

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20220118002

http://www.yykxjz.cn/

李娇, 李梦迪, 公丕海, 关长涛. 海洋牧场渔业碳汇研究进展. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 142–150

LI J, LI M D, GONG P H, GUAN C T. Research progress on fishery carbon sinking associated with marine ranching. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(5): 142–150

## 海洋牧场渔业碳汇研究进展\*

李 娇<sup>1</sup> 李梦迪<sup>1,2</sup> 公丕海<sup>1</sup> 关长涛<sup>1①</sup>

(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 碳汇渔业重点实验室 海洋牧场工程技术研究中心 山东 青岛 266071; 2. 浙江海洋大学 浙江 舟山 316022)

**摘要** 海洋通过“溶解度泵”和“生物泵”完成碳汇过程, 且具有碳固存容量大、储存时间长的显著优势, 可有效缓解 CO<sub>2</sub> 排放产生的温室效应, 在应对全球气候变化中发挥着不可替代的作用。渔业是人类利用海洋的基础生产活动, 对近海碳循环过程具有重要的影响, 渔业碳汇是海洋碳汇不可或缺的组成部分。海洋牧场作为一种以水域栖息地修复、水生生物资源养护为主旨的新型渔业模式, 通过增殖水生生物资源量, 提升生物固碳量, 实现渔业对海洋碳汇的扩增。本文针对我国对海洋牧场的界定, 梳理了国内外对海洋牧场关键碳汇因子固碳机理及其过程和潜能等方面的研究现状, 浅析了海草床、牡蛎礁等典型海洋牧场生态系统在近海碳汇扩增中的重要作用。建议在海洋牧场固碳机理与碳循环过程、海洋牧场碳汇扩增技术和海洋牧场碳汇计量方法等方面开展重点研究, 以期为渔业绿色发展, 扩增海洋碳汇和服务“双碳”战略提供科学参考。

**关键词** 海洋牧场; 渔业碳汇; 固碳; “双碳”战略

**中图分类号** S181 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)05-0142-09

由于自然环境演变和人类活动的影响, 以 CO<sub>2</sub> 为主的温室气体浓度逐年增加, 全球正处于气候变暖的大趋势中(Olufemi *et al.*, 2014; Princiotta, 2009), 由此产生的极端天气、自然灾害、疫病等破坏地球生态, 甚至威胁人类健康(Patt, 2014; Shuman, 2011)。目前, 温室效应的解决措施有 2 种, 一是减少温室气体的排放(减排); 二是吸收并储存大气中的 CO<sub>2</sub> (增汇)。减排将大幅度减少化石燃料的燃烧, 在一定程度上影响经济发展, 而增汇既能减缓气候变暖, 又不影响社会经济发展, 甚至可以通过碳交易推动经济和社会的发展(Van *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2007)。IPCC (2007)将碳汇定义为从大气中清除温室气体、气溶胶或温室气体前体的任何过程、活动或机制。联合

国 2009 年发布的《蓝碳报告》明确了海洋碳汇的作用, 即“世界由生物的光合作用捕获的碳中, 超过一半(55%)是由海洋生物(包括细菌、浮游生物、海草、盐沼和红树林)捕获的(Cheryi *et al.*, 2016; Nellemann *et al.*, 2009), 且海洋生物捕获碳的储存时间可长达数千年”。尽管海洋中植物生境的覆盖面积不到海床的 0.5%, 其生物量是陆地植物生物量的 0.05%, 但每年循环的碳量与陆地上几乎相同(Bouillon *et al.*, 2008; Houghton, 2007)。由此可以看出, 碳固存容量大、储存时间长是海洋碳汇的显著优势。

海洋固碳量和碳埋藏能力受多重因素的交互作用, 其中, 人类渔业活动对近海生态系统碳循环和碳收支具有重要的影响, 渔业在海洋碳汇中的作用引起

\* 国家重点研发计划(2019YFD0902101)和国家自然科学基金项目(32002442)共同资助 [This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFD0902101), and National Natural Science Foundation of China (32002442)]. 李 娇, E-mail: lijiao@ysfri.ac.cn

① 通信作者: 关长涛, 研究员, E-mail: guanct@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2022-01-18, 收修改稿日期: 2022-03-04

各界的广泛关注,碳汇渔业的概念应运而生。作为海洋碳汇的重要组成部分,渔业碳汇被界定为水体中“可移出的碳”和“可产业化的蓝碳”,通过渔业生产进一步增强水域生态系统的碳汇作用(唐启升等,2016)。健康的海洋生态系统是实现“蓝碳”的必要条件,因此,建立在生态保护基础上的渔业方式才能发挥碳汇功能。海洋牧场作为一种资源养护、环境友好型渔业方式,首要环节是修复生态环境、保护海洋生境,在此基础上开展生物资源增殖,并且海洋牧场内水生生物以天然饵料为食,无需人工投饵,是碳汇渔业的典型代表,是保障渔业水域生态系统持续发挥碳汇效应的有效模式。目前,对于海洋牧场扩增海洋碳汇的研究比较少。为此,本文综述了国内外关于海洋牧场碳汇的研究成果,概述了海洋牧场的碳汇过程及固碳机理,以期为扩增海洋碳汇,服务“双碳”战略提供科学参考。

## 1 海洋牧场碳汇基础

### 1.1 渔业碳汇

唐启升(2011)首次提出碳汇渔业,将其定义为通过渔业生产活动促进水生生物吸收水体中的 $\text{CO}_2$ ,并通过收获把这些已经转化为生物产品的碳移出水体的过程或机制。藻类的光合作用、贝类的滤食行为,鱼类、甲壳类等生长所固定的碳直接或间接促进大气中 $\text{CO}_2$ 向水体中传输,降低了大气中 $\text{CO}_2$ 的浓度,并通过水产品的采捕完成“碳移出”。碳汇渔业不仅推动渔业的绿色高质量发展,更是“可产业化的蓝碳”(唐启升等,2016)。根据碳汇渔业的定义,不需投饵的渔业生产活动都能形成生物碳汇,如藻类养殖、贝类底播、海洋牧场、增殖放流以及捕捞渔业等。

### 1.2 海洋牧场

国际《海洋科学百科全书》中界定,海洋牧场通常是指资源增殖,主要操作方式包括人工鱼礁和增殖放流(Salvanes, 2016; Seaman *et al.*, 2016),即通过保护和修复栖息地,人为投放水生生物,实现生态环境的修复和渔业资源的养护增殖。我国将海洋牧场定义为基于海洋生态系统原理,在特定海域通过人工鱼礁、增殖放流等措施,构建或修复海洋生物繁殖、生长、索饵或避敌所需的场所,增殖养护渔业资源,改善海域生态环境,实现渔业资源可持续利用的渔业模式(农业农村部, 2017)。海洋牧场作为一种新型的渔业生产模式,利用人工鱼礁、海藻场、海草床等修复水生栖息地,营造适宜生境,通过底播、放流等措施补

充水生生物资源,是碳汇渔业的典型模式之一,对扩增海洋碳汇具有重要作用。

## 2 海洋牧场碳汇机理

海洋牧场通过投放人工礁体等工程设施,或修复牡蛎礁、海草床等天然生境为水生生物营造栖息场所,并通过增殖放流补充生物资源,形成近海典型受人为调控的开放式渔业生态系统。海洋牧场基础设施可以改变周围的非生物环境,进而引起生物环境的变化,人工鱼礁等工程设施的流场效应可改变周围的流体流态,产生的上升流将底层营养元素输送到中上层水体,促进浮游植物的生长,丰富海洋牧场生物饵料,进而发挥饵料诱集并吸引更多的海洋生物在牧场区聚集,提高海区生物多样性和生物量(Reeds *et al.*, 2018; Koike *et al.*, 2016; 公丕海等, 2014)。海洋牧场及毗邻海域理化环境的改善可增加初级生产力,进而提升光合作用对 $\text{CO}_2$ 转化量,礁体上附着的滤食性贝类在一定时间内发挥碳封存的作用(Hu *et al.*, 2021; 严立文等, 2011; Tang *et al.*, 2011),人工鱼礁的投放显著提高海洋牧场及辐射海域的渔业资源生物量和密度(Fang *et al.*, 2013; 陈应华, 2009)。李纯厚等(2011)对大亚湾海洋牧场增殖效果的研究发现,海洋牧场建成后,鱼类、虾蟹类、海参(*Stichopus japonicus*)等生物量均有所提高;马欢等(2017)估算出柘林湾海洋牧场海洋生物的固碳量约为 $6.728 \times 10^4$  t。一方面,水生生物生长过程是“生物碳”聚集的过程,并且海洋牧场建设对海区生物资源有显著地改善作用,进而提升海洋牧场海域生物体固碳量;另一方面,海洋牧场具有的多元生境进一步扩展了海区利用空间,形成稳定的生物群落,提高碳在食物链各营养级间的传输效率,且海洋牧场内不进行任何人工饵料的投入,所有异养生物以天然饵料为食,并通过采捕部分经济海产品实现碳移出。

### 2.1 浮游植物固碳

浮游植物仅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(孙军, 2011),作为海洋食物网的基础环节影响着生态系统的物质循环和能量流动,其光合作用对 $\text{CO}_2$ 的转化在全球碳循环中发挥至关重要作用。2019年5月检测到大气中 $\text{CO}_2$ 浓度已超过0.0415%,创造了过去300万年以来的历史记录(郭英楠, 2019),而在此之前,陈泮勤(2004)研究表明,在没有光合作用的情况下,大气中 $\text{CO}_2$ 浓度应为0.100%;若浮游植物生物泵过程发挥最大效率,则大气中 $\text{CO}_2$ 浓度降至0.011%(宋金明等, 2008)。

全球海洋浮游植物的年固碳量约为  $36.8 \times 10^9$  t (Lalli *et al.*, 1997), 其中, 中国黄、渤海和东海的浮游植物固碳量约为  $2.22 \times 10^9$  t/yr (郑国侠等, 2006; 宋金明等, 2008), 约占全球海洋浮游植物固碳量的 6.03%。浮游植物能通过光合作用直接利用  $\text{CO}_2$  (Dewar *et al.*, 2006), 一方面, 减少了海水中的  $\text{CO}_2$  分压, 增加海洋-空气界面的分压差, 直接驱动大气中的  $\text{CO}_2$  进入海水中; 另一方面, 这些有机碳通过食物链逐级转移到大型动物, 并通过浮游动物的垂直迁移和大量非生命颗粒有机碳的沉降形成有机物由表层向深层转移的生物泵过程 (Pouloton *et al.*, 2006; 沈国英, 2002)。

张雪等(2018)、李纯厚等(2011)和张硕等(2006)研究表明, 海洋牧场内人工鱼礁的建设对浮游植物的种类和生物量组成有显著的正向效应。海州湾人工鱼礁区浮游植物群落组成与对照区的相似度由投礁前的 0.963 下降到投礁 180 d 后的 0.863 和 210 d 后的 0.685 (章守宇等, 2006), 人工鱼礁投放后与周围水流相互作用, 在迎流面产生一定规模的上升流, 造成表层沉积物再悬浮和上下层水体间营养要素的交换 (Li *et al.*, 2017; 李娇等, 2014), 促进了浮游植物的生长, 提高了海域的初级生产力水平。象山港人工鱼礁区未建设前, 浮游植物的丰度、多样性均低于对照区, 建设后调查发现, 人工鱼礁区浮游植物丰度、多样性率高于对照区, 表明人工鱼礁建设对浮游植物生长具有一定的积极作用 (陈海峰等, 2013)。李纯厚等(2011)对大亚湾人工鱼礁型海洋牧场投礁前后季节平均叶绿素 *a* 浓度的空间分布对比发现, 投礁后每个季节的叶绿素 *a* 含量相对于投礁前均有不同程度的增加, 增加范围分布在  $0 \sim 0.5$   $\text{mg}/\text{m}^2$ , 且投礁后在人工鱼礁区出现了一个高叶绿素 *a* 含量区域, 以叶绿素 *a* 含量的数据为计算基础, 估算出大亚湾海洋牧场人工鱼礁投放后, 礁区浮游植物光合作用固碳量提高了  $937.40$   $\text{kg C}$ , 相当于  $3.44$  t 的  $\text{CO}_2$ 。上述研究结果显示, 海洋牧场内人工鱼礁的建设对增加浮游植物的碳汇功能具有显著作用。

## 2.2 海草床固碳机制

海草床是海洋牧场典型生境之一。目前, 在山东荣成天鹅湖海域、河北唐山祥云湾海域已建成多个以海草床为主要生境类型的海洋牧场示范区, 并实现海草的规模化增殖。海草床不仅为其他海洋生物提供栖息地, 保护近海生态环境, 其自身更具有强大的固碳功能, 在全球气候调节中发挥重要作用。全球海草的分布面积不足海洋总面积的 0.2%, 碳埋藏量却占到了海洋总量的 10% 以上 (Duarte *et al.*, 2013), 碳固定速

率达到  $83$   $\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ , 约为热带雨林的 21 倍 (Duarte *et al.*, 2005), 全球海草床沉积物有机碳的储量在  $9.8 \sim 19.8$   $\text{Pg C}$ , 相当于全球红树林与潮间带盐沼植物沉积物碳储量总和 (Fourqurean *et al.*, 2012)。海草床生态系统高效的碳汇能力体现在 3 个方面, 首先, 海草床自身的高生产力。我国桑沟湾大叶藻 (*Zostera marina*) 初级生产力的固碳率约为  $543.5$   $\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$  (高亚平等, 2013); Duarte 等(1999)对 30 种海草的生产力分析显示, 海草床上部分初级生产力约为  $0.003 \sim 15$   $\text{g DW}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 高于生物圈其他大部分类型的生态系统。对英国西南海岸 13 个海草床样本统计结果发现, 被调查海草床顶部 100 cm 的碳总存量为  $66\ 337$  t, 相当于 10 512 个英国人每年的  $\text{CO}_2$  排放量 (Green *et al.*, 2018); 其次, 海草床具有强大的悬浮物捕捉能力, 海草床生态系统所在海域中的悬浮颗粒物富含有机碳, 海草草冠可在 1 h 内捕获 73% 的悬浮颗粒物, 其颗粒物的沉降速率是无海草区的 4 倍 (Agawin *et al.*, 2002), 沉降到海底的有机物受到海草根系的固定不易再悬浮 (Hendriks *et al.*, 2008), 促进颗粒有机物的埋藏。据测算, 西班牙东北海域的海草床沉积物净碳积累达  $182$   $\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$  (Gacia *et al.*, 2002); 美国佛吉尼亚海岸  $1700$   $\text{hm}^2$  海草床经过 10 年恢复后, 碳沉积速率为  $36.68$   $\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$  (Greiner *et al.*, 2013); 地中海 *Posidonia oceanica* 海草床沉积层以每年平均  $0.175$  cm 的厚度增加, 且经历了千年后, 埋藏在沉积物中的有机物形态没有明显的变化 (Mateo *et al.*, 1997), 因此, 海草床沉积物的低分解速率是其碳汇效应的第 3 个关键因素。

## 2.3 牡蛎礁固碳机制

牡蛎礁是由大量牡蛎固着生长于硬底物表面所形成的一种生物礁系统 (Coen *et al.*, 2007)。是我国海洋牧场典型生境之一, 在莱州湾、渤海湾近海和长江口海洋牧场内, 牡蛎 (*Ostrea gigas*) 是礁体附着生物优势种, 在海洋牧场生态系统碳循环中发挥着重要的调节作用。牡蛎通过 2 种方式直接固定碳元素, 1 种方式是利用钙化作用将水中的  $\text{HCO}_3^-$  转化为  $\text{CaCO}_3$  壳体, 从而固定大量的 C, 其反应式为  $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- = \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 。牡蛎的固着生活方式和钙化作用将封存在牡蛎壳内的无机碳 ( $\text{CaCO}_3$ ) 以基质的形式长期固定在海底, 壳体可以在自然状态下存在几千年 (沈新强等, 2011)。为进一步扩增海洋牧场的固碳潜能, 史佰佰等(2019)、Marie 等(2014)和李娇等(2013)利用天然牡蛎壳为材料开展牡蛎礁的修复和人工鱼礁的制作, 拓展废弃物资源再利用途径的同时提升海洋牧场基础设施自身的碳封存。牡蛎的另一 1 种碳固定

方式是通过滤食海水中的颗粒有机碳(POC)促进个体软组织的生长,对滤食性贝类碳收支研究发现,贝类被摄取的有机碳大部分作为生长碳而成为身体组织的成分(柴雪良等,2006)。沈新强等(2011)基于长江口人工牡蛎礁的恢复情况,计算出2010年长江口牡蛎礁总固碳量为 $19.98 \times 10^4$  t。公丕海等(2014)估算出莱州湾金城海域 $64.25 \text{ hm}^2$ 海洋牧场内人工鱼礁附着牡蛎的总固碳量约为297.5 t C。崔晨(2020)对祥云湾海洋牧场人工鱼礁礁体附着生物进行固碳量估算,人工鱼礁投放后主要附着生物牡蛎的固碳量为158.5 t。

牡蛎通过生长完成直接固碳的同时,利用生理过程的生物泵功能加速了有机碳的沉降和埋藏,通过摄食活动将水体中较小的颗粒物转变成体积较大的粪便颗粒,从而能不断地把水中悬浮颗粒有机物以粪便形式输入到水底底层,加快颗粒有机物的沉积过程。也把部分有机或无机碳封存于沉积物中(Fodrie *et al.*, 2017; 张志南等, 2000; Hatcher *et al.*, 1994),间接起到生物碳汇的作用。同时,牡蛎在生长和繁殖过程中大量固着,不断堆积而形成牡蛎礁栖息地,为其他水生生物提供适宜生境(Breitburg *et al.*, 2000);美国路易斯安那州沿岸牡蛎礁恢复水域内鱼类和无脊椎动物的生物量比泥底水域多212%(Humphries *et al.*, 2015); Peterson 等(2003)对美国东南部恢复中的牡蛎礁进行估算,10 m<sup>2</sup>礁区内每年鱼类和大型甲壳类动物的产量约增加2.6 kg。牡蛎礁生态系统中的生物资源得到改善,资源量的增加进一步提高了水生生物体固碳。

#### 2.4 海洋牧场增殖鱼类固碳机理

增殖放流是补充海洋牧场渔业资源种群数量的重要措施,因高经济价值而被过度捕捞的鱼类、海参、鲍等名贵水产品是海洋牧场海域主要的增殖生物,其增殖放流不仅可以带来巨大的经济收益,还具有显著的生态功能。增殖生物摄食海洋牧场内丰富的附着生物、浮游生物、底栖生物(雷平安等, 2019; 任彬彬等, 2015; 王伟定等, 2007; 黄梓荣, 2006)等,其生长过程无需人工投喂,在完成机体生长固碳的同时,通过“生物泵”将浮游植物等转化的CO<sub>2</sub>向海底输送,促进海洋碳循环和碳埋藏。虽然,海洋动物的呼吸代谢过程释放一定的CO<sub>2</sub>,但近些年越来越多的研究表明,海洋动物通过自身的生理活动影响海洋中碳的运输和循环,起着封存碳的作用(吕为群等, 2012; Pershing *et al.*, 2010; Wilson *et al.*, 2009; Taylor *et al.*, 2006)。

鱼类是海洋牧场的典型增殖生物,人工鱼礁建设对恋礁性鱼类具有良好的诱集和养护效果,焦金菊等

(2011)对西港小石岛、威海寻山、牟平养马岛和日照前三岛的人工鱼礁区和对照区调查发现,鱼礁区鱼类种类是对照区的1.8倍,平均数量是对照区的3.5倍,海洋牧场内鱼类资源数量显著高于对照区。陈勇等(2014)对獐子岛深水鱼礁区的鱼类资源状况进行调查发现,鱼礁区主要经济鱼类为许氏平鲷(*Sebastes schlegelii*)、大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)等,鱼礁区定置网捕获大泷六线鱼尾均体重为非鱼礁区的9.36倍。张虎等(2005)对海州湾人工鱼礁生物资源调查发现,人工鱼礁投放后生物多样性和均匀度都有所增加,鱼礁区CPUE比投礁前增加1倍。鱼类资源量的增加对海洋碳循环具有一定的促进作用,这是因为海洋硬骨鱼类的体液渗透压低于海水渗透压,因此,为了避免盐离子的不断渗入和水的不断流失,海洋硬骨鱼类必须吞饮大量的海水来维持机体渗透压(Smith, 1930),在吞饮海水的同时,Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、少量Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等可通过肠的吸收作用进入鱼体内,大部分的Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>在肠道中与肠道分泌的HCO<sub>3</sub>形成的碳酸盐晶体随粪便移出,碳酸盐晶体进入海水后,沉淀成为碳酸盐岩泥(Wilson *et al.*, 2009; Walsh *et al.*, 1991)。Wilson等(2009)估计全球鱼群制造的CaCO<sub>3</sub>占海洋表面CaCO<sub>3</sub>生产量的3%~15%,这表明硬骨鱼类在全球无机碳循环中贡献了大量的无机碳。另一方面,根据我国学者对“碳汇渔业”的定义,海洋牧场内增殖鱼类生长固定碳来自自然海域,发挥着生物碳固存的作用,其渔获物以水产品形式实现了“碳移出”,留在水体中的鱼类作为颗粒碳沉积于海底,部分实现“碳埋藏”(唐启升, 2011)。但目前学术界对“鱼类捕捞”的碳汇作用持不同意见,有学者认为鱼类死亡会将碳沉淀并封存在深海中,而被捕捞的鱼类则被再次转化成CO<sub>2</sub>排放至大气中(Mariani *et al.*, 2020)。虽然,学术界对“鱼类捕捞”是碳汇或碳源仍存在争议,但海洋牧场对鱼类的增殖效应在海洋碳循环、沉降中发挥着积极的促进作用。

### 3 建议和展望

海洋牧场对生态环境的改善作用和渔业资源的养护功能已得到广泛的印证,是碳汇渔业的重要途径之一,但海洋牧场碳汇方面的研究仍处于初步探索阶段,仅有少量学者在对海洋牧场工程技术和生态效应研究中进行了简单的固碳量估算,尚未系统地开展海洋牧场碳汇机理和增汇技术方面的研究。针对海洋碳汇的发展现状和我国海洋牧场的功能定位,本文提出未来海洋牧场碳汇研究的几个重点内容:

### 3.1 海洋牧场生态系统碳循环过程及固碳机理

我国海域辽阔,漫长的海岸线南北跨越了热带、亚热带和温带,蕴藏丰富的生物资源,且很多物种具有显著的地域特征,也造就了不同海域海洋牧场生态系统的特殊性。按照基础生境的不同可分为人工鱼礁海洋牧场生态系统、牡蛎礁海洋牧场生态系统、海草场海洋牧场系统和珊瑚礁海洋牧场生态系统等,不同生境海洋牧场的理化环境、生物群落具有其特性,也决定了海洋牧场内碳循环过程和固碳机理及碳汇强度的差异。因此,海洋牧场生态系统碳汇机理研究更具有复杂性和多变性,需针对特定海洋牧场,从海洋牧场生态系统组成、生物群落结构和食物网关系角度研究碳在海洋牧场海域的转化、迁移和固定过程;查明海洋牧场关键碳汇因子,解析其固碳机理及对海洋牧场碳汇的贡献方式和效率;探索基于海域自然特征的海洋牧场构建技术和多种方式的海洋牧场生态保护技术,结合生态、物理、化学等多学科调查方式,开展海洋牧场海域碳通量、碳循环的监测和评估。

### 3.2 海洋牧场碳汇扩增技术与途径

海草床、珊瑚礁与红树林并称为近海典型 3 种生态系统,是近海重要的产卵场、育幼场、索饵场和庇护场,更是典型的高生产力海洋生态系统。目前,我国渔业主管部门已将海草床和珊瑚礁海域纳入了海洋牧场范围内,并设立相应的国家级海洋牧场示范区。海草床重建、珊瑚礁保育不仅是海洋牧场技术体系的重要组成部分,而且更是海洋牧场生境首要的碳汇因素。由于气候变化和人为破坏,全球海草床分布大量缩减(Wsycott *et al.*, 2009),珊瑚礁大面积退化(Wikinson, 2006; Fabricius, 2005),我国海藻场面积的急剧萎缩影响到海草物种的多样性(郑凤英等, 2013)。保护和重建海草床已成为海洋牧场建设中刻不容缓的重要任务,研究海草床、珊瑚礁的保护、培育及移植技术是扩增海洋牧场碳汇最基本的途径。

据统计,全球 85% 的牡蛎栖息地已经消失,剩余的天然牡蛎种群大部分处于较差的状态(Ermgassen *et al.*, 2012; Wilberg *et al.*, 2011; Beck *et al.*, 2011),在我国渤海湾、莱州湾、长江口等海域,牡蛎是近海礁石附着生物的优势种,形成典型的牡蛎礁海洋牧场,发挥着净化水质、提供栖息地、保护生物多样性、加速碳沉降速率和固定无机碳等生态功能,因此,研究人工牡蛎礁修复技术,研建近海牡蛎礁海洋牧场是扩增海洋牧场碳汇的重要手段。

针对不同类型的海洋牧场,研究基于海洋牧场生态容纳量和食物网结构的多营养层级综合增殖技术,

构建海洋牧场多元生境,提升海洋牧场生态系统稳定性,增殖生物资源是扩增海洋牧场生物体固碳的基础方法;开发生态型海洋牧场基础设施,提升基础设施自身的固碳量(史佰佰等, 2019),实现长期碳封存。

### 3.3 海洋牧场碳汇计量和交易模式

目前,关于海洋牧场生物固碳潜力估算的研究仍比较薄弱,主要原因是计量方法不明确,且海洋牧场碳计量公式大都是针对某一单一对象来计量的(如单独计算藻类、贝类、刺参等的固碳量),把海洋牧场生态系统作为一个整体计算碳汇总量的研究几乎没有,因而建立海洋牧场整体的碳储量计算方法是今后的重点研究方向,也是海洋牧场碳汇进入碳排放交易市场的敲门砖。由于海洋生态系统的复杂性、隐蔽性,其碳汇计量的难度远高于森林碳汇,探索海洋牧场碳汇生态补偿机制,建立定向补偿与排放权置换交易相协同的海洋牧场碳汇发展,是构建海洋牧场碳汇交易模式的一项重要方式。

海洋是地球上最大的碳库,存储了地球上 93% 的 CO<sub>2</sub>,海洋强大的碳汇作用对缓解全球气候变化,保障粮食安全、人类健康和沿海经济发展具有至关重要的作用。虽然蓝色碳汇已经受到联合国相关组织和沿海国家的重视,但目前仅有《红树林碳汇计量方法》被清洁发展机制(CDM)所认可,海草床、珊瑚礁、滨海湿地和海洋渔业等典型海洋生物,特殊生态系统和特定用海模式的碳汇功能在国际社会和学术界仍存在争议,阐明碳元素在各类典型海洋生物及其所属生态系统内的转化、循环过程是蓝碳研究的基本任务。渔业水域作为近海典型的特殊生态系统,对近海碳汇效应的发挥具有显著的影响,大力发展海洋牧场等环境友好及资源养护型渔业模式,是提升近海海洋固碳的必然选择。研究海洋牧场碳汇机理,研发海洋牧场固碳技术,建立海洋牧场碳汇计量方法,为海洋碳汇和渔业绿色发展提供理论基础和技术支撑,更好的服务国家双碳战略。

## 参 考 文 献

- AGAWIN N, DURATE C M. Evidence of direct particle trap-paying by a tropical seagrass meadow. *Estuaries and Coasts*, 2002, 25: 1205-1209
- BECK M W, BRUMBAUGH R D, AIROLDI L, *et al.* Oyster reefs at risk and recommendations for conservation, restoration, and management. *BioScience*, 2011, 61: 107-116
- BOUILLON S, BORGES A V, CASTANEDA-MOYA E K. Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008,

- 22(2): 1–12
- BREITBURG D, COEN L D, LUCKENBACH M W, *et al.* Oyster reef restoration: Convergence of harvest and conservation strategies. *Journal of Shellfish Research*, 2000, 19(1): 371–377
- CHAI X L, ZHANG J M, FANG J, *et al.* Study on carbon budget of main bivalves in Yueqing Bay and Sanmen Bay. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2006, 15(1): 52–58 [柴雪良, 张炯明, 方军, 等. 乐清湾、三门湾主要滤食性养殖贝类碳收支的研究. *上海水产大学学报*, 2006, 15(1): 52–58]
- CHEN C T A, BORGES A V. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009, 56(8): 578–590
- CHEN H F, WANG Y L, LIAO Y, *et al.* Community characteristics of phytoplankton in artificial reef areas of Xiangshan Bay. *Marine Fisheries*, 2013, 35(4): 396–404 [陈海峰, 王云龙, 廖勇, 等. 象山港人工鱼礁区浮游植物群落特征. *海洋渔业*, 2013, 35(4): 396–404]
- CHEN P Q. Carbon cycle in earth system. Beijing: Science Press, 2004 [陈泮勤. 地球系统碳循环. 北京: 科学出版社, 2004]
- CHEN W Y, WU Z X, WANG W Z. Carbon capture and storage (CCS) and its potential role to mitigate carbon emission in China. *Environmental Science*, 2007, 28(6): 1178–1182
- CHEN Y H. Analysis of ecological effect of southern Dalajia Island artificial reef area in Daya Bay, Guangdong, China. Doctoral Dissertation of Jinan University, 2009 [陈应华. 大亚湾大辣甲南人工鱼礁区的生态效应分析. 暨南大学博士研究生学位论文, 2009]
- CHEN Y, YANG J, TIAN T. The enhancement effect of fishery resources on artificial reefs in marine ranching area in Zhangzi Island. *Journal of Dalian Ocean University*, 2014, 29(2): 183–187 [陈勇, 杨军, 田涛. 獐子岛海洋牧场人工鱼礁区鱼类资源养护效果的初步研究. *大连海洋大学学报*, 2014, 29(2): 183–187]
- CHERYL L, DOUGHTY J, ADAM L, *et al.* Mangrove range expansion rapidly increases coastal wetland carbon storage. *Estuaries and Coasts*, 2016, 39(2): 385–396
- COEN L D, GRIZZLE R E. The importance of habitat created by mollusk shellfish to managed species along the Atlantic coast of the United States. *Atlantic States Marine Fisheries Commission. Habitat Management Series*, 2007
- CUI C. Preliminary study on carbon sink function of artificial reef area in Xiangyun Bay marine ranching. Master's Thesis of Hebei Agricultural University, 2020 [崔晨. 祥云湾海洋牧场人工鱼礁区碳汇功能初步研究. 河北农业大学硕士研究生学位论文, 2020]
- DEWAR W K, BINGHAM R J, IVERSON R L, *et al.* Does the marine biosphere mix the ocean? *Journal of Marine Research*, 2006, 64(4): 541–561
- DUARTE C M, CHISCANO L. Seagrass biomass and production: A reassessment. *Aquatic Botany*, 1999, 65(1/2/3/4): 159–174
- DUARTE C M, KENNEDY H, MARBA N, *et al.* Assessing the capacity of seagrass meadows for carbon burial: Current limitations and future strategies. *Ocean Coastal Management*, 2013, 83(8): 32–38
- DUARTE C M, MIDDELBURG J J, CARACO N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2005, 2(6): 1–8
- ERMGASSEN P, SPALDING M D, BLAKE B, *et al.* Historical ecology with real numbers: Past and present extent and biomass of an imperilled estuarine habitat. *Proceedings Biological Sciences*, 2012, 279(1742): 3393–3400
- FABRICIUS K. Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: Review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(2): 125–146
- FANG L C, CHEN G B, CHEN P M, *et al.* Preliminary evaluation on resources enhancement of artificial reef in the east corner of Zhelang Shanwei. *Asian Agricultural Research*, 2013 (9): 111–115
- FODRIE F J, RODRIGUEZ A B, GITTMAN R K, *et al.* Oyster reefs as carbon sources and sinks. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, 284(1859): 20170891
- FOURQUREAN J W, DUARTE C M, KENNEDY H, *et al.* Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 505–509
- GACIA E, DUARTE C M, MIDDELBURG J J. Carbon and nutrient deposition in a Mediterranean seagrass (*Posidonia oceanica*) meadow. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(1): 23–32
- GAO Y P, FANG J G, TANG W, *et al.* Seagrass meadow carbon sink and amplification of the carbon sink for eelgrass bed in Sanggou Bay. *Progress of Fishery Sciences*, 2013, 34(2): 17–21 [高亚平, 方建光, 唐望, 等. 桑沟湾大叶藻海草床生态系统碳汇扩增力的估算. *渔业科学进展*, 2013, 34(2): 17–21]
- GONG P H, LI J, GUAN C T, *et al.* Estimation and experiment of carbon sequestration by oysters attached to the enhancement artificial reefs in Laizhou Bay, Shandong, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10): 3032–3038 [公丕海, 李娇, 关长涛, 等. 莱州湾增殖礁附着牡蛎的固碳量试验与估算. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 3032–3038]
- GONG P H. The effect of carbon fixation and carbon sequestration estimate of seafood in marine ranching. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2014 [公丕海. 海洋牧场中海珍品固碳作用及固碳量估算. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2014]
- GREEN A, CHADWICK M A, JONES P, *et al.* Variability of UK seagrass sediment carbon: Implications for blue carbon estimates and marine conservation management. *PLoS One*, 2018, 13(9): 1–18
- GREINER J T, MCGLATHERY K J, GUNNELL J, *et al.* Seagrass restoration enhances "Blue carbon" sequestration in coastal Waters. *PLoS One*, 2013, 8(8): e72469
- GUO Y N. The concentration of carbon dioxide in the atmosphere has reached an all-time high. *Ecological Economy*, 2019,

- 35(7): 5–8 [郭英楠. 大气二氧化碳浓度达历史顶点. 生态经济, 2019, 35(7): 5–8]
- HATCHER A, GRANT J, SCHOLFIELD B. Effects of suspended mussel culture (*Mytilus* spp.) on sedimentation, benthic respiration and sediment nutrient dynamics in a coastal bay. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 115: 219–235
- HENDRIKS I E, SINTES T, BOUMA T J, *et al.* Experimental assessment and modeling evaluation of the effects of the seagrass *Posidonia oceanica* on flow and particle trapping. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 356: 163–173
- HOUGHTON R A. Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 35: 313–347
- HU C M, WANG M Q, LAPOINTE B E, *et al.* On the Atlantic pelagic Sargassum's role in carbon fixation and sequestration. *Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146801
- HUANG Z R, LIANG X Y, ZENG J. Preliminary study on effects of accrete organisms of artificial reef material. *South China Fisheries Science*, 2006, 2(1): 34–38 [黄梓荣, 梁小芸, 曾嘉. 人工鱼礁材料生物附着效果的初步研究. 南方水产, 2006, 2(1): 34–38]
- HUMPHRIES A T, PEYRE M. Oyster reef restoration supports increased nekton biomass and potential commercial fishery value. *PeerJ*, 2015, 3(12): e1111
- HUMPHRIES A T, PEYRE M. Oyster reef restoration supports increased nekton biomass and potential commercial fishery value. *PeerJ*, 2015, 3(12): e1111
- IPCC. IPCC fourth assessment report-ar4-climate change 2007: The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- JIAO J J, PAN Y X, SUN L Y, *et al.* Effect of artificial reefs on fish multiplication. *Fisheries Science*, 2011, 30(2): 79–82 [焦金菊, 潘永玺, 孙利元, 等. 人工鱼礁区的增殖鱼类资源效果初步研究. 水产科学, 2011, 30(2): 79–82]
- KOIKE S, OTAKE S. The effect to the flow around the artificial reef in the different arrangement *in situ*. *Journal of Fisheries Engineering*, 2016, 53(3): 139–147
- LALLI C M, PARSONS T R. *Biological oceanography: An introduction*. Pergamon Press, 2004
- LEI A P, CHEN H, CHEN J F, *et al.* Research on species composition and biomass of phytoplankton in Daya Bay artificial reef area. *Ocean Technology*, 2009, 28(4): 83–88 [雷安平, 陈欢, 陈菊芳, 等. 大亚湾人工鱼礁区浮游植物的种类组成和生物量研究. 海洋技术, 2009, 28(4): 83–88]
- 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. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2346–2352 [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. 2011, 30(11): 2346–2352]
- LI J, GUAN C T, GONG P H, *et al.* Preliminary analysis of carbon sink mechanism and potential of artificial reef ecosystem. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 65–69 [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. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 65–69]
- LI J, ZHANG X M, GUAN C T, *et al.* Characteristics of upwelling of hollow square enhancement reefs based on particle image velocimetry. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24): 232–239 [李娇, 张秀梅, 关长涛, 等. 镂空方型增殖礁上升流特性的粒子图像测速试验. 农业工程学报, 2014, 30(24): 232–239]
- LI J, ZHENG Y X, GONG P H, *et al.* Numerical simulation and PIV experimental study of the effect of flow fields around tube artificial reefs. *Ocean Engineering*, 2017, 134: 96–104
- LÜ W Q, CHEN A Q, LIU H. Carbonate deposits in marine fish intestines: Contribution of marine fish cultures to carbon sink fisheries. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(12): 1924–1932 [吕为群, 陈阿琴, 刘慧. 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. 水产学报, 2012, 36(12): 1924–1932]
- MA H, QIN C X, CHEN P M, *et al.* Study of biomass carbon storage in Zhelin Bay marine ranch of South China Sea. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(6): 56–64 [马欢, 秦传新, 陈丕茂, 等. 南海柘林湾海洋牧场生物碳储量研究. 南方水产科学, 2017, 13(6): 56–64]
- MARIANI G, CHEUNG W, LYET A, *et al.* Let more big fish sink: Fisheries prevent blue carbon sequestration-half in unprofitable areas. *Science Advances*, 2020, 6(44): eabb4848
- MARIE L, SANTIAGO K D, PALMER T A, *et al.* Oyster reef restoration: Effect of alternative substrates on oyster recruitment and nekton habitat use. *Journal of Coastal Conservation*, 2014, 19(1): 1–10
- MATEO M A, ROMERO J, PEREZ M, *et al.* Dynamics of millenary organic deposits resulting from the growth of the mediterranean seagrass *posidonia oceanica*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 44(1): 103–110
- NELLEMANN C, CORCORAN E, DUARTE C M. Blue carbon: A rapid response assessment. Norway, 2009
- OLUFEMI A, OKOCHA R, OLUFEMI O. Global climate change. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2014(2): 114–122
- PATT T. Climate change and natural disasters (CHANGES). *Ssrn Electronic Journal*, 2014
- PERSHING A J, CHEISTENSEN L B, RECORD N R. The impact of whaling on the ocean carbon cycle: Why bigger was better. *PLoS One*, 2010, 5(8): e12444
- PETERSON C H, GRABOWSKI J H, POWERS S P. Estimated enhancement of fish production resulting from restoring oyster reef habitat: Quantitative valuation. *Marine Ecology Progress*, 2003, 264(12): 249–264
- PRINCIOTTA F. Global climate change and the mitigation challenge. *AirRepair*, 2009, 59(10): 1194–1211
- REEDS K A, SMITH J A, SUTHERS I M, *et al.* An ecological halo surrounding a large offshore artificial reef: Sediments, infauna and fish foraging. *Marine Environmental Research*, 2018, 141(10): 30–38
- REN B B, YUAN W, SUN J Q, *et al.* Impact of artificial reef on community of macrobenthos in Jincheng area of Laizhou Bay, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015,

- 26(6): 863–1870 [任彬彬, 袁伟, 孙坚强, 等. 莱州湾金城海域鱼礁投放后大型底栖动物群落变化. 应用生态学报, 2015, 26(6): 863–1870]
- SALVANES A G V. Ocean ranching. Encyclopedia of Ocean Sciences (2nd Edition, 2016; 1st edition, 2001). Elsevier Pte Ltd, Singapore, 2016(4): 146–155
- SEAMAN W, LINDBERG W J. Artificial reefs. Encyclopedia of Ocean Sciences (2nd Edition, 2016; 1st edition, 2001). Elsevier Pte Ltd, Singapore, 2016, (4): 226–233
- SHEN G Y, SHI B Z. Ocean ecology. Beijing: Science Press, 2002 [沈国英, 施并章. 海洋生态学. 北京: 科学出版社, 2002]
- SHEN X Q, QUAN W M, YUAN Q. Restoration and assessment of carbon sink potential for aintertidal oyster reef in the Yangtze River estuary, China. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(10): 2119–2123 [沈新强, 全为民, 袁骐. 长江口牡蛎礁恢复及碳汇潜力评估. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2119–2123]
- SHI B B, GONG P H, GUAN C T, *et al.* Influence of different replacement fates of *Argopecten irradians* aggregate on physical properties of artificial reefs and carbon sequestration. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(6): 1–8 [史佰佰, 公丕海, 关长涛, 等. 海湾扇贝骨料不同替代率对人工鱼礁物理性能影响及碳汇作用分析. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 1–8]
- SHUMAN E K. Global climate change and infectious diseases. International Journal of Occupational and Environmental Medicine, 2011, 2(1): 11–19
- SMITH H W. The absorption and excretion of water and salts by marine teleosts. American Journal of Physiology, 1930, 93(2): 480–505
- SONG J M, LI X G, YUAN H M, *et al.* Carbon fixed by phytoplankton and cultured algae in China coastal seas. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 551–558 [宋金明, 李学刚, 袁华茂, 等. 中国近海生物固碳强度与潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 551–558]
- SUN J. Marine phytoplankton and biological carbon sink. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5372–5378 [孙军. 海洋浮游植物与生物碳汇. 生态学报, 2011, 31(18): 5372–5378]
- TANG Q S, LIU H. Strategy for carbon sink and its amplification in marine fisheries. Engineering Science, 2016, 18(3): 68–73 [唐启升, 刘慧. 海洋渔业碳汇及其扩增战略. 中国工程科学, 2016, 18(3): 68–73]
- TANG Q S, ZHANG J H, FANG J G. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO<sub>2</sub> absorption by coastal ecosystems. Marine Ecology Progress Series, 2011, 424: 97–104
- TANG Q S. Fisheries carbon sinking: Faster and better development of modern fisheries. Jiangxi Fisheries Sciences and Technology, 2011(2): 5–7 [唐启升. 碳汇渔业与又好又快发展现代渔业. 江西水产科技, 2011(2): 5–7]
- TAYLOR B W, FLECKER A S, HALL R O. Loss of a harvested fish species disrupts carbon flow in a diverse tropical river. Science, 2006, 313(5788): 833–826
- VAN A K, HEKKEA M P, TURKENBURG W C. Accelerating the deployment of carbon capture and storage technologies by strengthening the innovation system. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(2): 396–409
- WALSH P J, BLACKWELDER P, GILL K A, *et al.* Carbonate deposits in marine fish intestines: A new source of biomineralization. Limnology Oceanography, 1991, 36(6): 1227–1232
- WANG W D, XU H X, PAN G L, *et al.* Current situation and prospect of recreational ecotypic artificial reef construction in Zhejiang. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2007, 26(1): 22–27 [王伟定, 徐汉祥, 潘国良, 等. 浙江省休闲生态型人工鱼礁建设现状与展望. 浙江海洋学院学报, 2007, 26(1): 22–27]
- WAYCOTTA M, DUARTE C M, CARRUTHERS T J B. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(30): 12377–12381
- WILBERG M J, LIVINGS M E, BARKMAN J S, *et al.* Overfishing, disease, habitat loss, and potential extirpation of oysters in upper Chesapeake Bay. Marine Ecology Progress, 2011, 436(9): 131–144
- WILKINSON C. Status of coral reefs of the world: Summary of threats and remedial action. Cambridge University Press, 2006
- WILSON R W, MILLERO F J, TAYLOR J R. Contribution of fish to the marine inorganic carbon cycle. Science, 2009, 323(5912): 359–362
- YAN L W, HUANG H J, CHEN J T, *et al.* Estimation of carbon sink capacity of algal mariculture in the coastal areas of China. Advances in Marine Science, 2011, 29(4): 537–545 [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. 海洋科学进展, 2011, 29(4): 537–545]
- ZHANG H, ZHU K W, TANG J H. The effect of fishery resource enhancement in the artificial reef area in the Haizhou Gulf. Marine Fisheries, 2005, 27(1): 38–43 [张虎, 朱孔文, 汤建华. 海州湾人工鱼礁养护资源效果初探. 海洋渔业, 2005, 27(1): 38–43]
- ZHANG S Y, ZHANG H J, JIAO J P, *et al.* Change of ecological environment of artificial reef waters in Haizhou Bay. Journal of Fisheries China, 2006, 30(4): 475–480 [章守宇, 张焕君, 焦俊鹏, 等. 海州湾人工鱼礁海域生态环境的变化. 水产学报, 2006, 30(4): 475–480]
- ZHANG S, ZHU K W, SUN M C. Species composition and biomass variation in phytoplankton in artificial reef area in Haizhou Bay. Journal of Dalian Fisheries University, 2006, 21(2): 134–140 [张硕, 朱孔文, 孙满昌. 海州湾人工鱼礁区浮游植物的种类组成和生物量. 大连水产学院学报, 2006, 21(2): 134–140]
- ZHANG X, XU X P, DAI Y Y, *et al.* Phytoplankton community characteristics and variation at artificial reefs of Tianjin offshore. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(6): 1–10 [张雪, 徐晓甫, 戴媛媛, 等. 天津近岸人工鱼礁海域浮游植物群落及其变化特征. 渔业科学进展, 2018, 39(6): 1–10]



- ZHANG Z N, ZHOU Y, HAN J, *et al.* A study on the biodeposition of bivalves with the application of annular flux system. *Journal of Ocean University of Qingdao (Natural Science)*, 2000, 30(2): 270–276 [张志南, 周宇, 韩洁, 于子山. 应用生物扰动实验系统(Annular Flux System)研究双壳类生物沉降作用. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 2000, 30(2): 270–276]
- ZHENG F Y, QIU G L, FAN H Q, *et al.* Diversity, distribution and conservation of Chinese seagrass species. *Biodiversity Science*, 2013, 21(5): 517–526 [郑凤英, 邱广龙, 范航清, 等. 中国海草的多样性、分布及保护生物多样性, 2013, 21(5): 517–526]
- ZHENG G X, SONG J M, DAI J C, *et al.* Distributions of chlorophyll-*a* and carbon fixed strength of phytoplankton in autumn of the southern Huanghai Sea waters. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(3): 109–118 [郑国侠, 宋金明, 戴纪翠, 王益鸣. 南黄海秋季叶绿素 *a* 的分布特征与浮游植物的固碳强度. *海洋学报*, 2006, 28(3): 109–118]

(编辑 陈 严)

## Research Progress on Fishery Carbon Sinking Associated with Marine Ranching

LI Jiao<sup>1</sup>, LI Mengdi<sup>1,2</sup>, GONG Pihai<sup>1</sup>, GUAN Changtao<sup>1①</sup>

(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, Carbon-Sink Fisheries Laboratory, Marine Ranching Engineering & Technology Research Center Research Center of Marine Ranching Engineering and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China*; 2. *Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China*)

**Abstract** Marine carbon sinking is performed by "solubility pumps" and "biological pumps" and has significant advantages related to its large carbon sequestration capacity and long-time storage characteristics. Therefore, blue carbon can effectively mitigate the greenhouse effect caused by CO<sub>2</sub> emissions and play an irreplaceable role in combating global climate change. Fishery is the primary human activity in the ocean economy, which has an important impact on the carbon cycle in inshore waters. Fishery carbon sinking is an indispensable part of blue carbon sequestration. Marine ranching is a healthy and low-carbon fishery model that restores the habitat and conserves aquatic biological resources. Construction of marine ranching could promote the ocean's primary productivity and expand its CO<sub>2</sub> sequestration capacity. Moreover, increasing the resources in marine ranching can improve carbon transfer efficiency among different nutrient levels in the food web, accelerating the deposition of particulate organic carbon. In marine ranching, there is no feeding behavior in fishery production, wherein photosynthesis of phytoplankton and large algae provides food for other animals. Shellfish, crustaceans, fish, and other organisms in marine ranching areas rely on plankton, benthos, and fouling organisms for nutrition. Fishing of economically important fishery resources completes the "carbon removal" in seawater, which is one of the typical models of carbon sink fisheries. Therefore, marine ranching construction is an effective new way to expand fishery carbon sink. In this study, the research status on carbon sequestration mechanisms, processes, and potential key factors of the national and international marine ranching carbon sinking was summarized based on the definition of marine ranching in China. The critical roles of seagrass bed, oyster reef, and other typical marine ranching ecosystems were analyzed concerning the inshore carbon sequestration. Fundamental research directions were suggested to further understand the carbon sequestration mechanisms and carbon cycle, and explore amplifying marine ranching technologies such as the carbon accounting method, providing support for the study of marine carbon sinking amplifications and strategies concerning carbon peaking and carbon neutrality in China.

**Key words** Marine ranching; Fishery carbon sinking; Carbon fixation; Carbon peaking and carbon neutrality

① Corresponding author: GUAN Changtao, E-mail: guanct@ysfri.ac.cn