

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20220415001

http://www.yykxjz.cn/

唐启升, 蒋增杰, 毛玉泽. 渔业碳汇与碳汇渔业定义及其相关问题的辨析. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 01-07

TANG Q S, JIANG Z J, MAO Y Z. Clarification on the definitions and its relevant issues of fisheries carbon sink and carbon sink fisheries. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(5): 01-07

渔业碳汇与碳汇渔业定义及其相关问题的辨析*

唐启升^{1,2①} 蒋增杰^{1,2} 毛玉泽^{1,2}

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室

中国水产科学研究院碳汇渔业重点实验室 山东 青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 山东 青岛 266071)

摘要 本文基于联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)关于碳汇和碳源的解释和水生植物固碳特点,对2010年提出的渔业碳汇和碳汇渔业的定义进行修订,强调了渔业碳汇功能和增汇的基本表达方式和水生植物在渔业碳汇中的重要作用,进一步解释了通过水生藻类养殖、滤食性贝类和鱼类等养殖、渔业生物群体捕捞和增殖等渔业生产活动促进水生生物“移出和储存”CO₂等温室气体的过程和机制。分析了贝类养殖在不需投放饵料的前提下,通过滤食浮游植物及有机碎屑等颗粒有机物大量使用水体中CO₂的过程及机制,从能量收支层面论述了使用碳、移出碳、储存碳和释放碳4个碳库的特征及其数量关系,进而证实贝类养殖提升了水域生态系统碳汇能力,是碳汇而不是碳源。贝藻养殖碳汇评估结果表明,随着海水养殖生产持续发展,近20年我国近海贝藻养殖碳汇有较大幅度的增加,总碳汇量从2001年394万t增加到2020年659万t,其中近三年(2018—2020)平均总碳汇量为648万t(相当于每年义务造林87万hm²);净碳汇量从2001年255万t增加到2020年430万t,近三年(2018—2020)平均净碳汇量为422万t(相当于每年义务造林56万hm²)。最后,提出了健康持续、深入发展碳汇渔业的相关建议。

关键词 渔业碳汇;碳汇渔业;贝类养殖碳使用、移出、储存与释放;贝藻碳汇量评估;发展建议
中图分类号 P76 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)05-0001-07

为了服务于国家“双碳”战略,为实现“碳中和”做新贡献,发展碳汇渔业再次引起关注。为此,在农业农村部渔业渔政管理局指导下,中国水产科学研究院和青岛市生态学会分别于2021年9月、2022年1月主办了题为“发展碳汇渔业科技、服务国家双碳战略”和“贝类养殖生态系统碳汇过程、机制与扩增模式”的学术研讨会。作者根据大家所关注的问题,将在会议上所作的主旨报告整理成文,主要内容包括渔业碳汇与

碳汇渔业定义修订、贝类养殖是碳汇而不是碳源、海水贝藻养殖碳汇量评估和健康持续、深入发展碳汇渔业的相关建议。

1 渔业碳汇与碳汇渔业定义修订

修订后的渔业碳汇与碳汇渔业定义如专栏1所示,包括基本定义以及相关问题的说明。

2010年渔业碳汇与碳汇渔业定义是按照政府间

* 青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费(2022QNLM040003-4)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系共同资助 [This work was supported by the Marine S & T Fund of Shandong Province for the Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2022QNLM040003-4), and China Agriculture Research System of MOF and MARA].

① 通信作者:唐启升,中国工程院院士, E-mail: tangqs@ysfri.ac.cn

收稿日期:2022-04-15, 收修改稿日期:2022-04-15

气候变化专门委员会(IPCC)关于“碳汇”和“碳源”的确认原则(IPCC, 2007)撰写的,解释了通过渔业生产活动促进水生生物“移走”CO₂等温室气体的过程和机制(唐启升, 2010)。本次修订除了文字修改之外,在 IPCC 原则和原定义基础上,强调了渔业碳汇功能和增汇的 3 种基本表达方式和水生植物在渔业碳汇中的重要作用。即渔业通过水生藻类养殖和采捞、滤食性贝类和鱼类等生物的养殖和收获、渔业生物群体

种类食物网机制和摄食生长在不同的营养层级使用碳产品和捕捞增殖等生产活动,直接或间接地吸收或使用水体中的 CO₂, 促进碳“移出和储存”功能的发挥,提升了水域生态系统的碳汇能力。但是,不论哪一种方式,渔业碳汇功能的初始过程主要是由或通过水生植物繁殖生长过程中光合作用吸收水体中的 CO₂等碳元素完成的,水生植物作为碳汇生物在渔业碳汇形成机制中发挥了至关重要的作用。

专栏 1: 渔业碳汇与碳汇渔业定义

Special column 1: The definition of fisheries carbon sink and carbon sink fisheries

渔业碳汇:是指根据政府间气候变化专门委员会关于碳汇和碳源的解释(IPCC, 2007)和水生植物固碳特点,通过渔业生产活动促进水生生物吸收或使用水体中 CO₂等温室气体,并通过收获把这些已经转化为生物产品的碳移出水体或通过生物沉积作用将其沉降于水底的过程和机制。由于这些碳产品或被再利用或被储存,这个过程、机制及其结果实际上提升了水域生态系统吸收和储存大气 CO₂的能力,碳汇功能得到了更好更多的发挥,因此,渔业碳汇对实现“碳中和”的贡献是现实、高效、有价值的。渔业碳汇也被称之为“可移出的碳汇”、“可储存的碳汇”和“可产业化的蓝碳”。

在渔业生产活动中,碳汇功能发挥和增汇有 3 种基本表达方式:

1. 水生藻类是典型的碳汇生物,如养殖藻类海带、江蓠、麒麟菜等和采捞藻类浒苔、巨藻等,在繁殖生长过程中通过光合作用吸收水体中的 CO₂等碳元素,直接发挥碳汇功能,增加碳汇;

2. 滤食性贝类(如牡蛎、蛤、扇贝等双壳贝类)和鱼类(如鲢、鳙等)等养殖生物,在成长过程中通过大量滤食浮游植物及有机物碎屑等颗粒有机碳以及贝壳形成过程中使用无机碳,间接促进了碳汇功能的发挥。因为这些养殖生物滤食过程中,在大量使用以浮游植物为主的颗粒有机碳的同时,又促进了浮游植物的再繁殖和生长,进而加大了对水体中 CO₂等碳元素的吸收和使用,产生了新的碳汇产品;

3. 渔业生物群体(如捕捞群体、增殖群体等),包括以浮游生物、贝藻类以及其他较低营养层次种类为食的鱼类、甲壳类、头足类及贝类等生物资源种类,通过食物网机制和摄食生长,在不同的营养层级使用碳产品,间接促进了碳汇功能发挥。这些较高营养层次的生物资源种类以水域中的天然饵料为食,在食物链的较低层大量消耗和使用了以浮游植物为主的颗粒有机碳,对它们的捕捞和增殖,实质上是从水域中移出了相当量的碳,增加了碳汇。

显然,渔业碳汇不仅包括藻类通过光合作用和滤食性贝类、鱼类等养殖生物大量滤食颗粒有机碳从水体中吸收使用的碳,还包括渔业生物资源种类通过食物网机制和摄食生长所使用的碳。但是,不论哪一种方式,渔业碳汇功能的初始过程主要是由或通过水生植物繁殖生长过程中光合作用吸收水体 CO₂等碳元素完成的,水生植物在渔业碳汇形成机制中发挥至关重要的作用。

碳汇渔业:是指能够发挥生物碳汇功能、具有直接或间接降低 CO₂浓度的渔业生产活动,是绿色可持续发展理念在渔业领域的具体体现。

现实中,凡是不需要投饵的渔业生产活动,就具有碳汇功能,可能形成生物碳汇,相应地可称之为碳汇渔业,包括藻类养殖、滤食性贝类和鱼类等养殖、增殖渔业(增殖放流、人工鱼礁)、休闲渔业以及捕捞渔业等。

IPCC 关于碳汇和碳源的解释(2007):

碳汇是指从大气中移走 CO₂、甲烷等温室气体、气溶胶或它们初期形式的任何过程、活动和机制;

碳源是指向大气释放 CO₂、甲烷等温室气体、气溶胶或它们初期形式的任何过程、活动和机制。

2 贝类养殖是碳汇而不是碳源

判断贝类养殖是碳汇还是碳源的关键是识别养殖生产活动中使用、移出、储存和释放 CO₂的过程和数量。一般来说,使用碳多于释放碳就是碳汇,反之则是碳源,不应以单项指标为依据,例如,仅根据“贝

壳形成过程中释放 CO₂”就断定是碳源,显然是不合理的。事实上,贝壳形成的化学反应式亦有清楚的说明:贝壳“每形成 1 mol 的 CaCO₃, 会释放 1 mol 的 CO₂, 但可以吸收 2 mol 的 HCO₃⁻(张继红等, 2005)”,表明移出多于释放。若从整个养殖生产被使用碳的数量来看,贝壳钙化释放碳的比例就更小了。因此,只

有明晰贝类养殖对碳使用的全过程, 才能获得正确的判断。

首先, 需要确认的是我国贝类养殖绝大多数不投放饵料, 这是贝类养殖具有碳汇功能的重要前提, 因为绝大多数贝类具有很强的滤食能力(方建光等, 1996; 匡世焕等, 1996; 张继红等, 2005), 这些贝类在养殖活动中, 通过滤食以浮游植物为主的颗粒有机碳产生了大量吸收使用水体中 CO_2 等碳元素的效应。2016—2020 年海水贝类养殖产量统计结果和相关研究表明: 除了螺、鲍以及其他少数种类外, 约 95% 的贝类为滤食性, 不需要投饵, 如主要养殖贝类牡蛎、蛤、扇贝、贻贝、蛭、蚶、江珧等(已占产量 92%)(农业农村部渔业渔政管理局等, 2017—2021; 唐启升等, 2016)。这意味着我国近海年产 1400 多万 t 的贝类养殖需要的能量基本来自于养殖水体, 即通过大量滤食使用浮游植物及有机物碎屑等颗粒有机碳以及贝壳形成过程中使用无机碳, 由于没有额外的碳添加(不投饵), 即便是个体释放出来的 CO_2 在自系统中也会被浮游植物再次吸收, 溢出水体外数量不会太大, 与被使用的碳量相比其比例就很小了。假若是投饵, 形成碳添加, 情况就会完全相反, 可能成为碳源, 这也是为什么当初在碳汇渔业定义中强调了“凡是不需要投饵的渔业生产活动, 就具有碳汇功能”的原因。

其次, 简化的生物能量收支分配模型(Warren *et al.*, 1967)能够清楚表达贝类个体养殖活动中碳使用、移出、储存或释放的基本过程、机制和数量, 故可将能量收支分配模型表达式改写为:

$$\text{使用碳} = \text{移出碳} + \text{储存碳} + \text{释放碳}$$

式中, 使用碳是原模型中从食物和水体中摄取的能量(C), 即贝类个体通过滤食大量使用以浮游植物为主的颗粒有机碳以及贝壳形成过程中使用的碳, 同 IPCC (2007)定义的移走碳, 亦可称之为总碳汇; 移出碳和储存碳分别为原模型中生长能(G)和排粪能(F)/排泄能(U)所用的碳, 合称为移出储存碳, 相当于使用碳中一部分碳与释放碳相抵消达到碳中和之后的净碳汇; 释放碳为原模型中代谢能(R), 包括呼吸等代谢产物和贝壳钙化产生的碳。因此, 使用碳的来源及其分量的多少应该是判断贝类养殖“是碳汇还是碳源”的数量依据。

根据能量收支研究, 以约占产量 89% 的牡蛎、蛤、扇贝、贻贝、蛭的代表种研究结果为依据, 概算 2016—2020 年我国海水贝类养殖使用碳、移出碳、储存碳和释放碳比例的平均状况见表 1。表 1 中的数据表达

了以下基本事实:

使用碳的数量平均近 3 倍于释放碳, 按种类计: 牡蛎 2.8 倍、蛤 2.5 倍、扇贝 3.3 倍、贻贝 5.5 倍、缢蛭 1.8 倍, 加权平均为 2.87 倍。也就是说在这些贝类养殖过程中虽然释放了 1 份 CO_2 , 但是却吸收使用了近 3 份 CO_2 , 相当于净吸收使用或减少了水体中近 2 份 CO_2 , 其中贻贝的增汇效率最高(相当于释放 1 份使用 5.5 份)。显然, 这是一些不应该被忽略的重要数量依据。

释放碳中呼吸放碳和贝壳钙化放碳, 因种类不同有较大的差异。按照上述种类顺序, 呼吸放碳量分别占摄食碳量的 22.5%、38.2%、17.2%、8.8%、58.8%, 而使用碳的数量平均 6 倍多于贝壳钙化放碳(分别为 4.2、9.6、4.9、8.8、9.6 倍, 加权平均为 6.72 倍)。很明显, 与其他贝类相比, 蛭等埋栖型种类呼吸放碳量较高, 而贝壳占体重比例较大的牡蛎等钙化放碳量较高。

净碳汇(移出储存碳)在使用碳中占有较高的比例, 按种类计: 牡蛎 64.3%、蛤 59.4%、扇贝 69.4%、贻贝 81.8%、缢蛭 43.0%, 加权平均为 63.28%, 表明贝类养殖过程中, 在移走碳与释放碳达到自身碳中和之后仍然剩余近 2/3 的碳汇为减少大气 CO_2 做贡献。

以上分析和数据表明, 在不投饵的前提下, 无论从养殖活动中贝类对碳的使用还是从能量收支的角度解析碳移走与释放过程, 均证实贝类养殖通过滤食颗粒有机碳等方式大量使用了 CO_2 , 发挥了滤食性贝类的增汇作用, 大大提升了水域生态系统碳吸收和储存能力, 贝类养殖是碳汇而不是碳源。

3 海水贝藻养殖碳汇量评估

我国是世界上最大的海水贝类和藻类养殖生产国家, 进入 21 世纪, 产量仍呈增加趋势, 据联合国粮农组织预测(FAO, 2020)包括中国贝藻养殖在内的世界水产养殖产量到 2030 年将增加 32%。《中国渔业统计年鉴》和联合国粮农组织《世界渔业和水产养殖状况》的统计数据表明: 2016—2020 年我国海水贝藻养殖产量为 1638~1742 万 t, 年均 1682 万 t, 占我国海水养殖产量的 82.5%, 约占世界海水养殖产量的 1/2; 2016—2020 年我国海水贝类养殖产量为 1421~1480 万 t, 年均 1444 万 t, 占我国海水养殖产量的 70.8%, 约占世界海水贝类养殖产量的 84%左右; 2016—2020 年我国海水藻类养殖产量为 217~262 万 t, 年均 238 万 t, 占我国海水养殖产量的 11.7%, 占世界海水藻类养殖产量近 1/2。如前所述, 我国海水贝类养殖以具有显

表 1 5 种主要养殖贝类移出碳/储存碳/释放碳占使用碳比例和加权平均
Tab.1 The proportion and weighted average for carbon removal, storage, release to carbon usage of five main farmed shellfish species

种类 Species	使用碳 ¹ Carbon usage /%	移出储存碳 Carbon removal and storage			释放碳 ² Carbon release			年产量 ³ Annual yield /(10 ⁴ t)
		移出碳	储存碳	小计	呼吸碳	钙化碳	小计	
		Carbon removal /%	Carbon storage /%	Subtotal /%	Respiration /%	Calcification /%	Subtotal /%	
牡蛎 ⁴ Oyster	14 970.0 (100)	26.9	37.4	64.3	11.7	24.0	35.7	510.1
蛤 ⁵ Clam	3 310.1 (100)	13.2	46.2	59.4	30.2	10.4	40.6	412.3
扇贝 ⁶ Scallop	10 170.0 (100)	30.2	39.2	69.4	10.2	20.4	30.6	187.2
贻贝 ⁷ Mussel	7 362.5 (100)	14.5	67.3	81.8	6.8	11.4	18.2	89.4
缢蛏 ⁸ Razor clam	4 561.6 (100)	17.6	25.4	43.0	46.6	10.4	57.0	85.4
加权平均 ⁹ Weighted average	(100)	21.5	41.8	63.3	19.4	17.3	36.7	

注：1：贝类个体在一个养殖周期内使用的碳单位(mg C)；2：养殖贝类的释放碳包括呼吸等代谢产物和贝壳钙化碳，表内分别简称呼吸碳和钙化碳；3：养殖贝类 2016—2020 年平均产量(农业农村部渔业渔政管理局等, 2017—2021)；4：能量收支基本数据根据任黎华(2014)；5：能量收支基本数据根据姜妮妮等(2022)；6：能量收支基本数据根据唐启升等(2013)；7：能量收支基本数据根据姜妮妮等(待发表)；8：能量收支基本数据根据蒋增杰等(待发表)；9：以 5 个主要养殖种类平均年产量为权重的加权平均

Note: 1: Carbon usage by shellfish individuals during a culture cycle (mg C); 2: Carbon release of farmed shellfish includes respiration and other metabolites and shell calcification carbon release, which are referred as respiration carbon and calcification carbon respectively; 3: Average yield of farmed shellfish from 2016 to 2020 (Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs *et al*, 2017—2021); 4: Basic data of energy budget according to Ren (2014); 5: Basic data of energy budget according to Jiang *et al* (2022); 6: Basic data of energy budget according to Tang *et al*(2013); 7: Basic data of energy budget based on Jiang *et al* (to be published); 8: Basic data of energy budget according to Jiang *et al* (to be published); 9: Weighted average of the average annual yield of five main farmed species

著碳汇功能的滤食性双壳贝类为主，约占产量的 95%，主要养殖种类为牡蛎、蛤、扇贝、贻贝、蛏、蚶、江珧等(2016—2020 年占海水贝类养殖产量的平均百分比分别为 35.3%、28.6%、13.0%、6.2%、5.9%、2.6%、0.1%，合计为 91.7%)，而藻类养殖则以碳汇效率较高的大型藻类为主，如主要养殖种类海带、江蓠、紫菜、裙带菜等(2016—2020 年占海水藻类养殖产量的平均百分比分别为 65.3%、14.1%、7.9%、7.7%，合计为 95.0%)。显然，贝藻养殖生产是海洋碳汇渔业发展最重要的部分，增汇的物质基础。

我国近海贝藻养殖总碳汇量计算基本方法参考以往的研究(张继红等, 2005; Tang *et al*, 2011)；考虑到呼吸放碳因素，藻类总碳汇量根据净碳汇/0.75 估算(姚海芹等, 2016; Xu *et al*, 2017)。贝藻养殖总碳汇量概算结果如图 1 所示，随着海水养殖生产持续发展，近 20 年贝藻养殖总碳汇量有较大幅度的增加，从 2001 年 394 万 t 增加到 2020 年 659 万 t，近三年(2018—2020)趋于稳定，总碳汇量为 640~659 万 t，平均 648 万 t (CO₂ 为 2375 万 t)，相当于每年义务造

林 87 万 hm² [根据每公顷人工林每年约吸收 27.45 t CO₂ 计(李怒云, 2007)]。贝类碳汇各分量和藻类碳汇量的年际变化情况见图 2，由于贝类各分量碳是按照表 1 的数量比例换算的，故其变化趋势与总碳汇一致，近三年(2018—2020)贝类使用碳(总碳汇)为 542~554 万 t，平均 547 万 t；贝类移出碳为 117~119 万 t，平均 118 万 t；贝类储存碳为 227~232 万 t，平均 229 万 t；贝类释放碳为 199~203 万 t，平均 201 万 t；藻类碳汇为 95~105 万 t，平均 101 万 t。

贝藻养殖净碳汇量的年际变化情况见图 3，其中：贝藻养殖净碳汇从 2001 年 255 万 t 增加到 2020 年 430 万 t，近三年(2018—2020)为 416~430 万 t，平均 422 万 t (CO₂ 为 1547 万 t)，相当于每年义务造林 56 万 hm²；贝类养殖净碳汇从 2001 年 219 万 t 增加到 2020 年 351 万 t，近三年(2018—2020)为 343~351 万 t，平均 346 万 t (CO₂ 为 1269 万 t/年)；藻类养殖净碳汇从 2001 年 36 万 t 增加到 2020 年 79 万 t，近三年(2018—2020)为 71~79 万 t，平均 76 万 t (CO₂ 为 279 万 t/年)。

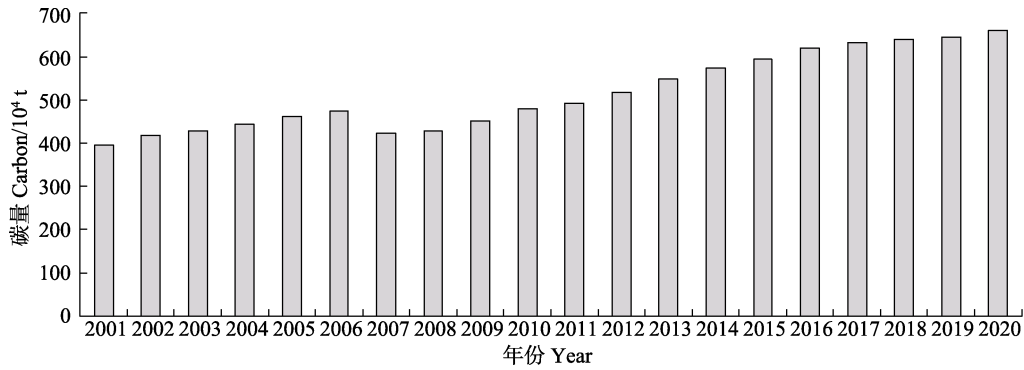


图 1 2001—2020 年我国近海贝藻养殖总碳汇年际变化

Fig.1 Interannual variation of total carbon sink in mariculture of shellfish and macroalgae from 2001 to 2020 in China coastal ocean

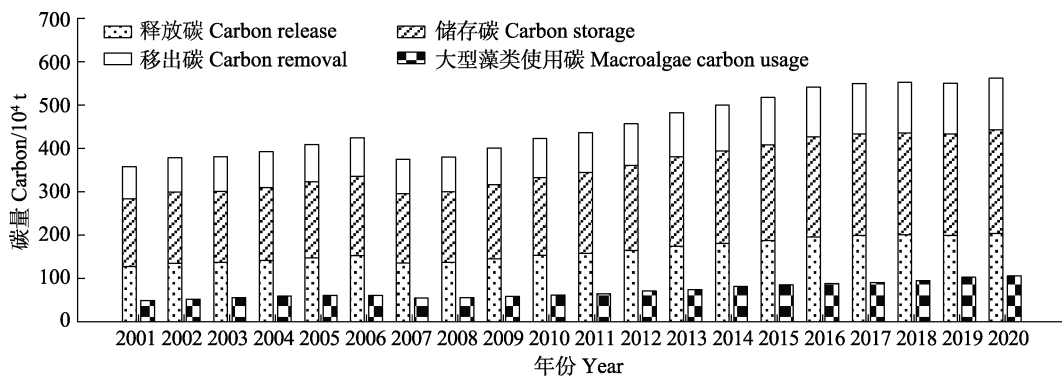


图 2 2001—2020 年我国近海贝藻养殖总碳汇各分量年际变化

Fig.2 Interannual variation of total carbon sink components in mariculture of shellfish and macroalgae from 2001 to 2020 in China coastal ocean

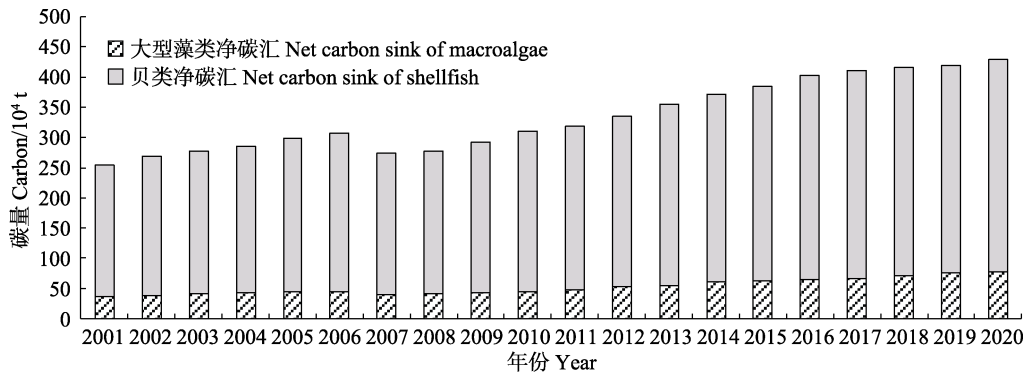


图 3 2001—2020 年我国近海贝藻养殖净碳汇年际变化

Fig.3 Interannual variation of net carbon sink in mariculture of shellfish and macroalgae from 2001 to 2020 in China coastal ocean

4 健康持续、深入发展碳汇渔业的相关建议

很少有哪一种产业活动能像碳汇渔业一样,既为社会生活提供必需的粮食安全和营养安全产品,又能发挥现实、高效、有价值的增汇作用,产生一举多赢的效应,对实现碳中和的贡献如同植树造林。另外,碳汇渔业定位为绿色可持续发展理念在渔业领域的

具体体现是值得大力发展的朝阳产业。为此,提出健康持续、深入发展碳汇渔业的相关建议。

4.1 建立碳汇渔业示范区

在渔业绿色发展的框架下,以生态模式为主,建立碳汇渔业示范区,包括海水、淡水各类示范区;生态特点各异、生产形式多样的各类示范区,如多营养层次综合养殖(IMTA)和稻渔综合种养(IRFA)等,

如藻类养殖、滤食性贝类和鱼类等养殖、增殖渔业、休闲渔业以及捕捞渔业等,示范增汇和探讨碳汇扩增途径。

4.2 开展渔业碳汇扩增专题研究

为了碳汇渔业健康持续发展和碳汇扩增奠定坚实的科学基础,不仅需要加强应用研究,更需要加强基础和应用基础研究,特别要从生态系统功能与生物地球化学循环的双重角度加强渔业碳汇功能、扩增途径与潜力的基础研究和实验研究,包括加快主要养殖贝类及其附着生物能量收支和影响因素的实验研究、加强贝类储存碳的碳形态转变、沉积和再悬浮动态规律的实验与监测研究、加强养殖系统(特别是贝藻养殖系统)碳氮磷等生源要素循环与储碳模型研究、加强具有高效固碳能力的海洋植物碳汇功能及其效率提升研究、重视捕捞和增殖资源种类碳收支(特别是代谢碳)生理生态学实验与生态系统储碳能力等研究。

4.3 重视和鼓励碳汇渔业碳交易类型、机制和市场研究与实践

碳汇渔业的碳交易类型、机制和市场研究与实践是目前较薄弱的的一个方面,应该重视相关研究,鼓励吸引社科和经济领域的专家积极参与,鼓励支持企业及相关机构进行大胆的尝试。

参 考 文 献

- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook. Beijing: China Agriculture Press, 2017–2021 [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2017–2021]
- FANG J G, KUANG S H, SUN H L. *et al.* Study on the carrying capacity of Sanggou Bay for the culture of scallop *Chlamys farreri*. Marine Fisheries Research, 1996, 17(2): 18–31 [方建光, 匡世焕, 孙慧玲, 等. 桑沟湾栉孔扇贝养殖容量的研究. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 18–31]
- FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome, 2020
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, PACHAURI R K, REISINGER A, eds. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007, 104
- JIANG W W, FANG J H, LIN F, *et al.* Evaluation of ecological carrying capacity and functions of Manila clam, *Ruditapes philippinarum* in Jiaozhou Bay. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(5): 61–71 [姜妮妮, 房景辉, 蔺凡, 等. 胶州湾菲律宾蛤仔生态容量评估及其碳汇功能. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 61–71]
- KUANG S H, SUN H L, LI F, *et al.* Comparative feeding physiology of wild and cultured populations of Pacific oyster *Crassostrea gigas*. Marine Fisheries Research, 1996, 17(2): 87–94 [匡世焕, 孙慧玲, 李锋, 等. 野生和养殖牡蛎种群的比较摄食生理研究. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 87–94]
- LI N Y. Forestry carbon sequestration in China. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007 [李怒云. 中国林业碳汇. 北京: 中国林业出版社, 2007]
- REN L H. Research on carbon sequestration of cultured oyster *Crassostrea gigas* and its fouling organisms in Sungo Bay. Doctoral Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2014 [任黎华. 桑沟湾筏式养殖长牡蛎及其主要滤食性附着生物固碳功能研究. 中国科学院大学博士研究生学位论文, 2014]
- TANG Q S, FANG J G, ZHANG J H, *et al.* Impacts of multiple stressors on coastal ocean ecosystems and integrated multi-trophic aquaculture. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(1): 1–11 [唐启升, 方建光, 张继红, 等. 多重压力胁迫下近海生态系统与多营养层次综合养殖. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 1–11]
- TANG Q S, HAN D, MAO Y Z, *et al.* Species composition, non-fed rate and trophic level of Chinese aquaculture. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(4): 729–758 [唐启升, 韩冬, 毛玉泽, 等. 中国水产养殖种类组成、不投饵率和营养级. 中国水产科学, 2016, 23(4): 729–758]
- TANG Q S, ZHANG J H, FANG J G. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems. Marine Ecology Progress Series, 2011, 424: 97–104
- TANG Q S. Carbon sink fisheries and mariculture — A strategic emerging industry. 2010 [唐启升. 碳汇渔业与海水养殖业——一个战略性的新兴产业. 2010, <http://www.ysfri.ac.cn/>]
- WARREN C E, DAVIS G E. Laboratory studies on the feeding, bioenergetics and growth of fish. The biological basis of freshwater fish production (GERKING S D, ed). Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1967, 175–214
- XU D, SCHAUM C E, LIN F, *et al.* Acclimation of bloom-forming and perennial seaweeds to elevated pCO₂ conserved across levels of environmental complexity. Global Change Biology, 2017, 23(11): 4828–4839
- YAO H Q, LIANG Z R, LIU F L, *et al.* Preliminary studies on the photosynthetic and respiration rate of young sporophyte of a new *Saccharina* variety “Haitian No.1” using liquid-phase oxygen measurement system. Progress in Fishery Science, 2016, 37(1): 140–147 [姚海芹, 梁洲瑞, 刘福利, 等. 利用液相氧电极技术研究“海天1号”海带(*Saccharina japonica*)幼孢子体光合及呼吸速率. 渔业科学进展, 2016, 37(1): 140–147]

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. *Advances in Earth Science*, 2005,

20(3): 359–365 [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. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 359–365]

(编辑 马瑾艳)

Clarification on the Definitions and Its Relevant Issues of Fisheries Carbon Sink and Carbon Sink Fisheries

TANG Qisheng^{1,2}①, JIANG Zengjie^{1,2}, MAO Yuze^{1,2}

(1. *Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Key Laboratory of Carbon Sink Fisheries, Qingdao, Shandong 266071, China*; 2. *Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266071, China*)

Abstract Based on the Intergovernmental Panel on Climate Change interpretation of carbon sink and carbon source, and the characteristics of carbon sequestration by aquatic plants, this review revises the definition of fisheries carbon sink and carbon sink fisheries proposed in 2010. We emphasize the basic expression of the function of fisheries carbon sink and the important role of aquatic plants in them. We further explain the process and mechanism of promoting aquatic organisms to "remove and store" greenhouse gases (such as carbon dioxide) through algae culture, filter-feeding shellfish and fish aquaculture, fishing and enhancement of fishery stock, and other means. We analyzed the process and mechanism of carbon dioxide use by non-fed shellfish aquaculture by filtering phytoplankton and particulate organic matter, such as organic debris. Further, the characteristics of carbon usage, removal, storage, and release, and their quantitative relationships with energy budget are discussed. The analyses confirmed that shellfish aquaculture enhances the carbon sink capacity of aquatic ecosystem, and is a carbon sink rather than a carbon source. Our results revealed that with the continuous development of mariculture production, the carbon sink of shellfish mariculture in the coastal ocean of China has substantially increased in the past 20 years. The total carbon sink increased from 3.94 million tons in 2001 to 6.59 million tons in 2020. This included an average of 6.48 million tons/year in the past three years (2018—2020), equivalent to 870 000 hectares of compulsory afforestation per year. The net carbon sink increased from 2.55 million tons to 4.3 million tons in 2020, with an average of 4.22 million tons/year in the last three years (2018—2020), equivalent to 560 000 hectares of compulsory afforestation per year. Finally, relevant suggestions for sustainable and further development of carbon sink fishery are proposed.

Key words Fisheries carbon sink; Carbon sink fisheries; Farmed shellfish carbon usage, removal, storage, and release; Carbon sink assessment for shellfish and macroalgae mariculture; Development suggestions

① Corresponding author: TANG Qisheng, E-mail: tangqs@ysfri.ac.cn