, CLOERN J E, et al, 2003. Clams as CO<sub>2</sub> generators: The *Potamocorbula amurensis* example in Sanfrancisco bay [J]. Limnol Oceanogr, 48(6): 2086-2092.
- CHU H Y, CHEN N C, YEUNG M C, et al, 1998. Tide-tank system simulating mangrove wetland for removal of nutrients and heavy

- metals from wastewater[J]. *Water Sci Technol*, 38(1): 361–368.
- COOPER C A, BURY N R, GROSELL M, 2006. The effects of pH and the iron redox state on iron uptake in the intestine of a marine teleost fish, gulf toadfish (*Opsanus beta*) [J]. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, 143(3): 292–298.
- COSTANZA R, D'ARGE R, de GROOT R, et al, 1998. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Ecol Econ*, 25(1): 3–15.
- DONATO D C, KAUFFMAN J B, MURDIYARSO D, et al, 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics [J]. *Nat Geosci*, 4(5): 293–297.
- EVANS D H, PIERMARINI P M, CHOE K P, 2005. The multifunctional fish gill: Dominant site of gas exchange, osmoregulation, acid-base regulation, and excretion of nitrogenous waste [J]. *Physiol Rev*, 85(1): 97–177.
- FIELD C D, 1995. Impact of expected climate change on mangroves [J]. *Hydrobiologia*, 295(1): 75–81.
- FRIESS D A, ROGERS K, LOVELOCK C E, et al, 2019. The state of the world's mangrove forests: Past, present, and future [J]. *Annu Rev Environ Resour*, 44: 89–115.
- JONES A R, ALLEWAY H K, McAFEE D, et al, 2022. Climate-friendly seafood: The potential for emissions reduction and carbon capture in marine aquaculture [J]. *Bioscience*, 72(2): 123–143.
- LIU C, LIU G, CASAZZA M, et al, 2022. Current status and potential assessment of China's Ocean carbon sinks [J]. *Environ Sci Technol*, 56(10): 6584–6595.
- McCULLOCH M T, D'OLIVO J P, FALTER J, et al, 2017. Coral calcification in a changing world and the interactive dynamics of pH and DIC upregulation [J]. *Nat Commun*, 8: 15686.
- MORRIS J P, HUMPHREYS M P, 2019. Modelling seawater carbonate chemistry in shellfish aquaculture regions: Insights into CO<sub>2</sub> release associated with shell formation and growth [J]. *Aquaculture*, 501: 338–344.
- RIVERA-MONROY V H, TORRES L A, BAHAMON N, et al, 1999. The potential use of mangrove forests as nitrogen sinks of shrimp aquaculture pond effluents: The role of denitrification [J]. *J World Aquac Soc*, 30(1): 12–25.
- ROSS C L, DeCARLO T M, McCULLOCH M T, 2019. Environmental and physiochemical controls on coral calcification along a latitudinal temperature gradient in Western Australia [J]. *Glob Chang Biol*, 25(2): 431–447.
- TANG Q, ZHANG J, FANG J, 2011. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO<sub>2</sub> absorption by coastal ecosystems [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 424: 97–104.
- VERMAAT J E, THAMPANYA U, 2006. Mangroves mitigate tsunami damage: A further response [J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 69(1/2): 1–3.
- VO-LUONG P, MASSEL S, 2008. Energy dissipation in non-uniform mangrove forests of arbitrary depth [J]. *J Mar Syst*, 74(1/2): 603–622.
- WALSH P J, BLACKWELDER P, GILL K A, et al, 1991. Carbonate deposits in marine fish intestines: A new source of biomineralization [J]. *Limnol Oceanogr*, 36(6): 1227–1232.
- WILSON R W, GROSELL M, 2003. Intestinal bicarbonate secretion in marine teleost fish—source of bicarbonate, pH sensitivity, and consequences for whole animal acid-base and calcium homeostasis [J]. *Biochim Biophys Acta*, 1618(2): 163–174.
- WILSON R W, WILSON J M, GROSELL M, 2002. Intestinal bicarbonate secretion by marine teleost fish—Why and how? [J]. *Biochim Biophys Acta BBA Biomembr*, 1566(1/2): 182–193.
- XIAN W, LIU R, ZHU X, 2003. Carbon budget of bastard halibut *Paralichthys olivaceus* in relation to body weight and temperature [J]. *Chin J Ocean Limnol*, 21(2): 134–140.
- ZHANG Y, ZHANG J, LIANG Y, et al, 2017. Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China [J]. *Sci China Earth Sci*, 60(12): 2097–2107.
- ZHAO L, MILANO S, WALLISER E O, et al, 2018. Bivalve shell formation in a naturally CO<sub>2</sub>-enriched habitat: Unraveling the resilience mechanisms from elemental signatures [J]. *Chemosphere*, 203: 132–138.

(责任编辑 张冰)