

引用格式:徐敬俊,覃恬恬,韩立民. 海洋“碳汇渔业”研究述评[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 161-172. [Xu J J, Qin T T, Han L M. A review of research on marine carbon sink fisheries[J]. *Resources Science*, 2018, 40(1): 161-172.] DOI :10.18402/resci.2018.01.15

海洋 碳汇渔业 研究述评

徐敬俊,覃恬恬,韩立民

(中国海洋大学管理学院,青岛 266100)

摘要 :中国海洋渔业正处于产业化快速发展与环境承载力不堪重负的拐点阶段,发展低碳化海洋渔业是中国渔业可持续发展必然选择,优化和创新碳汇渔业产业运行机制面临着迫切的实践需要,发展碳汇渔业,对于从根本上推进中国海洋渔业供给侧结构性改革意义重大。通过对“碳汇渔业”内涵、固碳机理、碳汇能力以及产业发展路径研究四个方面的文献回顾与简要评述,认为碳汇渔业的研究还处于初期阶段,产业发展基础薄弱,亟需科学的政策调适与制度安排才能予以保障,宏观激励政策的制定有助于推动碳汇渔业的发展,如何选择合理的海洋水产养殖业产业组织模式将是今后研究的重点。

关键词 :碳汇渔业;环境承载力;固碳机理;海水养殖

DOI :10.18402/resci.2018.01.15

1 引言

渔业作为中国传统的优势海洋产业,自1990年代始,其产值和出口额连续二十多年居世界首位。虽然中国海洋渔业已经取得巨大的成就,但是随着中国沿海地区对海洋开发力度的不断扩大,大规模的海水养殖和海洋捕捞已经对海洋的生态环境、岸线环境造成严重的影响,海水富营养化现象严重。中国海洋渔业正处于产业化快速发展与环境承载力不堪重负的拐点阶段。无论是出于生计渔业还是商业渔业视角的考量,其制度安排均要进行适当调适,从而促进中国海洋渔业的可持续发展。联合国在进入21世纪的报告中指出,核安全、气候与环境变化是21世纪人类生存面临的重大威胁。地球碳循环过程是影响全球气候变化的关键因素,因此,发展低碳化海洋渔业是中国渔业可持续发展必然选择。政府相关部门已经开始重视海洋渔业的低碳化转型,并在全球率先提出了碳汇渔业的发展理念。

当前,优化和创新碳汇渔业的产业运行机制面

临着迫切的实践需要。为应对气候与环境的变化,维护生态安全,十八届五中全会提出了创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,这五大发展理念指明了下一个“五年计划”乃至更长时期内中国海洋水产养殖产业的发展思路、发展方向与着力点,即必须实行水产养殖产业的绿色发展、低碳发展、循环发展、清洁发展。“十三五”规划纲要也提出要建立“海洋生态红线制度”、“加强海洋气候变化研究”、“实施重点行业清洁生产改造”、“大力推进污染物达标排放和总量减排”、“坚持减缓与适应并重,主动控制碳排放,落实减排承诺,增强适应气候变化能力,深度参与全球气候治理,为应对全球气候变化作出贡献”^[1]。由于碳汇渔业是绿色的、低碳的,也是“绿色、低碳发展理念的重要成分”,因此,“碳汇渔业”将引导和推动现代渔业又好又快的发展^[1,2]。作为一个负责任大国,中国承诺2016—2020年将把每年的二氧化碳排放量控制在100亿t以下;根据2016年11月4号正式生效的《巴黎协定》,中国二氧化碳的排放在2030年左右达到峰值,并力争早于

收稿日期:2016-11-01;修订日期:2017-10-22

基金项目:山东省社会科学规划项目(17CGLJ16);国家社科基金重大项目(14ZDA040)。

作者简介:徐敬俊,男,山东青岛人,副教授,研究方向为海洋经济与管理、渔业经济与管理。E-mail: xujingjun@163.com

1) 中华人民共和国国务院,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》,2016年3月。

2030年实现这一目标,同时到2030年单位GDP二氧化碳排放要比2005年下降60%~65%,推动全国统一的碳排放交易市场的尽快建立。目前,中国正处在经济发展的“新常态”阶段,硬性减排付出的经济代价不言而喻,吸收和储藏(碳汇)二氧化碳成为不二的选择。从目前科学技术的发展水平来看,捕集与封存温室气体主要通过矿物封存、地质封存等手段,这种减排方式,不但成本高、难度大,而且还面临许多意想不到的风险(例如泄露风险);而通过森林、草场、鱼类等生物方式进行的自然碳汇扩增模式,不仅操作方式简单、运行成本低廉,而且可以保护生物多样性,产生多种效益;增加森林蓄积量、草场维护这类陆地生物碳汇方式固然重要,但其储碳时间比较短,成本相对较高,而通过碳汇渔业固碳的扩增模式在发展低碳经济、参与温室气体减排的治理控制中具有巨大的潜力和不可替代的作用,特别是海洋生物死亡之后而形成的保留在深海沉积物中的有机碎屑,其碳循环周期可达上百万年之久,远超陆地生物的碳循环周期。因此,通过碳汇渔业品种的推广和海水养殖产业的升级,大力发展碳汇渔业,有利于从根本上推进中国海洋渔业供给侧结构性改革。

正是基于上述背景和研究意义,关于“碳汇渔业”的研究文献近年来大量涌现。毫无疑问,“碳汇渔业”,尤其是海洋“碳汇渔业”对改变和提升渔业生产力和海洋生态文明建设的发展具有重要影响,但人们对海洋“碳汇渔业”的认识以及对碳汇渔业固碳机理的研究牵涉很多因素,无论是产业界还是科学界并未达成一致认识。基于此,本研究通过对相关文献的搜集和梳理,以有助于在科学研究与产业发展之间搭建一座交流的桥梁,更好地推动“碳汇渔业”的良性发展。

2 “碳汇渔业”内涵的研究

近年来,由于温室气体排放所引起的全球环境问题日益突出,关于“碳汇”与“碳源”的讨论不断升级,催生了《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》、《哥本哈根协议》、《巴黎协定》等一系列推动国际合作、实现全球应对气候变化长期目标的国际性文件,碳汇经济的理念日益受到关注。

海洋水体是渔业活动的依托,生物群落与其依存的海洋生境碳汇潜力巨大:海洋面积占地球总面积的70%多,蔚蓝色的海水给予了地球家园以“蓝色星球”的称谓;海洋系统是地球上最大生态系统,其生物群落与海洋环境共同形成了地球上最大的碳汇——蓝色碳汇;蓝色碳汇的总碳汇量高到3.9万亿t,占全球总碳量的93%,约为大气的50多倍,人类活动产生的CO₂大约有30%被海洋吸收^[1],海洋在全球气候变化中发挥着“缓冲器”的作用;中国拥有300多万km²海洋国土,约占中国陆地总面积的1/3,巨大的“碳汇”潜力没有得到应有的重视。在海洋生态系统中,各类生物构成了从初级生产者到顶级掠食者的复杂的食物链和食物网,其在蓝色碳汇功能中扮演着重要角色;拥有海洋碳汇功能的生物类群或生态系统主要包括浮游生物、大型藻类、贝类、红树林和珊瑚礁生态系统等,虽然它们的生长区域还不到全球海底面积的0.5%,总量只有陆生植物的0.05%,但它们的碳储量(循环量)却与陆生植物相当,有超过一半或高达70%的碳被海洋植物捕集,其中一小部分可通过沉降作用进入海洋沉积物,很大一部分会被重新矿化,还有一部分会转化为溶解有机碳等形成蓝色碳捕集和移出通道^[1]。到2030年,中国海水养殖产量将达到2500万t,海水碳汇养殖将每年从水体中移出碳大约230万t,到2050年,中国海水养殖总产量预计达到3500万t,海水养殖碳汇每年从水体中移除碳总量可达400多万t^[4]。上述统计数字表明,碳汇渔业的发展对于中国乃至全球气候变化的治理、温室效应的控制、二氧化碳的减少都有不容小觑的贡献。

碳汇渔业是一个新兴理念,但其实海洋科学家对浅海生态系统的固碳能力的研究自20世纪50年代就开始了。考虑到季节的和年度的因素,研究者连续若干年对中国沿海的海草场取样,分别于1958年10—12月取得162个样品,1959年11—1960年6月取得65个样品,1974—1975年取得43个样品,1979年取得3个样品,共273个样品,研究结果显示,尽管海草生长在海洋边缘部分一个相当狭窄的地带,但这是一个具有极高生产力的地带,其作为很多经济鱼类和无脊椎动物的天然渔礁,碳的固定率几乎可以和热带雨林相比^[5];国外学者也根据海草

2018年1月

数据换算法则,计算了不同藻类的碳的固定量^[6-8]。海水中的浮游植物尽管只占地球生物圈初级生产者生物量的0.2%,却提供了地球近50%的初级生产量,支撑了海洋中从浮游动物到鲸鱼的庞杂食物链,不但为人类提供了一个生物多样性的世界和巨大的食物来源,而且浮游植物通过光合作用,吸收二氧化碳释放氧气,从根本上改变着人类的生存环境^[9]。根据水生生物固碳的特点,低级营养层次的生物通过光合作用从水体中吸收碳元素,较高营养层次的生物通过食物链和食物网机制以及滤食生长活动,待成熟后对它们进行捕捞和收获,这一活动过程就是碳汇渔业的生产。“碳汇渔业”主要是指能促进水生生物的碳汇能力,清除或移出海水中溶解的二氧化碳气体,影响海洋碳循环能力的过程、活动或机制的渔业生产活动,因此,可以把能够充分发挥碳汇功能、具有直接或间接降低温室气体效果的渔业生产活动泛称为“碳汇渔业”,如藻类养殖、贝类养殖、滤食性鱼类养殖、增殖放流、人工鱼礁以及捕捞渔业等^[1,2]。由此可见,海洋碳汇渔业包括两个方面:一是贝、藻类海洋生物的养殖,其通过贝类的钙化以及藻类等浮游植物通过光合作用直接从水体中吸收碳元素产生有机碳(Organic Carbon, OC)而形成的生物碳汇移出水体;二是对以浮游生物和贝藻类等为食的掠食性渔类的养殖,这些掠食性生物资源通过食物链、食物网机制紧密联系,维持其生长活动,待其成熟后捕获形成可移出生物碳汇。

3 碳汇渔业固碳机理技术研究

海水养殖是碳汇渔业的主体部分,世界上海水养殖活动主要集中在亚洲,2012年亚洲养殖产量占世界总产量的88.39%,其中中国占世界总产量的61.7%,欧洲为4.32%(其中欧盟28个成员国只有1.89%)、北美为0.89%、日本为1.0%(数据不包括水生植物和非食用产品)^[10],加起来不到世界总产量的10%;而且从养殖品种来看,国外海洋水产养殖业主要从事贝藻类等品种的养殖数量所占比例不多,这也造成了收集国外关于碳汇渔业固碳机理的相关研究文献的困难。根据文献收集情况,目前关于碳汇渔业固碳机理技术的研究主要体现在三个方面:

一是关于近海养殖系统的增汇机理研究。在近海养殖业中,海洋生态系统中的初级生产者,主

要包括藻类等浮游植物以及细菌等自养型浮游生物,通过吸收光能和海水中溶解的无机碳,进行光合作用,制造有机物(将无机碳转化为有机碳),一部分自然死亡后随着海水交替而沉降到海底长期封存,这部分沉降到海底的沉积物形成的碳封存周期可达百万年之久,相对于陆地上树木、草场等植物形成的至多几十年的碳循环周期而言,可以称之为永久封存。这部分碳汇起到了降低海水二氧化碳分压的作用,加速了大气中的二氧化碳向海水的扩散溶解速度,促进了海洋的碳汇能力,增强了海洋对气候的调节作用^[2,9,11-20]。一部分通过复杂的食物链和食物网机制,向掠食性的渔业生物资源传递,待这些生物成熟后被捕捞或收获,将初级生产者通过光合作用而形成的有机碳(OC)移出,形成移出碳汇,经过消费再进入循环^[9, 21-23]。

二是关于外海渔业固碳技术方面的研究。相对于近海富营养化趋势的不断扩展,外海海域由于受到营养元素限制,初级生产力相对低下,通过适量的海洋施肥(例如大洋施铁试验),提高外海浮游植物的增殖能力,增加外海海域的初级生产力,将相对贫瘠的外海海域变成“蓝色粮仓”,进而提高海洋渔业的固碳能力^[24-28]。但是,在外海通过大洋施铁试验具有很复杂的生态影响,还需要进行深入研究。

三是基于生态系统动力学的碳循环过程及固碳技术研究。海洋碳循环物理过程与生物资源变化密切,地处海岸带的红树林、近海的珊瑚礁以及广袤的海底草床是维持和提高海洋生产力和生物多样性的的重要支持系统,这些生态系统中碳流通循环途径与固碳功能和潜力巨大^[3, 29-33],尽管此类研究不属于碳汇渔业的内涵,但通过深入研究典型海岸带生态系统的保护与修复技术,是人类利用海洋环境、提高海洋固碳效率、增加渔业生物碳汇的有效途径。

综上,碳汇渔业的固碳机理的研究特别注重陆架边缘海碳循环过程的研究。但是目前已知的储碳机制并不能解释碳汇渔业生产活动中有关的若干现象和问题,学界还有一些不同看法,有部分学者认为对近海生态系统的碳循环研究还需要作大量的工作,有些结论具有很大的不确定性,尤其在近海,不同海区中生态系统的食物链、网关系复杂,固碳不等于储碳,从海洋生产力的初级生产者——

浮游植物,到可移出碳的渔业生物资源之间的碳转换效率存在一定海域差异,因此营养盐浓度高的海域,其渔业生产力不一定就高,渔业生产力高也并不意味着碳汇能力就强,提高不同海域、不同渔业品种碳参数测定的科学性、准确测定各食物链、网之间的碳转换效率和深入研究控制碳循环的海洋生物地球化学过程是其研究关键^[15,19],针对这些不一致的看法或观点,需要加大研究力度,更深入的了解贝类和鱼类养殖等增加碳汇的问题,以便更好地揭示海洋渔业的碳汇机理与潜力。因此,海洋生物学家在碳汇渔业生产活动的固碳机理研发方面还有许多基础工作需要展开,也面临一定的挑战。

4 碳汇渔业碳汇能力的评价研究

海洋环境中超出生态平衡的过量固碳会导致有机物质大量增加,反而成了培养细菌的温床,而细菌的大量滋生不仅很快就把固定的有机碳呼吸成为二氧化碳再返回到大气中去,而且由于消耗大量的氧气,继而使得生态系统缺氧^[19]。因此人们只有通过收获成熟的渔获物将食物链/网传递的海洋植物光合作用固定的碳移出水体,才能使“渔业碳汇”作用得以发挥。只有通过准确地测定渔获物通过食物链、网之间的碳转换效率和碳参数,才能科学评价海洋渔业资源生物的碳汇能力。

关于渔业碳汇能力的评估的研究主要有以下两个方面:

一是碳汇能力估算方法的研究。根据贝藻养殖产量、贝藻体内碳元素的含量及其能量收支模型,贝藻养殖碳汇能力公式为^[21]:

$$C = F + U + R + G \quad (1)$$

式中 C 为贝藻类生物的摄食能; F 为生物粪便能,其将沉积于海洋深部; U 为排泄能; R 为生物呼吸等的代谢能; G 为生长能^[21]。

贝藻类养殖品种实际利用的颗粒有机碳相当于式中 C ,贝类的产量近似为式中的 G 部分。 G 在 C 中的比例不同,在6.13%~90.97%范围内;考虑产量因素,养殖贝类 G/C 的加权估算值约为25%^[21]。

为了使估算简化实用,将生物个体的生理代谢过程和整个食物链/网作为一个黑箱,根据各营养阶层间的生态转换效率,从人类最终收获的渔获量来反推各营养阶层生物的被捕食量和摄食浮游植

物的量,从而估算被摄食植物的固碳量^[34]。

大型藻类固碳强度的估算中应包括溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)向水体和沉积物的输送部分,其计算方程具体如下^[35]:

$$TC_{fix} = C_{bio} + DOC_{rel} + POC_{rel} \quad (2)$$

式中 TC_{fix} 为光合固碳总量; C_{bio} 为收获移除碳量; DOC_{rel} 为藻体释放的可溶性有机碳量; POC_{rel} 为藻体释放的颗粒有机碳及生物碎屑碳量^[35]。

藻类收获移除量较易确定,不同藻类生长过程中释放的DOC和POC占光合作用固碳量比重的经验系数(分别为 α 、 β)有较多研究成果可以参照,据此可以反推藻类的固碳强度:

$$TC_{fix} = \frac{C_{bio}}{1 - \alpha - \beta} \quad (3)$$

养殖贝类和大型藻类的碳汇能力也可以基于不同种类的产量及含碳量,参照相关研究成果分类进行计算然后加总,公式为^[36-39]:

$$\text{贝类碳含量} = \text{软体组织碳含量} + \text{贝壳碳含} \quad (4)$$

$$\text{软体组织碳含量} = \text{软体组织产量} \times \text{软体组织含碳量} \quad (5)$$

$$\text{贝壳碳含量} = \text{贝类产量} \times \text{贝壳比例} \times \text{贝壳含碳量} \quad (6)$$

$$\text{藻类碳含量} = \text{藻类产量} \times \text{藻体含碳量} \quad (7)$$

$$\text{碳汇能力}(C_T) = \text{贝类碳含量} + \text{藻类碳含量} \quad (8)$$

二是对碳汇能力评估的研究,按照上述碳汇能力估算公式,学者们从不同的视角进行了研究:或从大尺度海域或从养殖业类型分别对其碳汇总量进行了评估。据估算,渤海海域1980—2000年间捕捞渔业的年固碳量是283万~1008万t,黄海水域的年固碳量是361万~2613万t^[34];根据贝藻养殖产量、贝藻体内碳元素的含量及其贝类能量收支,2002年中国海水养殖的贝类和藻类使浅海生态系统的固碳量达300万t以上,并通过收获从海水中移出至少120万t的碳^[21];2009年中国海水藻类养殖固碳总量为78.38万t,全世界的藻类养殖固碳量为127.25万t^[35];环渤海区2009年海藻总产量为75.39万t,贝类总产量为48.92万t,参照相关生物学参数计算,贝类和藻类的养殖利用海洋生态系统中的碳达180多万t,直观的从海水中移出的碳高达57.42万t^[40];有的学者从物质质量和价值量两方面对碳汇渔业的贡

2018年1月

献进行了定量评估:物质质量评估结果显示,2009年广东省海水养殖的贝类和藻类收获可以从海水中移出碳约11万t,相当于39.6万t二氧化碳,价值量(封存固定这些二氧化碳所需要的费用)约为5900万~23 800万美元^[36];2010年河北省海水养殖总产量32.9万t,其中滤食性贝类产量为29.1万t,通过收获海水养殖贝类与藻类可实现碳汇作用约2.75万t,其中贝类软体组织中9259.35t、贝壳中18 152.57t、大型藻类藻体中33.76t,相当于减排二氧化碳10.1万t,折合人民币6038万元,此外,通过生物沉积作用可实现碳汇作用2.74万~6.91万t^[38];2005—2012年中国海水养殖的年均碳汇能力达到100万t以上,且近年来呈现出增加的趋势^[39];2010年中国海水贝类养殖直接碳汇总量约97万t,按省区排序,山东省位居第一,而按品种排序,牡蛎则是主要来源,长三角地区海水贝类养殖直接碳汇仅占总量的11.58%,通过优化海水贝类养殖结构,提高贻贝养殖比重以实现增汇,据估算,养殖结构调整可使江苏、浙江两省碳汇量分别提高到18 703.87t和9048.56t^[37];据计算,1999—2008年中国海水养殖贝藻类的总产量为8960~13 510万t,平均年固碳量为379万t,其中120万t碳从海水中移出(未计海底封存部分),按照林业碳汇的计量方法,相当于每年义务造林50万hm²,10年合计相当于造林500万hm²,2014年中国海水养殖贝类和藻类产量分别为1317万t和200万t,贝藻养殖的固碳量约为531万t,移出的碳168万t(贝类117万t、藻类51万t),比2008年增加了约38%,尽管不同养殖模式的碳汇效率是不同的,但不论是整体还是单位面积内贝藻养殖碳汇仍有扩增的可能^[41]。到2030年中国海水养殖将移出大约230万t碳,到2050年预计达到400万t以上^[4]。还有不少学者则评估了碳汇能力较强的主要养殖品的单位碳汇量。例如中国学者对烟台四十里湾浅海养殖海区双壳贝类(扇贝、贻贝和牡蛎等)和海带产品的碳含量评估等(具体见表1)。通过对不同养殖品种碳的含量测算及其能量收支,可以推算出海水养殖的碳移出量。

相关研究成果已表明,以贝藻类为主要养殖品种的海洋碳汇渔业的固碳与自然水域的生物固碳相比,除了沉降海底形成碳封存外,还有相当部分

表1 不同类型养殖品的单位碳汇量

Table 1 Unit carbon sequestration of different types of aquaculture

大型海藻	碳含量(干重)/%	资料来源
<i>Laminaria japonica</i> (海带)	31.20	文献[42]
<i>Ulva pertusa</i> (石莼)	30.70	文献[42]
<i>Laminaria laong icruris</i> (海带) ^①	28.77	文献[42]
<i>Laminaria sa ccharina</i> (海带) ^②	23.36	文献[44]
<i>Nereocystis luetkeana</i> (海带) ^③	23.64	文献[44]
<i>Laminaria groenlandica</i> (海带) ^④	28.70	文献[45]
<i>Porphyra</i> (紫菜)	27.39	文献[45]
<i>Ulva lactuca</i> (石莼)	23.50	文献[46]
<i>Gracilaria tikvahiae</i> (江蓠)	28.40	文献[46]
<i>Gracilaria ferox</i> (江蓠)	20.60	文献[46]
<i>Fucus distichus</i>	35.00	文献[47]
滤食性贝类软组织的碳含量		文献[47]
<i>Chlamys farreri</i> (栉孔扇贝)	43.87	文献[42]
<i>Mytilus edulis</i> (紫贻贝)	45.98	文献[42]
<i>Grassastrea gigas</i> (太平洋牡蛎)	44.90	文献[42]
<i>Ruditapes philippinarum</i> (菲律宾蛤仔)	42.84	文献[42]
<i>Soapharca suberenata</i> (毛蚶)	45.86	文献[42]
<i>Maetra chinensis</i> (中国蛤蜊)	42.21	文献[42]
滤食性贝类软壳的碳含量		文献[42]
<i>Chlamys farreri</i> (栉孔扇贝)	11.44	文献[42]
<i>Mytilus edulis</i> (紫贻贝)	12.68	文献[42]
<i>Grassastrea gigas</i> (太平洋牡蛎)	11.52	文献[42]
<i>Ruditapes philippinarum</i> (菲律宾蛤仔)	11.40	文献[42]
<i>Soapharca suberenata</i> (毛蚶)	11.29	文献[42]
<i>Maetra chinensis</i> (中国蛤蜊)	11.52	文献[42]

注:①②③④同属于海带属,其学名没有统一的中文翻译,作者自译为“海带”。

经过捕捞而移出水体,效果更为明显;与陆地生物固碳相比,养殖渔业的固碳率也高于森林、草原等的平均固碳率^[41],可见,海水贝藻养殖碳汇功能显著。

5 “碳汇渔业”产业发展路径研究

发展“碳汇渔业”是一项功在千秋、惠及子孙后代的事业,不仅有利于海洋渔业产业升级和结构性优化,产生巨大的渔业经济效益,为中国农业生产奠定坚实的基础,给消费者提供更多的优质蛋白,保障中国的食物安全,而且有助于生态环境的修复和保护,降低大气中温室气体的含量和缓解水域富营养化。因此,在水产养殖业的资源和环境双重约束条件下如何开拓出一片“新天地”,引导中国渔业走低碳、高效和可持续发展的道路成为目前碳汇渔

业产业发展的关键。

(1)优化渔业养殖结构,提高碳汇渔业品种在养殖产量中的比重。根据目前养殖业现状和发展趋势,通过优化和发展碳汇效果明显的增养殖渔业,推进集中连片的规模化养殖模式。由于海水贝藻类的增养殖对增加养殖碳汇量作用显著,是去除富营养化海域营养盐的一种有效的生物滤器,因此通过建立人工藻礁、渔礁工程,推进养殖生境的修复建设,构建鱼、贝、藻多营养级养殖品种并存的复合式养殖业态,提高碳汇渔业品种的产量和优化其养殖结构,实现养殖渔业的汇碳、存碳和固碳的系列化。只有不断探索各营养级养殖品种之间的合理配比,实现不同能量物质的循环利用、养殖活动与环境条件的协调和统一,才能充分开发碳汇渔业的固碳潜力^[1,37,48,49]。

但是需要注意的是,上述渔业养殖结构的调整,必须建立在以养殖容量评估制度建设为基础的科学架构之上,才能构建起以“碳汇”为特征的现代水产养殖产业体系。虽然藻类养殖一定程度上能增加近海碳汇,改善水体溶氧,吸收富营养化海水中无机氮营养盐,有利于水质修复和生态调控,但是过于密集的贝类和鱼类养殖,若超出环境承载力,实质上对近海环境不益。因此,养殖容量评估体系的完善和标准化、制度性,是绿色、环境友好型碳汇渔业发展的前提。只有按照养殖容量评估制度确定碳汇渔业养殖品种的养殖密度和布局,才能确保碳汇养殖渔业规范、健康发展。

(2)推动海洋牧场和海洋森林工程、人工鱼礁等建设。由于海洋环境的恶化以及海水养殖产业的快速发展,海洋环境承载力面临巨大压力,一方面海水呈现富营养态势,另一方面海洋荒漠化现象也日趋严重,通过海洋牧场和海洋森林工程建设,在特定海域人为地恢复和建立海底草场、人工渔礁,营造、改善和修复海洋生物生境,通过人工增养殖放流、生物群体控制等技术,建立可管、可控的透明海洋生态系统,保护和维持海洋生物的多样性,形成完善的海洋生物食物链和食物网机制,更好地服务于以人工控制管理为特征的“放牧型”、“管理型”海洋水产养殖业的发展,既要实现海洋生物资源恢

复与养护的目的,又要实现渔业低碳生产的目标,是今后海洋养殖业发展与低碳渔业生产的可靠途径^[3,10,41,50,51]。但是,海洋牧场的建设与发展,有赖于健康稳定的海洋生态系统,不仅仅是投放人工渔礁而已,而更需注重生态平衡、生境修复以及科学、合理的容量规模,合理布局各类增殖模式和增殖对象,以保障海洋牧场的生态健康和承载力水平。

自然生物碳汇的恢复和保护,需要建立渔业碳汇计量和监测体系,而目前国内外对碳汇渔业的基础研究还有待加强,渔业生态系统碳循环规律的基础性科研研究力量分散、投入不足,渔业水域生态环境碳通量观测研究网络缺乏,亟需加强对海洋牧场和海洋森林工程、人工鱼礁等建设的低碳养殖技术、碳代谢测量、对外海海域施肥技术、效果和对生态环境影响效果等进行科学评估和深入研究,同时由于近海富营养化造成的赤潮频发,对沿海生产生活造成了严重影响,对近海海域施肥的落后的渔业养殖方式应当坚决杜绝。可喜的是中国首个碳汇渔业实验室已经建立并取得了显著成效¹⁾。

(3)打造碳汇渔业“示范园区”或碳汇渔业“基地”,实行“碳汇补贴”政策。碳汇渔业产业的发展要按照生态要求、健康方向、集约化模式进行布局,实现现代渔业的可持续发展目标,通过创建规模化、标准化、产业化的碳汇渔业示范园区或养殖基地,从宏观上制定相应的激励政策,借鉴森林和草原碳汇的预算项目,在国家制度层面建立补贴机制,有计划地引导和激励渔业“示范园区”或碳汇渔业“基地”养殖个体进行碳汇渔业品种的养殖,加强碳汇渔业的生态收益的核算,转变传统渔业养殖的成本收益观念,发挥养殖“示范园区”或碳汇渔业“基地”发展碳汇渔业的示范效应。碳汇渔业具有正外部性,会外溢到临近国家和地区,因此国家和地区之间有必要建立长期的碳汇渔业协议,创建机制,增进总体福利^[41,52-56]。

但是由于海洋生物生境的复杂性和碳汇实体监测技术的缺乏,对于不同海水养殖种类和不同生物年龄对生物量与碳储量之间转换系数比较难以确定,再加上诚信数据库和诚信评级制度也尚未建立,限制了海水养殖碳汇财政补贴的推出。

1) 2011年,中国碳汇渔业实验室在中国水产科学研究院黄海水产研究所挂牌成立。

2018年1月

(4)制定海洋(渔业)碳汇标准并开展海洋(渔业)碳汇交易试点,在学界的呼吁和政府的推动下,争取建立全球性的蓝色碳基金,提高海洋固碳和渔业碳汇的国际性共识。通过海洋(渔业)碳汇标准的研发和制定,有利于中国抢占该领域的国际制高点,为中国在气候谈判等国际事务中赢得更多的主动权和话语权^[57]。根据《巴黎协定》^[58]的相关规定,到2020年,在全球应对气候变化的治理机制中,发达国家每年要对发展中国家提供1000亿美元的资金支持,这一数额未来还会继续增加。由于《巴黎协定》^[58]和《京都议定书》^[59]没有关于海洋渔业碳汇功能的表述,其所衍生出来的碳汇交易和碳汇项目尚不包括渔业碳汇,因此要加快海洋(渔业)碳汇标准的统一,争取与国内外进行试点合作项目,获得共识,可以参照森林碳汇的“绿碳”基金,建立一个全球性的“蓝碳基金”,有利于在后“巴黎协定”相关国际性谈判中,按照国际气候变化政策的相关文件规定,建立相应的对话机制,将蓝色碳汇与其他陆地生物碳汇一同,纳入到国内及国际统一的碳排放交易市场中,对蓝碳的碳俘获进行贮存、赎购等进行贸易和处理。可以在碳排放交易市场中试建立专门的渔业碳汇模拟交易中心,逐步推进渔业碳汇的市场化运行,进而在全国及全球范围内形成以蓝碳基金和生态补偿基金为核心的渔业碳汇市场和碳平衡交易制度,实现养殖渔业碳汇生态服务的有偿化,实现海洋渔业的碳汇价值^[1,49,52,60]。

6 结论与展望

随着时代的变迁,人们对海洋渔业的了解也日益深入,海洋生物资源作为渔业经营管理的主要对象,对人类的生产和生活以及生态环境都具有十分重要的影响。随着环保压力和可持续发展理念的不断提升,人们对海洋渔业的发展已经从过去追求单一的数量,升级为包括协调经济社会的平衡发展、水产资源的合理利用和水域环境的养护在内的综合效益的追求。由于中国是世界上第一个养殖量超过捕捞量的渔业大国,这种数量第一地位的维持主要依靠粗放式经营,与发达国家相比,中国的海洋渔业的发展还处于“两高一低”(高投入、高污染、低产出)的不发达阶段,多年的渔业发展实践也

证明,传统养殖渔业面临产业升级的巨大压力,亟需改变当下的外延式增长方式,以缓解渔业环境不断恶化的局面;碳汇渔业与传统渔业相比,以可持续发展理念为指导,以环境友好型为特征,以现代渔业良种技术为支撑,通过市场机制的调节和生态收益的核算,将渔业生产的负外部性内部化,同时增强其正外部性,不但提高了养殖业的生产效率,而且增强了海洋环境的修复能力,实现了渔业发展和环境保护的双重功效。更为重要的是,碳汇渔业从渔业生产要素投入上来看,是中国渔业产业结构和生产方式的必要调整,对促进中国渔业产业升级和渔业生产的供给侧结构性改革具有重要意义。

6.1 结论

(1)碳汇渔业的理念虽然已经得到一定程度的认同,相关研究也取得了一定的成果,但目前仍处于理论整合和概念统一阶段,实践发展的产业基础还需要夯实。主要表现为以下几个方面:一是由于渔业活动过程中缺乏政府和科学的正确引导,渔民对海洋生态健康、低碳环保等理念认识严重不足,影响了碳汇渔业的推广和发展。二是基础研究尚需加大投入,目前对碳汇渔业的运行机理、碳汇的强度估算方法及其控制因素、储碳机制、渔业碳汇的评价体系及其核算标准等亟需国内外学术界建立和完善规范化的共识。三是碳汇交易体系不完善,目前国外碳汇交易市场处于一个试运行期,中国碳汇市场还远未建立,价格和竞争机制均不健全,这势必会阻碍碳汇渔业的发展。四是海洋污染依然严峻,海洋生态系统修复困难重重,多年来沿海地区的无序开发和粗放式养殖造成了近岸海域的海水污染严重,据不完全统计,中国面积在100km²以上的海湾中,有16个海湾海水水质劣于第四类海水水质标准;对海湾、滩涂湿地、红树林和海草床等海洋生态系统所实施的相关监测显示,海洋生态系统所占健康、亚健康和不健康状态的比例分别为23%、67%和10%^[61]。五是碳汇渔业的发展需要考虑不同养殖结构的比例调整问题,而海洋水产养殖户在多年的养殖过程中,已经基本形成了养殖“偏好”,并且水产养殖业是一项需要技术积累的“经验”性农业,如何引导水产养殖户调整养殖结构比例,也考验着碳汇渔业养殖品种的推广。上述问

题的解决需要长期的过程,这对于碳汇渔业发展都具有一定的限制和制约。

(2)碳汇渔业实验区¹⁾已经在中国沿海一些地区建立并试点实施,但在实施过程中,不少专家也坦言,沿海地区的百姓对碳汇渔业的概念知之甚少,碳汇渔业知识的普及体系缺位和流于表面形式,渔民对碳汇渔业的理解更趋近于现实考量,具体表现为整个碳汇渔业的经济效益不明显,甚至具有相当长的滞后性,使得不少养殖户逐年缩小养殖规模甚至放弃。当前,从中国碳汇渔业所依托的产业组织来看,一是产业组织主要是小规模、零散化小农式的低度产业化的经营组织,90%海洋水产养殖生产主体为小农生产模式,产业组织零散化、低度协调性以及补偿机制的缺失加剧了市场信息的不对称和市场失灵现象,引致碳汇渔业生产活动主体的“偷懒”、“公地悲剧”等机会主义行为;二是海洋水产养殖产业组织程度低,产业关系弱化,导致产业成员之间的合作离散、随机,个别企业实施碳汇渔业由于可能带来的收益与投入不匹配而“缺位”,碳汇渔业成员企业对未来的预期不稳定和对短期利益的偏好,强化了碳汇渔业行为选择的随意性和短期性。

(3)变革的发展理念更需要科学的政策调适与制度安排才能予以保障。宏观激励政策的制定有助于推动碳汇渔业的发展,如何明确补偿依据、补偿主客体,建立政府、市场和企业三位一体的补偿机制,如何选择合理的产业组织模式将是今后研究的重点。

6.2 展望

由于“碳汇渔业”理念的新颖性,再加关于“碳汇渔业”认识上的不一致性等原因,文中许多内容仍需继续进行严谨的探讨和深入的研究,尤其是下列问题将是今后进行延伸性研究和探讨的重点:

(1)对不同养殖品种碳的含量测算及其能量收支的动态比较研究。文献中虽然不乏不同养殖品种的碳收支方程,并且估算了其固碳量,这对于建立“碳汇渔业”评估模型有一定的参考意义,但研究尚不全面,为了更精确的评估“碳汇渔业”碳汇能

力,还需要进行更加细致的研究分析和设计:

一是对不同养殖品种生长过程中碳排放量进行估算,建立详细的数据结构模型,与收获移出碳量进行比较,以便得出更明确的移碳排碳关系。

二是开展不同养殖品种的生物沉积固碳作用的研究,详细表明它们之间的数据联系,评估其对具体海区碳汇能力的具体影响。

三是根据不同养殖品种“密度制约”的一般性结果,开展种群情况的持续调查,从而建立模型图,由此生成数据库的逻辑数据模型,建立种群动态模型对固碳量进行分析和预测。

只有通过准确地测定不同养殖品种的碳转换效率和碳参数,推算出海水养殖的碳移出量,才能科学评价海洋渔业资源生物的碳汇能力。

(2)运用“碳汇渔业”的理念与思想,对海洋水产养殖业的上下游产业进行分析,找出其在产业链条中所处的位置,在产业协调中所扮演的角色,在整个渔业宏观价值链中所起的作用,并根据这些内容来对“碳汇渔业”生产系统进行研究。“碳汇渔业”的发展受自然与经济社会因素的叠加影响,养殖企业组织的业务过程不能仅局限于其内部价值链的分析,还应跨越养殖企业的组织边界,以外部产业价值链分析为基础来分析扩展水产养殖企业的组织业务过程。“碳汇渔业”的发展受到海洋环境污染、海洋承载力等外在因素的影响,传统的渔业发展模式单一、相关产业链不完整,使得当前“碳汇渔业”发展较为缓慢。

(3)“碳汇渔业”中不同养殖品种碳的含量测算及其能量收支的信息共享与碳汇标准的研究。由于当前“碳汇渔业”研究刚刚起步,国内外彼此之间的合作和交流信息有待进一步加强,通过加强信息共享与交流,促进海洋(渔业)碳汇标准的研发和制定,抢占该领域的国际制高点,形成“碳排放权”的交易平台,开展碳排放交易,建立全国统一的碳排放交易市场,有利于从经济层面刺激“碳汇渔业”的发展。

海洋“碳汇渔业”作为一种“环境友好型”渔业发展理念,致力于对传统海洋水产养殖业存在的产

1) 2011年7月11日,舟山市东极新型海洋牧场示范区暨碳汇渔业实验区揭牌成立,这是一个国家级海洋特别保护区海洋牧场暨碳汇渔业实验区建设项目;苍南县现代渔业园区等,也具有渔业碳汇的功能。

2018年1月

业发展与环境保护之间的矛盾和冲突进行互利共赢的变革实践,其产生有其深刻的时代背景,也有其发展的政策适用性。正因为传统海洋水产养殖业越来越不适应现代海洋经济的发展,才引发了人们对它的发展方向和产业政策的反思,从而也催生了变革性的新的水产养殖理论与方法,虽然“碳汇渔业”理论与方法还很不完善,但这毕竟是一种有益的尝试,代表了海洋水产养殖业未来发展的一个方向。尽管这一理论与方法还处于初期阶段,产业实践发展也存在不少的困难,最后能否成功也具有不确定性,但是起码它能给人们以启迪,或多或少会对中国海洋渔业供给侧结构性改革具有推进作用。

随着社会经济的发展和环保理念认同度的提高,“碳汇渔业”的优点将日益为人们所重视,将会有越来越多的研究者和水产养殖企业投入到“碳汇渔业”的研究和实践,政府也将通过政策引导,促进“碳汇渔业”产业的发展,进而优化海洋水产养殖业产业组织模式。

参考文献(References):

- [1] 唐启升. 碳汇渔业与又好又快发展现代渔业[J]. 江西水产科技, 2011, (2): 5-7. [Tang Q S. Carbon sink fisheries and the development of modern fisheries [J]. *Jiangxi Fisheries Science*, 2011, (2): 5-7.]
- [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 has important and practical significance for the development of low carbon economy, Carbon sink fisheries will be the driving force for the development of a new round of fisheries-interview with vice chairman of China Association of science and technology, Chinese Academy of Engineering Tang Qi-sheng [J]. *China Fisheries Science*, 2010, (8): 4-8.]
- [3] 李纯厚, 齐占会, 黄洪辉, 等. 海洋碳汇研究进展及南海碳汇渔业发展方向探讨[J]. 南方水产, 2010, (6): 81-86. [Li C H, Qi Z H, Huang H H, et al. Review on marine carbon sink and development of carbon Sink fisheries in South China Sea[J]. *South China Fisheries Science*, 2010, (6): 81-86.]
- [4] 泽农. 中国水产科学研究院院长张显良解读“碳汇渔业”[J]. 农产品加工·综合刊, 2011, (6): 6-7. [Ze N. The president of China fisheries science research institute who interpretation of "carbon sink fisheries" [J]. *Processing of Agricultural Products, Comprehensive Journal*, 2011, (6): 6-7.]
- [5] 杨宗岱, 吴宝铃. 中国海草场的分布、生产力及其结构与功能的初步探讨[J]. 生态学报, 1981, 1(1): 84-89. [Yang Z D, Wu B L. A preliminary study on the distribution, productivity, structure and function of sea-grass beds in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1981, 1(1): 84-89.]
- [6] Mann K, Chapman A. Primary production of marine macrophytes [J]. *International biology prog.*, 1975, 3: 1-15.
- [7] Chapman A R O. Ecology of macroscopic marine algae[J]. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1974, 5: 65-80.
- [8] Macroy C, McMillan C. Production of ecology and physiology of seagrasses[J]. *Marine Science*, 1977, 4: 53-81.
- [9] 孙军. 海洋浮游植物与生物碳汇[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5372-5378. [Sun J. Marine phytoplankton and biological carbon sink [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5372-5378.]
- [10] 联合国粮农组织. 2014年世界渔业和水产养殖状况 [EB/OL]. (2014-05-19) [2018-01-02] <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/zh/c/232213/> [FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2014(SOFIA - Chinese) [EB/OL]. (2014-05-19)[2018-01-02] <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/zh/c/232213/>.]
- [11] 焦念志, 骆庭伟, 张瑶, 等. 海洋微型生物碳泵-从微生物生态过程到碳循环机制效应[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2011, 50(2): 387-401. [Jiao N Z, Luo T W, Zhang Y, et al. Microbial carbon pump in the ocean-from microbial ecological process to carbon cycle mechanism [J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2011, 50(2): 387-401.]
- [12] Ritschard R L. Marine algae as a CO₂ sink [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 1992, 64(1-2): 289-303.
- [13] ORR J C, Sarmiento J L. Potential of marine macro algae as sink for CO₂: Constraints from a 3-D general circulation model of the global ocean [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 1992, 64(1-2): 405-421.
- [14] Gorshkov V G. Oceanic dissolved organic carbon in the main sink of atmospheric CO₂ [J]. *World Resource Rev*, 1997, 9(2): 153-169.
- [15] 宋金明. 海洋碳的源与汇[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(2): 75-80. [Song J M. Carbon sources and sinks in oceans [J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(2): 75-80.]
- [16] Duarte C M, Middelburg J J, Caraco N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle[J]. *Biogeo Sciences*, 2005, 2(1): 1-8.
- [17] Laffoley D, Grimsditch G. The Management of Natural Coastal Carbon Sinks. [R]. Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature, 2009.
- [18] Da S C M. Add coastal vegetation to the climate critical list[J]. *Nature*, 2011, 473(7347): 255-255.
- [19] 焦念志. 海洋固碳与储碳-并论微型生物在其中的重要作用[J].

- 中国科学, 2012, 42(10): 1473–1486. [Jiao N Z. Carbon fixation and sequestration in the ocean, with special reference to the microbial carbon pump[J]. *Sci Sin Terrae*, 2012, 42(10): 1473–1486.]
- [20] Fourqurean J W, Duarte C M, Kennedy H, et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 1(3): 297–315.
- [21] 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.]
- [22] 孙军. 海洋浮游植物与渔业碳汇计量 [J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 90–96. [Sun J. Carbon calculation on marine phytoplankton and its related fishery carbon sink [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 90–96.]
- [23] 曹鑫磊. “碳汇渔业”与“低碳渔业技术”分析[J]. 河北渔业, 2015, (9): 69–71. [Cao X L. Analysis of "carbon sink fishery" and "low carbon fishery technology" [J]. *Hebei Fisheries Science*, 2015, (9): 69–71.]
- [24] Harrison P J, Hu M H, Yang Y P, et al. Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China[J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 1990, 140(1–2): 79–87.
- [25] 林洪瑛, 韩舞鹰. 南沙群岛海域营养盐分布的研究 [J]. 海洋科学, 2001, 25(10): 12–14. [Lin H Y, Han W Y. Distribution of Nutrients in the Nansha Islands Water [J]. *Marine Sciences*, 2001, 25(10): 12–14.]
- [26] 王勇, 焦念志. 胶州湾浮游植物对营养盐添加的响应关系[J]. 海洋科学, 2002, 26(4): 8–13. [Wang Y, Jiao N Z. Response of phytoplankton to nutrient addition in Jiaozhou Bay[J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(4): 8–13.]
- [27] 袁梁英. 南海北部营养盐结构特征[D]. 厦门: 厦门大学, 2005. [Yuan L Y. Structural Features of Nutrients in the North of the South China Sea [D]. Xiamen: Xiamen University, 2005.]
- [28] 郑国侠, 宋金明, 孙云明, 等. 南海深海盆表层沉积物氮的地球化学特征与生态学功能[J]. 海洋学报, 2006, 28(6): 44–52. [Zheng G X, Song J M, Sun Y M, et al. Geochemical characteristics and ecological functions of nitrogen in the abyssal basin surface sediments, South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(6): 44–52.]
- [29] 杨宗岱. 中国海草的生态学研究[J]. 海洋科学, 1982, 6(2): 31–37. [Yang Z D. The ecological studies on sea-grasses of China [J]. *Marine Science*, 1982, 6(2): 31–37.]
- [30] 唐启升, 苏纪兰. 中国海洋生态系统动力学研究: I 关键科学问题与研究发展战略[M]. 北京: 科学出版社, 2000. [Tang Q S, Su J L. Study on Ecosystem Dynamics in Coastal Ocean[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2000.]
- [31] 唐启升, 苏纪兰, 张经. 我国近海生态系统食物产出的关键过程及其可持续机理[J]. 地球科学进展, 2005, 20(12): 1280–1287. [Tang Q S, Su J L, Zhang J. Key processes and sustainable mechanisms of ecosystem food production in the coastal ocean of China [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(12): 1280–1287.]
- [32] 鲍颖, 乔方利, 宋振亚. 全球海洋碳循环三维数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2012, 34(3): 19–26. [Bao Y, Qiao F L, Song Z Y. The 3-dimensional numerical simulation of global ocean carbon cycle [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(3): 19–26.]
- [33] 李娇, 关长涛, 公丕海, 等. 人工鱼礁生态系统碳汇机理及潜能分析[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 65–69. [Li J, Guan C T, Gong P H, et al. Preliminary analysis of carbon sink mechanism and potential of artificial reef ecosystem[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 65–69.]
- [34] 张波, 孙珊, 唐启升. 海洋捕捞业的碳汇功能[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 70–74. [Zhang B, Sun S, Tang Q S. Carbon Sink by marine fishing industry [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 70–74.]
- [35] 严立文, 黄海军, 陈纪涛, 等. 我国近海藻类养殖的碳汇强度估算[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(4): 537–545. [Yan L W, Huang H J, Chen J T, et al. Estimation of carbon Sink capacity of algal Mari-Culture in the coastal areas of China [J]. *Advances in Marine Science*, 2011, 29(4): 537–545.]
- [36] 齐占会, 王珺, 黄洪辉, 等. 广东省海水养殖贝藻类碳汇潜力评估[J]. 南方水产科学, 2012, 8(1): 30–35. [Qi Z H, Wang J, Huang H H, et al. Potential assessments of carbon sink capacity by marine bivalves and seaweeds in Guangdong province [J]. *South China Fisheries Science*, 2012, 8(1): 30–35.]
- [37] 岳冬冬, 王鲁民. 基于直接碳汇核算的长三角地区海水贝类养殖发展分析[J]. 山东农业科学, 2012, 44(8): 133–136. [Yue D D, Wang L M. Development analysis of shellfish aquaculture in the Yangtze River Delta region based on the principle of direct carbon sinks accounting [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2012, 44(8): 133–136.]
- [38] 李昂, 刘存歧, 董梦芸, 等. 河北省海水养殖贝类与藻类碳汇能力评估[J]. 南方农业学报, 2013, 44(7): 1201–1204. [Li A, Liu C Q, Dong M H, et al. Assessing carbon sink capacity of marine bivalves and seaweeds in Hebei Province [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2013, 44(7): 1201–1204.]
- [39] 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.]
- [40] 刘鸿艳, 任贵如, 张松林. 碳汇渔业对海洋低碳经济的贡献与发展探讨[C]. 重庆: 中国畜牧科技论坛, 2011. [Liu H Y, Ren G R, Zhang S L. The Contribution and Development of Carbon Sink Fisheries to Marine Low Carbon Economy[C]. Chongqing: China

2018年1月

- Animal Husbandry Science and Technology Forum, 2011.]
- [41] 唐启升, 刘慧. 海洋渔业碳汇及其扩增战略[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 68-73. [Tang Q S, Liu H. Strategy for carbon sink and its amplification in marine fisheries [J]. *Engineering Sciences*, 2016, 18(3): 68-73.]
- [42] 周毅, 杨红生, 刘石林, 等. 烟台四十里湾浅海养殖生物及附着生物的化学组成、有机净生产量及其生态效应[J]. 水产学报, 2002, 26(1): 21-27. [Zhou Y, Yang H S, Liu S L, et al. Chemical composition, net organic production and its ecological effects of marine cultured organisms and attached organisms in Sishili Bay, Yantai[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, 26(1): 21-27.]
- [43] Chapman A R O, Markham J W, Lüning K. Effects of nitrate concentration on the growth and physiology of laminaria saccharina, (phaeophyta) in culture 1, 2[J]. *Journal of Physiology*, 1978, 14(2): 195-198.
- [44] Ahn O, Petrell R J, Harrison P J. Ammonium and nitrate uptake by Laminaria saccharina and Nereocystis luetkeana originating from a salmon sea cage farm [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1998, 10(4): 333-340.
- [45] Harrison P J, Druehl L D, Lloyd K E, et al. Nitrogen uptake kinetics in three year-classes of Laminaria groenlandica(Laminariales: phaeophyta)[J]. *Marine Biology*, 1986, 93(1): 29-35.
- [46] Lapointe B E, Littler D S. Nutrient availability to marine macro algae in siliciclastic versus carbonate-rich coastal waters[J]. *Estuaries & Coasts*, 1992, 15(1): 75-82.
- [47] Rosenberg G, Probyn T A, Mann K H. Nutrient uptake and growth kinetics in brown seaweeds: Response to continuous and single additions of ammonium [J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 1984, 80(2): 125-146.
- [48] 许冬兰. 蓝色碳汇: 海洋低碳经济新思路[J]. 中国渔业经济, 2011, 29(6): 44-49. [Xu D L. New Path of developing of the ocean low-carbon economy based on the blue carbon sink [J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2011, 29(6): 44-49.]
- [49] 高磊, 刘英杰. 以科技创新引领低碳渔业发展-助推中国低碳发展的有效路径[J]. 科技管理研究, 2011, 31(23): 48-50. [Gao L, Liu Y J. Science and technology innovation leading the development of low-carbon fishery-an effective way to promote low-carbon development in China [J]. *Science and Technology Management Research*, 2011, 31(23): 48-50.]
- [50] 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. [Li C H, Jia X P, Qi Z H, et al. Effect evaluation of a low-carbon fisheries production by marine ranching in Daya bay [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2346-2352.]
- [51] 李娇, 关长涛, 公丕海, 等. 人工鱼礁生态系统碳汇机理及潜能分析[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 65-69. [Li J, Guan C T, Gong P H, et al. Preliminary analysis of carbon sinks mechanism and potential of artificial reef ecosystem[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 65-69.]
- [52] 林光纪. 我国发展低碳渔业的经济政策探析[J]. 中国水产, 2010, (9): 25-27. [Lin G J. Economic policy of developing low carbon fishery in China [J]. *China Fisheries*, 2010, (9): 25-27.]
- [53] 郭成秀, 张士华, 刘志国. 东营市生态渔业建设与“碳汇”渔业模式的选择[R]//山东东营, 华东地区农学会, 山东农学会 2010 年学术年会交流材料. 2010. [GUO Cheng-xiu, ZHANG Shi-hua, LIU Zhi-guo Ecological fishery construction and the choice of "carbon sink" fishery model in Dongying City[R]// Dongying, The exchange materials of East China Agricultural Association, Shandong Agricultural Association 2010 annual conference. 2010.]
- [54] 于谨凯, 黄群. 基于碳汇功能的中国海洋渔业政府激励机制分析[J]. 海洋经济, 2011, 1(6): 1-7. [Yu J K, Huang Q. Analysis on the government's incentive mechanism to develop marine fisheries based on the carbon sink [J]. *Marine Economy*, 2011, 1(6): 1-7.]
- [55] 于谨凯, 杨志坤, 邵桂兰. 基于影子价格法的碳汇渔业碳补偿额度分析-以山东海水贝类养殖业为例[J]. 农业经济与管理, 2011, (6): 83-90. [Yu J K, Yang Z K, Shao G L. Analysis on carbon compensation amount of carbon sink fisheries based on shadow price model: take seawater shellfish aquaculture industry of Shandong Province as an example [J]. *Agricultural Economics and Management*, 2011, (6): 83-90.]
- [56] 邵桂兰, 阮文婧. 我国碳汇渔业发展对策研究[J]. 中国渔业经济, 2012, 30(4): 45-52. [Shao G L, Ruan W J. The SWOT analysis of development of fishery carbon sequestration in China and response strategies [J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2012, 30(4): 45-52.]
- [57] 罗朝淑. 焦念志代表: 建立海洋碳汇标准迫在眉睫[N]. 科技日报, 2014-03-14(008). [Luo C S. Jiao Nianzhi Represents: It Is Urgent to Set up Marine Carbon Sequestration Standards [N]. *Science and Technology Daily*, 2014-03-14(008).]
- [58] 联合国. 巴黎协定[EB/OL]. (2017-06-14)[2018-01-02] http://www.baike.com/wiki/%E5%B7%B4%E9%BB%8E%E5%8D%8F%E5%AE%9A&prd=so_1_doc[UN.[EB/OL].The Paris Agreement(2017-06-14)[2018-01-02] http://www.baike.com/wiki/%E5%B7%B4%E9%BB%8E%E5%8D%8F%E5%AE%9A&prd=so_1_doc]
- [59] 联合国. 京都议定书[EB/OL]. (2012-11-28)[2018-01-02] <http://www.baike.com/wiki/%E3%80%8A%E4%BA%AC%E9%83%BD%E8%AE%AE%E5%AE%9A%E4%B9%A6%E3%80%8B>[UN.Kyoto Protocol[EB/OL]. (2012-11-28)[2018-01-02] <http://www.baike.com/wiki/%E3%80%8A%E4%BA%AC%E9%83%BD%E8%AE%AE%E5%AE%9A%E4%B9%A6%E3%80%8B>.]
- [60] 孙吉亭, 赵玉杰. 我国碳汇渔业发展模式研究[J]. 东岳论丛, 2011, 32(8): 150-155. [Sun J T, Zhao Y J. Research on the devel-

- opment mode of carbon sink fishery in China [J]. *Dongyue Tribune*, 2011, 32(8): 150–155.]
- [61] 中国国家海洋局. 2013 年中国海洋环境状况公报[EB/OL]. (2017–12–07)[2018–01–02] http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghyhj-zlgb/201712/t20171207_59488.html [State Oceanic Administration of China. Bulletin of China's marine environment status in 2013. [EB/OL]. (2017–12–07)[2018–01–02] <http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghyhj-zlgb/201712/t2017120759488.html>.]

A review of research on marine carbon sink fisheries

XU Jingjun, QIN Tiantian, HAN Limin

(Management College of Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Chinese marine fisheries are at an inflection stage of rapid development of industrialization and environmental capacity overwhelmed. We urgently need to optimize and innovate carbon sink fisheries operating mechanisms because carbon sink fisheries are an important component of low-carbon greening which will fundamentally promote marine fishery supply side structural reform. There is no doubt that carbon sink fisheries have an important influence on the change and enhance fishery production and marine ecological civilization in the development of marine carbon sink fisheries, but on the understanding of marine carbon sink fisheries and the mechanism of carbon sink fisheries involves many factors. Here we collected and sorted the relevant literature in order to help build a communication bridge between scientific research and industrial development, and better promote the sound development of carbon sink fisheries. Through the four aspects of the literature review and comment about carbon sink fishery connotation, carbon sequestration mechanisms, carbon sequestration and industrial development path, we found that the concept of carbon sink fisheries remains in an embryonic stage. The foundation is weak and we need scientific policy adjustment and institutional arrangements to promote reasonable marine aquaculture industry organization models. With social and economic development and environmental protection concepts improving, the advantages of carbon sink fisheries will become increasingly important. More researchers and aquaculture enterprises will promote the development of carbon sink fisheries industries via government policy guidance.

Key words: carbon sinks fisheries; environmental carrying capacity; carbon sequestration mechanism; seawater aquaculture.