

主要养殖贝类固碳能力评估及其影响因素——以烟台海域为例

王政¹, 杨涛², 王一娜¹, 李明³, 裴鹏兵⁴, 杜虹⁴, 张建柏², 沈萍萍¹

1. 烟台大学海洋学院, 山东 烟台 264005;

2. 烟台海洋经济研究院, 山东 烟台 264005;

3. 山东省烟台生态环境监测中心, 山东 烟台 264000;

4. 汕头大学海洋灾害预警与防护广东省重点实验室, 广东 汕头 515063

摘要: 贝类是海洋生态系统重要组成部分, 通过生命活动利用和固定海水中 CO_2 , 发挥重要碳汇作用。本文基于碳储量法探究了烟台各海域不同种类、规格贝类的固碳能力。不同种贝类固碳能力差别巨大, 其固碳能力随着个体增大显著增强。其中养殖型长牡蛎(*Crassostrea gigas*)、野生型长牡蛎(*Ostrea plicatula*)、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、海湾扇贝(*Argopecten irradians*)及紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)的固碳能力分别为 3.37~16.64、2.87~14.17、0.21~2.10、0.87~1.58 及 0.21~0.38 $\text{g} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$ 。牡蛎的固碳能力远远高于扇贝和贻贝($P < 0.01$), 而不同海域相同贝类的固碳能力无显著差异($P > 0.01$)。此外, 基于贝类碳汇计量指标的实际测定值与标准参考值进行烟台市主要养殖贝类碳汇量核算发现, 牡蛎碳汇量实测值显著高于标准估算量($P < 0.01$), 而扇贝的碳汇量实测值显著低于标准估算量($P < 0.01$), 长岛海域海湾扇贝及贻贝的碳汇实际核算量与标准估算量之间差异显著($P < 0.01$)。贝类固碳能力与其种类及个体大小直接相关, 表明贝类碳汇计量模型中参数的设定不仅要考虑养殖品种, 也要考虑个体大小的组成。

关键词: 贝类; 碳汇能力; 碳汇量; 烟台海域

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2025)03-0095-09

Assessment of carbon sequestration capacity of cultivated bivalves and influencing factors in Yantai sea areas

WANG Zheng¹, YANG Tao², WANG Yina¹, LI Ming³, PEI Pengbing⁴, DU Hong⁴, ZHANG Jianbai², SHEN Pingping¹

1. Ocean School, Yantai University, Yantai 264005, China;

2. Yantai Marine Economy Research Institute, Yantai 264005, China;

3. Yantai Ecological Environment Monitoring Center, Shandong Province, Yantai 264000, China;

4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Disaster Prediction and Prevention, Shantou University, Shantou 515063, China

Abstract: Bivalves play an important role as carbon sinks by absorbing and fixing CO_2 in seawater. This study explores the carbon sequestration capacity (CSC) of different species and sizes of bivalves cultivated in Yantai sea areas to determine their carbon stocks. The results showed that the CSC of different species varied greatly, and increased significantly with the individual

收稿日期: 2024-06-24; 修订日期: 2024-08-02。林强编辑

基金项目: 汕头大学海洋灾害预警与防护广东省重点实验室(GPKLMD2023001); 国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室开放课题(202311); 国家自然科学基金项目(42376159)

作者简介: 王政(1998—), 硕士研究生, 主要从事海洋碳汇研究。email: 363909644@qq.com

通信作者: 李明, 主要从事生态环境监测与管理, email: ythsnl19@126.com; 张建柏, 正高级工程师, 主要从事海洋经济研究, email: hyjzjb@126.com; 沈萍萍, 教授, 主要从事海洋生态学研究, email: pshen@ytu.edu.cn

Received date: 2024-06-24; Revised date: 2024-08-02. Editor: LIN Qiang

Foundation item: Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Disaster Prediction and Prevention, Shantou University (GPKLMD2023001); Open Project of the National Key Laboratory for Environmental Protection of Coastal Ecological Environment (202311); National Natural Science Foundation of China (42376159)

Corresponding author: LI Ming, email: ythsnl19@126.com; ZHANG Jianbai, email: hyjzjb@126.com; SHEN Pingping, email: pshen@ytu.edu.cn

size. The CSC of *Crassostrea gigas* (farmed *C. gigas*), *Ostrea plicatula* (wild *C. gigas*), *Chlamys farreri*, *Argopecten irradians* and *Mytilus galloprovincialis* were 3.37~16.64, 2.87~14.17, 0.21~2.10, 0.87~1.58 and 0.21~0.38 $\text{g} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$, respectively. The CSC of oysters was much higher than that of scallops and mussels ($P < 0.01$), and there was no significant difference among sampling sites. In addition, based on the measured and the standard reference values of bivalves carbon sink evaluation parameters, the actual measured amount of oyster carbon sinks in three study areas of Yantai was significantly higher than the estimation based on standard reference values ($P < 0.01$), but the result was opposite for scallops. There was significant difference between the actual measured amount of carbon sinks and the standard estimation of *A. irradians* and *M. galloprovincialis* in Changdao waters ($P < 0.01$), which was related to bivalve species and individual sizes. The results showed that the setting of parameters in the bivalve carbon sink evaluation model should take into account not only the composition of the species but also the individual size.

Key words: bivalve; carbon sequestration capacity; carbon sink; Yantai sea areas

随着全球气候变化及其影响日益严重, 发展低碳经济产业、减排增汇, 成为应对全球气候变化, 实现可持续发展的战略选择。海洋是地球上最大的碳储库, 在吸收 CO_2 及调节气候变化方面发挥了重要作用, 渔业是传统优势海洋产业, 其中, “渔业碳汇”新模式在低碳经济发展、减排增汇过程中具有巨大的潜力。“渔业碳汇”是生物碳汇的一种, 在从事渔业生产的同时捕获和储存温室气体, 尤其是贝藻类, 具有高效的碳汇功能和更长的碳汇周期, 对近海碳循环过程影响较大, 形成一个“可移出碳汇”(唐启升等, 2022)。滤食性贝类通过摄食、钙化、呼吸、排泄等活动, 对碳的生物地球化学过程产生重要影响(蒋增杰等, 2022), 其中: 贝类的钙化作用可以将无机碳固定在碳酸钙贝壳中, 该方式对碳的封存可达数百万年之久(Tang et al, 2011; 张继红等, 2013; Humphreys et al, 2018); 贝类滤食水体悬浮颗粒中的有机碳, 部分用于软体组织的生长, 部分以粪便和假粪形态沉降并封存于海底, 这也起到了生物碳汇的作用(张明亮等, 2011)。此外, 贝类通过滤食作用净化水体, 增加海水的透明度, 有利于促进浮游藻类和底栖植物的生长, 进而增加海区对二氧化碳的吸收固定(Nelson et al, 2004; 公丕海等, 2014)。因此, 滤食性贝类是重要的碳汇生态系统服务提供者, 对于近海碳循环过程具有重要意义。

由于具有经济和生态双重价值, 养殖贝类碳汇受到了广泛关注。近年来, 国内外学者从贝类的移出碳能力、个体水平碳收支、生命周期评价、生物沉积碳等多个方面开展了相关研究, 取得了一系列研究成果(Bauer et al, 2013; Duarte et al, 2013; 唐启升等, 2013; 聂梦晨等, 2022; 姜妮妮等, 2022; Tamburini et al, 2022)。养殖贝类不仅是碳的使用者, 还参与了碳的转移和释放。最新研究表明, 养殖贝类生理活动偶联碳库可以分为使用碳、移出碳、储存碳、释放碳。目前

可利用渔业生物生长过程碳收支各个分量之间的关系(使用碳=移出碳+储存碳+释放碳), 换算总碳汇和净碳汇(张波等, 2022)。当使用碳多于释放碳(移出碳+储存碳>释放碳)就是碳汇, 反之则是碳源(唐启升等, 2022)。作为一个新兴理念, 贝类碳汇研究仍处于初级阶段, 由于贝类养殖周期长、生理活动复杂、固碳储碳过程与机制研究与认知仍然不充分, 计量方法学不完善, 因此其碳汇核算方法是当前研究的热点与难点(蒋增杰等, 2022)。

2021年《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) (中华人民共和国自然资源部, 2021)及2022年9月《海洋碳汇核算方法》(HY/T0349-2022) (中华人民共和国自然资源部, 2022)等明确将贝类碳汇纳入了蓝碳范畴, 系统规范了海洋碳汇核算工作的流程、方法及技术等要求, 初步构建了适用于我国贝类碳汇核算的方法学体系, 并提供了不同种贝类的含碳比率、干湿比重转换系数等标准参考值。目前, 有关贝类碳汇的核算研究大都基于碳储量方法按照标准中系数参考值(即标准参考值)或其他经验参考值进行估算(尹钰文等, 2022; 徐晓莹等, 2023), 但标准中并未进一步细化贝类品种、个体大小、养殖海域等之间的差异, 而不同海域养殖的贝类碳汇参考标准估算值与实际测算值之间到底有多大差别, 不同生长阶段(大小)贝类生物的碳汇能力是否存在差异等问题, 尚未进行广泛深入的实验研究, 而这些对于贝类碳汇的精确核算及后续碳汇交易等都具有重要意义与参考价值。我国是世界贝类养殖第一大国, 贝类碳汇潜力巨大, 烟台海域因其优越的自然条件是我国重要的贝类增养殖区(李成林等, 2011)。烟台濒临黄海和渤海, 是研究贝类碳汇能力及碳汇量的理想场所, 对烟台海域贝类碳汇的精确评估可为发展渔业碳汇提供理论基础与科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

烟台市 2020—2022 年海水贝类养殖产量来自《烟台市海洋渔业统计报表》。

1.2 样品采集

烟台濒临渤海与黄海, 其中龙口市邻近渤海湾, 海岸线长达 68.4km。牟平区位于北黄海沿岸, 海岸线长 52km。长岛位于黄渤海交汇处, 海域面积 3541km², 海岸线长 187.8km, 均为得天独厚的海水养殖区域。三地海水养殖贝类品种主要为牡蛎、扇贝、贻贝等。分别于烟台市龙口纪岬岛温流水国家级海洋牧场、牟平区以及长岛养殖场采集实验贝类。各海域主要养殖种类包括养殖型长牡蛎(长牡蛎 *Crassostrea gigas*)、野生型长牡蛎(褶牡蛎 *Ostrea plicatula*)及栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、海湾扇贝(*Argopecten irradians*)等, 养殖方式均为筏式养殖; 紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)主要采集于牡蛎养殖筏架。牡蛎和贻贝的养殖周期为一年左右, 扇贝的养殖周期为半年。其中牡蛎分为三个规格: 大型(大于 11.0cm)、中型(9.0~11.0cm)、小型(小于 9.0cm), 约占总产量的 50%、30%、20%。扇贝分三个规格: 大型(大于 7.0cm)、中型(5.0~7.0cm)、小型(小于 5.0cm), 其中牟平大型、中型、小型扇贝约占总产量的 50%、45%、5%; 龙口、长岛不同个体扇贝约占 50%、40%、10%; 紫贻贝个体偏中小型、个体较均匀, 长岛海域紫贻贝(体长 2.5~3.0cm)采自 2023 年 12 月中旬, 牟平海域紫贻贝(体长 4.0~4.5cm)采自 2024 年 3 月中旬。每组大、中、小型样品各取 3~5 只, 各三组平行。

1.3 样品处理与分析

由于贝类表面附着生物也可固碳(任黎华, 2014), 为减小误差, 实验过程中尽量去除贝类表面附着物, 以免影响实验结果。

干湿重测量: 将贝类壳、软体组织分离后分别称量湿重, 然后置于 60℃烘箱内烘干至恒重后测定其干重, 计算其干湿比重转换系数及质量比。

碳含量测定: 将样品烘干后进行研磨, 过筛(0.154mm)后使用 Vario Microcube 元素分析仪(德国 Elementar 公司)进行碳含量分析。

1.4 碳汇能力评估方法

本文依据《海洋碳汇核算方法》(中华人民共和国自然资源部, 2022), 将贝类碳汇能力分成两部分计算: 贝壳的碳汇能力 (1) 和软体组织的碳汇能力 (2), 由此计算出牡蛎、扇贝、贻贝等海水养殖贝类的生物

质碳及其碳汇能力(以碳计) (3)。本研究暂未考虑贝类生物沉积物碳汇能力。

贝壳的碳汇能力计算公式:

$$CB_j^{sh} = P_j^{sh} \times K_j^{sh} \times R_j^{sh1} \times CF_j^{sh1} \quad (1)$$

式中, CB_j^{sh} 表示第 j 种贝类贝壳的碳汇能力, 单位为 $g \cdot a^{-1}$; P_j^{sh} 表示第 j 种贝类的生物量(湿重), 单位为克每年($g \cdot a^{-1}$); K_j^{sh} 表示第 j 种贝类湿重与干重之间的转换系数, 即干重和湿重比值, 无量纲; R_j^{sh1} 表示第 j 种贝类干重状态下的贝壳干质量占比, 无量纲; CF_j^{sh1} 表示第 j 种贝类贝壳干质量下的含碳比率, 无量纲。

软体组织的碳汇能力计算公式:

$$CZ_j^{sh} = P_j^{sh} \times K_j^{sh} \times R_j^{sh2} \times CF_j^{sh2} \quad (2)$$

式中, CZ_j^{sh} 表示第 j 种类贝类软体组织的碳汇能力, 单位为 $g \cdot a^{-1}$; R_j^{sh2} 表示第 j 种贝类干重状态下的软体组织干质量占比, 无量纲; CF_j^{sh2} 表示第 j 种贝类软体组织干质量下的含碳比率, 无量纲。

贝类的总碳汇能力 $C_{shellfish}$ 计算公式:

$$C_{shellfish} = \sum (CB_j^{sh} + CZ_j^{sh}) \quad (3)$$

1.5 养殖贝类碳汇量(即生物质碳)评估方法

各海区海水养殖贝类碳汇量(以二氧化碳计)依据《养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法 碳储量变化法》(中华人民共和国自然资源部, 2021)进行计算, 以贝类总产量替代单位养殖面积的产量, 计算贝类成体收获的碳汇量(即生物质碳):

$$C_{BH} = W_{by} \times R_{adw} \times (R_{ash} \times C_{ash} + R_{am} \times C_{am}) \times 3.67$$

式中, C_{BH} 表示养殖贝类收获的碳汇量(以二氧化碳计), 单位为 t; W_{by} 表示养殖贝类总产量, 单位为 t; R_{adw} 表示贝类的干湿比; R_{ash} 表示贝类的贝壳质量比; C_{ash} 表示贝类贝壳含碳率; R_{am} 表示贝类的软体组织质量比; C_{am} 表示贝类软体部含碳率; 3.67 为碳和二氧化碳的转化系数。

1.6 统计分析方法

采用 SPSS 17.0 进行不同海域、不同种类贝类碳含量、碳汇能力及生物质碳汇量等显著性分析。使用 t 检验以确定贝类不同种类、规格、海域间的固碳能力及碳汇量等是否存在显著差异。通过计算均值、标准差等统计量来描述数据的集中趋势和离散程度, $P < 0.05$ 为差异显著水平, 并用 OriginPro 9.1 作图。

2 结果

2.1 烟台不同海域贝类养殖产量

2020—2022 年, 各个海区养殖贝类产量如图 1 所示, 其中, 龙口市海水养殖贝类年均产量为 $3.8 \times 10^4 t$;

牟平区海水养殖贝类年均产量为 $10.9 \times 10^4 \text{t}$; 长岛海水养殖贝类年均产量为 $26.6 \times 10^4 \text{t}$ 。在各养殖种类中, 牡

蛎养殖产量呈逐年上升趋势, 而扇贝和贻贝则有所下降。

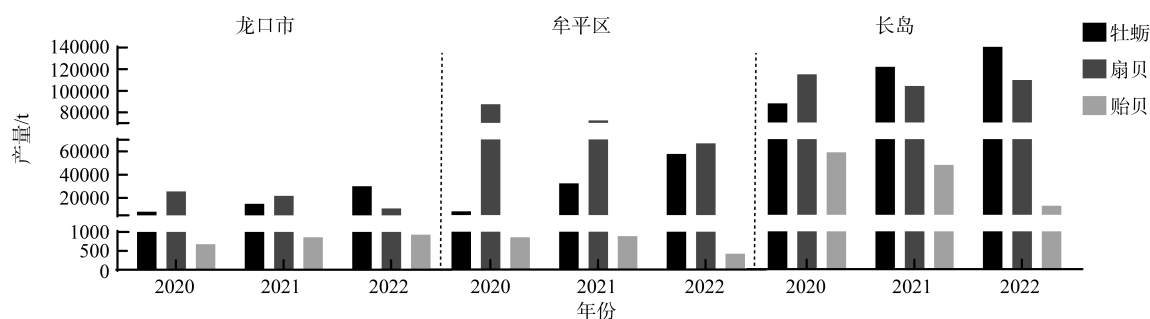


图1 2020—2022年烟台各海域养殖贝类产量

Fig. 1 Production of bivalves in different sea areas of Yantai from 2020 to 2022

2.2 贝类干湿重转换系数及含碳率

干湿重转换系数和含碳率是贝类碳汇核算的两个重要指标系数, 三个海域不同贝类干湿重转换系数及含碳率见表1, 各海区不同种类的干湿重转换系数分别为牡蛎73.21%~75.65%, 扇贝47.41%~55.84%, 贻贝53.95%~56.41%。随着个体的增大, 贝类的干湿重转

换系数差异并不显著($P>0.01$)。同时, 贝壳含碳率分别为牡蛎11.31%~12.43%, 扇贝12.90%~14.51%, 贻贝15.94%~17.17%, 而软体组织含碳率分别为牡蛎40.43%~45.57%, 扇贝36.99%~45.33%, 贻贝38.35%~43.33%。可以看出, 随着个体的增大, 各种贝类贝壳及软体组织的含碳率差异不显著($P>0.01$)。

表1 烟台海域贝类干湿转换系数及含碳率

Tab. 1 Dry-wet conversion coefficient and carbon content of bivalves cultivated in Yantai sea areas

贝类	体型	干湿重转换系数/%			贝壳含碳率/%			软体组织含碳率/%		
		龙口	牟平	长岛	龙口	牟平	长岛	龙口	牟平	长岛
牡蛎	大型	76.99	76.37	76.24	12.05	12.17	9.82	46.37	45.22	41.49
	中型	76.47	69.99	71.06	12.09	12.14	11.82	44.64	46.52	40.27
	小型	73.49	74.65	72.34	13.15	12.57	12.29	45.70	44.64	39.53
	平均值	75.65	73.63	73.21	12.43	12.29	11.31	45.57	45.46	40.43
扇贝	大型	53.34	45.61	54.70	14.33	15.13	12.80	41.93	46.83	37.87
	中型	53.36	47.27	52.21	14.28	14.40	13.05	41.88	45.67	36.13
	小型	60.83	49.34	56.26	13.26	14.00	12.84	43.69	43.48	36.97
	平均值	55.84	47.41	54.39	13.96	14.51	12.90	42.50	45.33	36.99
贻贝	平均值	-	56.41	53.95	-	17.17	15.94	-	43.33	38.35

注: 龙口、牟平牡蛎为长牡蛎; 长岛为褶牡蛎; 龙口、牟平扇贝为栉孔扇贝; 长岛为海湾扇贝; 贻贝为紫贻贝。

但不同种贝类之间, 其干湿重转换系数差异极显著($P<0.01$), 最高值为龙口海域长牡蛎为75.65%, 最低值为牟平的栉孔扇贝仅为47.41%。此外, 不同组织的含碳率亦有极显著的差异($P<0.01$), 软体组织含碳率显著高于贝壳含碳率(表1), 贝壳含碳率最高为牟平的贻贝(17.17%), 最低为长岛褶牡蛎(11.31%)。软体组织含碳率最高值为45.57%(牟平长牡蛎), 最低值为36.99%(长岛海湾扇贝)。

对于相同种类而言, 不同海域贝类的贝壳及软体组织含碳率均无显著差异; 而对于不同种类, 长牡蛎与褶牡蛎的贝壳含碳率无明显差异($P>0.05$), 但软体组织含碳率差异极显著($P<0.01$)。此外, 栉孔扇贝与海湾扇贝之间, 贝壳含碳率($P<0.05$)及软体组织含碳率

($P<0.01$)均具有显著性差异。牟平与长岛海区紫贻贝的贝壳及软体含碳率亦差异极显著($P<0.01$)。

2.3 固碳能力估算

牡蛎一般每年5—6月份放苗, 来年5月左右收获, 养殖周期12个月左右(按照1年计算)。而扇贝每年5月放苗, 当年10月左右收获, 养殖周期6个月左右(标准中规定: 不足一年按照1年计算)。贻贝生长周期为12个月左右(按照1年计算)。通过以上实测参数数据, 计算出龙口、牟平以及长岛三地海水养殖贝类的固碳能力(碳汇能力)(表2), 其中龙口海域大、中、小型长牡蛎的固碳能力介于 $3.37 \sim 16.64 \text{g} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{ind.}^{-1}$ (均值为 $9.44 \text{g} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{ind.}^{-1}$); 栉孔扇贝的固碳能力介于 $0.78 \sim 2.10 \text{g} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{ind.}^{-1}$ (均值为 $1.42 \text{g} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{ind.}^{-1}$)。牟平海域大、

中、小型长牡蛎的固碳能力介于 $3.88\sim15.73\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$ (均值为 $8.70\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$); 栉孔扇贝的固碳能力为 $0.21\sim1.53\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$ (均值为 $0.87\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$)。长岛海域大、中、小型褶牡蛎的固碳能力为 $2.87\sim$

$14.17\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$ (均值为 $7.75\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$); 海湾扇贝的固碳能力为 $0.87\sim1.58\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$ (均值为 $1.17\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$)。牟平、长岛海域贻贝的固碳能力分别为 0.38 和 $0.21\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$ 。

表 2 烟台海域贝类的固碳能力

Tab. 2 Carbon sequestration capacity of bivalves cultivated in Yantai sea areas

贝类	体型	贝壳固碳能力($\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$)			软体组织固碳能力($\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$)			总固碳能力($\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind.}^{-1}$)		
		龙口	牟平	长岛	龙口	牟平	长岛	龙口	牟平	长岛
牡蛎	大型	16.12	15.14	13.82	0.52	0.59	0.35	16.64	15.73	14.17
	中型	7.92	5.98	5.83	0.39	0.50	0.37	8.31	6.48	6.20
	小型	3.23	3.69	2.74	0.14	0.19	0.13	3.37	3.88	2.87
	平均值	9.09	8.27	7.46	0.35	0.43	0.28	9.44	8.70	7.75
扇贝	大型	1.54	0.76	1.12	0.56	0.77	0.46	2.10	1.53	1.58
	中型	1.00	0.43	0.86	0.37	0.44	0.23	1.37	0.86	1.08
	小型	0.66	0.14	0.74	0.12	0.07	0.13	0.78	0.21	0.87
	平均值	1.07	0.44	0.91	0.35	0.43	0.27	1.42	0.87	1.17
贻贝	平均值	-	0.29	0.20	-	0.09	0.01	-	0.38	0.21

由表 2 可见, 不同贝类的固碳能力差别巨大, 牡蛎的固碳能力远高于扇贝和贻贝($P<0.001$)。其中贝壳的固碳能力显著高于软体组织($P<0.001$), 是贝类碳汇的主要贡献者(占贝类生物体总碳汇能力的 $70.9\%\sim97.5\%$)(图 2)。尤其值得注意的是, 随着贝类个体的增大, 其固碳能力增强极显著($P<0.001$)。

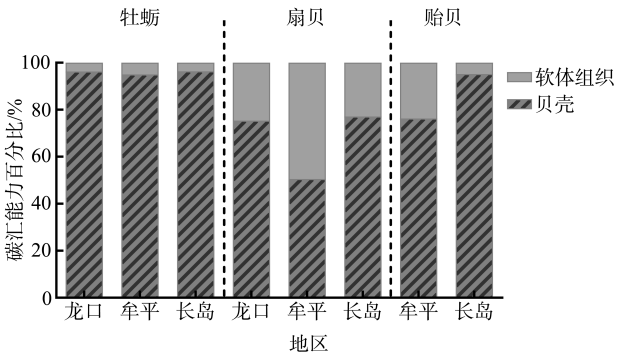


图 2 不同贝类贝壳及软体组织的固碳能力占比
Fig. 2 Percentages of shells and soft tissues carbon sequestration capacity in bivalves

对于相同贝类来讲, 不同海域牡蛎或扇贝的固碳能力均无显著差异, 即长牡蛎与褶牡蛎($P>0.05$)、栉孔扇贝与海湾扇贝($P>0.05$)的总固碳能力无显著差异。虽然长岛与牟平海域贻贝的固碳能力差异极显著($P<0.01$), 但两地贻贝的采样时间相差 5 个月, 实际上反映了不同生长时期、不同个体大小贻贝的固碳能力差别。可见, 贝类固碳能力受种类、个体大小影响因素较大, 尤其是随着贝类的增长, 其固碳能力显著增强, 与不同海域地理位置相关性不强。

此外, 基于碳含量与质量比等各参数实测值与《海洋碳汇核算方法》中标准参数参考值(以下简称

标准参考值)进行贝类碳汇能力估算比较发现(图 3), 长牡蛎与扇贝的固碳能力实测值与标准参考估算值差异极显著($P<0.01$)。紫贻贝与褶牡蛎的采样时间均为分笼生长中期, 其个体大小属中等及偏下, 因此其固碳能力实测值偏低, 与标准参考值估算值间差异不显著。

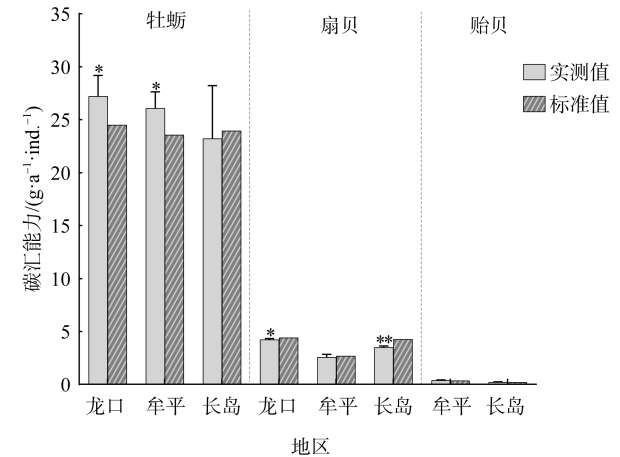


图 3 不同贝类固碳能力比较
*代表差异显著 $P<0.05$; **代表差异极显著 $P<0.01$
Fig. 3 Comparison of carbon sequestration capacity in different bivalves (*: significance level at $P<0.05$; **: significance level at $P<0.01$)

2.4 生物质碳汇量估算

根据公式 (4) 计算 2022 年烟台三个海区养殖贝类的碳汇量, 实测值基于本文实际测量的各参数值, 而标准值基于《海洋碳汇核算方法》(中华人民共和国自然资源部, 2022)提供的各参数的标准参考值(表 3)。其中, 实测值中各种大、中、小型规格的贝类产量按实际比例进行计算, 总产量不变。经过计算, 各海域碳汇量实测值与标准估算值如图 4 所示。

表 3 贝类质量比的实测值及标准参考值比较

Tab. 3 The measured and standard reference values of mass ratio of bivalves

贝类	体型	软体组织质量分数实测值/%			软体组织质量分数 标准参考值/%	贝壳质量分数实测值/%			贝壳质量分数 标准参考值/%
		龙口	牟平	长岛		龙口	牟平	长岛	
牡蛎	大型	4.36	4.98	3.34	6.14	95.64	95.02	96.66	93.86
	中型	5.73	7.47	6.93		94.27	92.53	93.07	
	小型	5.69	5.41	6.65		94.31	94.59	93.35	
	平均值	5.26	5.95	5.64		94.74	94.05	94.36	
扇贝	大型	13.13	19.40	11.74	14.35	86.87	80.60	88.26	85.65
	中型	12.34	18.96	9.40		87.66	81.04	90.60	
	小型	8.46	13.67	7.37		91.54	86.33	92.63	
	平均值	11.31	17.34	9.50		88.69	82.66	90.50	
贻贝	平均值	-	13.61	5.31	8.47	-	86.39	94.69	91.53

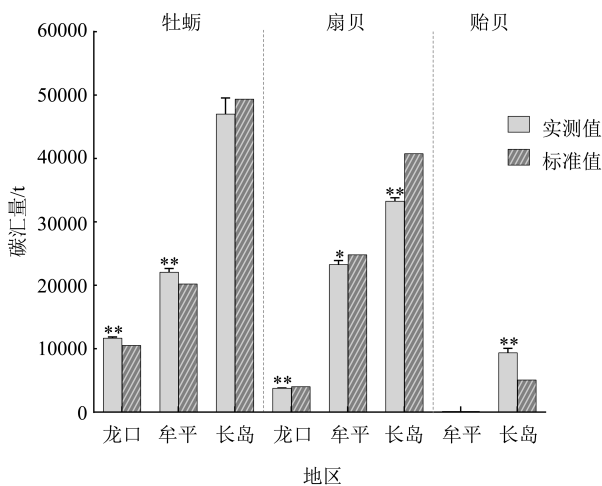


图 4 2022 年烟台海域养殖贝类的生物质碳汇总量比较

*表示差异显著, $P<0.05$; **表示差异极显著, $P<0.01$ Fig. 4 Comparison of total amount of carbon sinks of cultivated bivalves in Yantai sea areas in 2022 (* significance level at $P<0.05$; ** significance level at $P<0.01$)

可以看出, 贝类碳汇总量实测值与依据标准参数估算值之间存在显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)差异, 尤其是长牡蛎与贻贝的碳汇量实测值显著高于标准估算值(长岛海域褶牡蛎除外), 而扇贝的碳汇量实测值显著低于标准估算值, 表明贝类碳汇量的准确核算受贝类的种类、个体大小及组织质量比(通常认为的饱满度)等因素的显著影响。因此, 在实际工作中碳汇量需根据当地养殖贝类的种类与大小实际情况进行测定与核算。

3 讨论

3.1 贝类碳汇能力差异及其影响因素

贝类碳汇能力指贝类从空气或海水中吸收并固定二氧化碳的过程、活动、机制和能力(中华人民共和国自然资源部, 2021, 2022)。由于贝类养殖周期长、活动复杂, 对固碳等关键过程和机理认知不足, 因此贝类碳汇一直存在争议(Bertolini et al, 2021; 中华人民共和国自然资源部, 2021, 2022; 蒋增杰 等, 2022)。本文基于碳储量法比较分析了烟台不同海域主要养殖贝类的固碳能力, 发现不同种贝类的固碳能力差别巨大, 如牡蛎的固碳能力远远高于扇贝和贻贝; 对于具体品种来说, 长牡蛎的固碳能力大于褶牡蛎, 栉孔扇贝固碳能力大于海湾扇贝, 而不同海域同种贝类的固碳能力差异并不显著, 说明贝类碳汇能力主要与种类有关, 与不同海区养殖环境的相关性并不显著, 这一结果与其他研究结论相一致(周毅 等, 2002; 张先基, 2013)。虽然所测贝类贝壳间和软体组织间的含碳量差异不显著, 但每种贝类的固碳能力却存在较大差异, 主要由于贝类具有的生物学特性差异, 形成的贝壳与软体组织占生物体的比例(即壳-体质量比)具有较强的种属特异性(刘超, 2016; 罗渡 等, 2018), 而贝壳的碳汇能力又远高于软体组织, 因此每种贝类固定的碳量不同, 即各种贝类实现碳汇的能力存在差别。种类差异性是贝类碳汇能力的首要影响因素。

此外值得注意的是, 随着贝类个体的增大, 其固碳能力显著增强, 个体大小对贝类固碳能力具有极显著的影响。本研究中, 除紫贻贝外, 其他贝类均为同一批养殖产品中不同大小规格的样品, 养殖时间与环境完全相同, 而固碳能力相差 2~5 倍, 表征上与贝壳、软体组织的占比及干湿比重有关, 个体越大, 贝壳占比越大, 其固定的碳越多。据此推理, 不同个体大小可以对应不同生长时期的贝类, 即随着生长时间增加贝类个体增大, 其碳汇能力即固碳量也随之增加。本研究中长岛海域紫贻贝体长介于 2.5~3.0cm, 采自 2023 年 12 月中旬, 牟平海域紫贻贝(体长约 4.0~4.5cm)采自 2024 年 3 月中旬, 分别代表不同生长时期的贝类。后期大个体贻贝的固碳能力($0.38\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind}^{-1}$)显著高于前期小个体贻贝固碳能力($0.21\text{g}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{ind}^{-1}$), 反映不同生长时期的差异性。究其原因在于贝类的异速生长特性, 不同生长阶段各组织各指标的不等速生长(于宗赫 等,

2010; 许瀚之 等, 2022), 如生长初期贝壳生长较快, 软体组织生长相对滞后, 而到了繁殖期软体组织生长明显加快; 如褶牡蛎在一龄阶段生长最快, 大小基本定型, 而栉孔扇贝在一、二、三龄生长都较快, 随着种类、年龄、性别及环境条件的变化而不同(王俊 等, 2001; Charrier et al, 2013)。可见, 不同生长时期对贝类固碳能力具有重要影响。因此, 研究不同时期贝类个体大小、生长规律及其固碳能力, 有助于进一步完善贝类碳汇计算模型的指标参数、精确评估与合理开发利用海水养殖贝类碳汇价值。

3.2 贝类碳汇量核算

由于具有经济和生态双重价值, 养殖贝类碳汇受到广泛关注(Nelson et al, 2004; 张继红 等, 2013; 唐启升 等, 2022; 蒋增杰 等, 2022; 尹钰文 等, 2022)。其中, 碳汇量的准确核算是碳汇交易的首要环节。碳汇量指一个养殖周期内从养殖开始到养殖结束时贝类碳储量的增加量, 通常以二氧化碳计量。本文主要聚焦四个碳库中的“移出碳”, 即贝类通过生长发育吸收海水中的 CO_2 形成壳体, 将其中的有机碳与无机碳固定在其组织中, 并通过收获的方式移出海水, 这种方式被认为是最有效的固碳方式之一(郭波, 2015)。目前普遍基于碳储量变化原理(中华人民共和国自然资源部, 2022)对养殖贝类碳汇进行核算, 选取的指标主要包括贝壳固碳、软体组织固碳及生物沉积物固碳, 有的也将附着生物碳汇考虑在内(温瑞, 2021)。然而由于生物沉积物通量受环境条件影响, 其精确计量难度较大, 同时数据获取有一定难度, 因此尽管其固碳贡献比重较大, 当前大多贝类碳汇核算仍只选择贝壳及软体组织碳汇进行计量(即移出库)(岳冬冬 等, 2012; 齐占会 等, 2012; 顾波军 等, 2021; 贺加贝 等, 2022; 张麋鸣 等, 2022), 忽略了生物沉积碳汇, 会大大低估养殖贝类碳汇的真实水平。已有研究表明, 生物沉积固碳潜力巨大, 如桑沟湾内养殖扇贝每年有 $8.71 \times 10^4 \text{t}$ 碳被沉降到沉积物界面, 是呼吸和钙化放出碳的 6.7 倍(张明亮 等, 2011), 其碳汇功能堪比贝类贝壳与软体组织固碳能力之和(温瑞, 2021)。而且生物沉积产生的碳汇效应具有更

长的时间尺度, 对减缓全球变暖和降低大气中二氧化碳浓度具有更长期的影响(胡田 等, 2024)。另一方面沉积物乃至附着生物固碳形式的计算方法还没有统一的标准, 计量方法与标准体系相对更加薄弱, 存在较多不完善之处, 支撑数据的系统性和科学性亟需提升(蒋增杰 等, 2022), 后期还需继续针对生物沉积固碳计量模型的不足进行补充与完善。

我国海水养殖贝类碳汇潜力巨大, 且不同地区差异较大, 其中山东省、福建省、广东省、辽宁省为海水养殖贝类碳汇量最大的四个省份, 实际上也是贝类养殖产量最多的省份(岳冬冬 等, 2012)。依据目前碳汇计量方法学的指标参数, 提高贝类单位面积的生产效率或产量是扩增贝类碳汇的首要途径(张继红 等, 2013)。此外, 在养殖容量一定的情况下, 依据不同贝类碳汇能力调整养殖结构, 增加高固碳能力品种如牡蛎、贻贝、螺、蛤等贝类的养殖(齐占会 等, 2012; 张麋鸣 等, 2022), 不仅可以丰富养殖产品的类型, 增加经济收入, 对贝类碳汇量的提升具有重要意义, 还可以带来经济与碳汇生态双重效益。从碳汇渔业的角度来看, 着重推广以贝类、藻类为代表的高生长速率、高固碳能力的养殖种类, 调整优化水产养殖结构与密度, 降低养殖对环境的影响, 从而保持贝类增养殖体系的良好生态环境, 不仅能最大限度地发挥其碳汇功能, 同时也可以有效促进渔业的可持续发展。

4 结论

本文基于碳储量变化原理对烟台市不同海域养殖贝类的固碳能力及生物质碳汇量进行实际核算, 结果表明, 不同种类养殖贝类固碳能力差别巨大, 以长牡蛎固碳能力最强, 褶牡蛎其次, 扇贝第三, 紫贻贝最弱; 种类差异性为贝类碳汇能力的首要影响因素, 与不同海域、养殖环境相关性不强。此外, 随着贝类个体增大其固碳能力显著增强, 反映了不同大小、不同生长时期贝类碳汇能力的巨大差异, 与贝类的异速生长特性相关。本研究揭示了贝类碳汇核算过程的复杂性, 相关结果对于完善贝类碳汇计算模型的指标参数, 精确评估与合理开发我国海水养殖贝类碳汇具有重要指导意义。

参考文献 References

- 公丕海, 李娇, 关长涛, 等, 2014. 莱州湾增殖礁附着牡蛎的固碳量试验与估算[J]. 应用生态学报, 25(10): 3032–3038.
GONG PIHAI, LI JIAO, GUAN CHANGTAO, et al, 2014. Estimation and experiment of carbon sequestration by oysters attached to the enhancement artificial reefs in Laizhou Bay,

- Shandong, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 25(10): 3032–3038 (in Chinese with English abstract).
顾波军, 朱梓豪, 2021. 浙江省海水贝藻养殖碳汇能力测算及时空演化[J]. 中国渔业经济, 39(6): 88–95. GU BOJUN, ZHU ZIHAO, 2021. An estimation of carbon sink capacity of

- shellfish and algae culture and its spatio-temporal evolution in Zhejiang Province[J]. Chinese Fisheries Economics, 39(6): 88–95 (in Chinese with English abstract).
- 郭波, 2015. 中国海水贝藻养殖碳汇潜力的评估研究[J]. 现代农业科技, (19): 226–228. GUO BO, 2015. Study on assessment of carbon sequestration potential of marine shellfish culture in China[J]. Modern Agricultural Science and Technology, (19): 226–228 (in Chinese with English abstract).
- 贺加贝, 孙俊荣, 赵强, 等, 2022. 烟台市贝藻养殖的碳汇贡献及能力评价[J]. 海洋湖沼通报, 44(3): 117–122. HE JIABEI, SUN JUNRONG, ZHAO QIANG, et al, 2022. Contribution and ability assessments of carbon sink by marine bivalves and seaweeds in Yantai coastal water[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 44(3): 117–122 (in Chinese with English abstract).
- 胡田, 苏洁, 邵魁双, 等, 2024. 贝藻养殖碳汇过程、机制与增汇模式研究进展[J]. 水产科技情报, 51(3): 194–200. HU TIAN, SU JIE, SHAO KUIHUANG, et al, 2024. Research progress on carbon sequestration process, mechanism and sequestration mode of shellfish and algae culture[J]. Fisheries Science & Technology Information, 51(3): 194–200 (in Chinese with English abstract).
- 姜妮妮, 房景辉, 蔺凡, 等, 2022. 胶州湾菲律宾蛤仔生态容量评估及其碳汇功能[J]. 渔业科学进展, 43(5): 61–71. JIANG WEIWEI, FANG JINGHUI, LIN FAN, et al, 2022. Evaluation of ecological carrying capacity and functions of Manila clam, *Ruditapes philippinarum* in Jiaozhou Bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 43(5): 61–71 (in Chinese with English abstract).
- 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. JIANG ZENGJIE, FANG JIANGUANG, MAO YUZE, et al, 2022. Research progress on the carbon sink function of filter-feeding shellfish mariculture and future scientific issues[J]. Progress in Fishery Sciences, 43(5): 106–114 (in Chinese with English abstract).
- 李成林, 宋爱环, 胡炜, 等, 2011. 山东省扇贝养殖产业现状分析与对策[J]. 海洋科学, 35(3): 92–98. LI CHENGLIN, SONG AIHUAN, HU WEI, et al, 2011. Status analyzing and developing counter-measure of cultured scallop industry in Shandong Province[J]. Marine Sciences, 35(3): 92–98 (in Chinese with English abstract).
- 刘超, 2016. 华贵栉孔扇贝不同群体遗传差异分析及生长相关标记筛选[D]. 湛江: 广东海洋大学. LIU CHAO, 2016. Genetic variation analysis and screening of microsatellite markers associated with growth traits in *Chlamys nobilis reeve*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University (in Chinese with English abstract).
- 罗渡, 汪学杰, 徐猛, 等, 2018. 贝类壳-体质量比和静水沉降特性的相关性[J]. 生态学报, 38(18): 6778–6785. LUO DU, WANG XUEJIE, XU MENG, et al, 2018. Correlation between shell-body mass ratio and hydrostatic settling characteristics of mollusc species[J]. Acta Ecologica Sinica, 38(18): 6778–6785 (in Chinese with English abstract).
- 聂梦晨, 黄翠玲, 隋琪, 等, 2022. 桑沟湾沉积物有机质的碳氮稳定同位素分析及其来源解析[J]. 渔业科学进展, 43(5): 84–97. NIE MENGCHEN, HUANG CUILING, SUI QI, et al, 2022. Carbon and nitrogen stable isotope analysis and source identification of organic matter in sediments of Sanggou Bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 43(5): 84–97 (in Chinese with English abstract).
- 齐占会, 王珺, 黄洪辉, 等, 2012. 广东省海水养殖贝藻类碳汇潜力评估[J]. 南方水产科学, 8(1): 30–35. QI ZHANHUI, WANG JUN, HUANG HONGHUI, et al, 2012. Potential assessment of carbon sink capacity by marine bivalves and seaweeds in Guangdong Province[J]. South China Fisheries Science, 8(1): 30–35 (in Chinese with English abstract).
- 任黎华, 2014. 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[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所). REN LIHUA, 2014. Research on carbon sequestration of cultured oyster *Crassostrea gigas* and its fouling organisms in Sanggou Bay[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- 唐启升, 方建光, 张继红, 等, 2013. 多重压力胁迫下近海生态系统与多营养层次综合养殖[J]. 渔业科学进展, 34(1): 1–11. TANG QISHENG, FANG JIANGUANG, ZHANG JIHONG, et al, 2013. Impacts of multiple stressors on coastal ocean ecosystems and integrated multi-trophic aquaculture[J]. Progress in Fishery Sciences, 34(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- 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. TANG QISHENG, JIANG ZENGJIE, MAO YUZE, 2022. Clarification on the definitions and its relevant issues of fisheries carbon sink and carbon sink fisheries[J]. Progress in Fishery Sciences, 43(5): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- 王俊, 唐启升, 2001. 双壳贝类能量学及其研究进展[J]. 海洋水产研究, 22(3): 80–83. WANG JUN, TANG QISHENG, 2001. Advancements in studies on energy budget of bivalve molluscs[J]. Progress in Fishery Sciences, 22(3): 80–83 (in Chinese with English abstract).
- 温瑞, 2021. 养殖贝类固碳计量与价格核算及对策研究[D]. 厦门: 自然资源部第三海洋研究所. WEN RUI, 2021. Research on the measurement and price accounting of carbon sequestration of cultured shellfish and countermeasures[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources(in Chinese with English abstract).
- 徐晓莹, 史文凯, 贺加贝, 等, 2023. 山东省贝藻养殖碳汇能力评估[J]. 中国渔业经济, 41(1): 64–70. XU XIAOYING, SHI WENKAI, HE JIABEI, et al, 2023. Evaluation of carbon sink capacity of shellfish and algae in Shandong Province[J]. Chinese Fisheries Economics, 41(1): 64–70 (in Chinese with English abstract).
- 许瀚之, 张华, 熊盼盼, 等, 2022. 马氏珠母贝异速生长个体对免疫刺激的差异响应[J]. 热带海洋学报, 41(5): 180–188. XU

- HANZHI, ZHANG HUA, XIONG PANPAN, et al, 2022. Differential responses of allometric individuals to immune stimuli in *Pinctada fucata martensii*[J]. Journal of Tropical Oceanography, 41(5): 180–188 (in Chinese with English abstract).
- 尹钰文, 车鉴, 魏海峰, 等, 2022. 辽宁省 2010-2019 年海水养殖贝类碳汇能力评估[J]. 海洋开发与管理, 39(9): 17–23.
- YIN YUWEN, CHEN JIAN, WEI HAIFENG, et al, 2022. Carbon sink capacity assessment of mariculture shellfish and algae in Liaoning Province from 2010 to 2019[J]. Ocean Development and Management, 39(9): 17–23 (in Chinese with English abstract).
- 于宗赫, 陈康, 杨红生, 等, 2010. 海州湾前三岛海域栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 生长特征与养殖容量的评估[J]. 海洋与湖沼, 41(4): 563–570.
- YU ZONGHE, CHEN KANG, YANG HONGSHENG, et al, 2010. The carrying capacity of scallop *Chlamys farreri* in suspended culture in Qiansan islets, Haizhou Bay[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 41(4): 563–570 (in Chinese with English abstract).
- 岳冬冬, 王鲁民, 2012. 我国海水养殖贝类产量与其碳汇的关系[J]. 江苏农业科学, 40(11): 246–248 (in Chinese).
- 张波, 唐启升, 2022. 中国近海渔业生物捕捞群体碳汇评估[J]. 渔业科学进展, 43(5): 126–131.
- ZHANG BO, TANG QISHENG, 2022. Carbon sink assessment for capture stock in China coastal ocean[J]. Progress in Fishery Sciences, 43(5): 126–131 (in Chinese with English abstract).
- 张继红, 方建光, 唐启升, 等, 2013. 桑沟湾不同区域养殖栉孔扇贝的固碳速率[J]. 渔业科学进展, 34(1): 12–16.
- ZHANG JIHONG, FANG JIANGUANG, TANG QISHENG, et al, 2013. Carbon sequestration rate of the scallop *Chlamys farreri* cultivated in different areas of Sanggou Bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 34(1): 12–16 (in Chinese with English abstract).
- 张麋鸣, 颜金培, 叶旺旺, 等, 2022. 福建省贝类养殖碳汇及其潜力评估[J]. 应用海洋学学报, 41(1): 53–59.
- ZHANG MIMING, YAN JINPEI, YE WANGWANG, et al, 2022. Carbon sequestration and its potentiality of marine shellfish and seaweed cultures in Fujian Province, China[J]. Journal of Applied Oceanography, 41(1): 53–59 (in Chinese with English abstract).
- 张明亮, 邹健, 毛玉泽, 等, 2011. 养殖栉孔扇贝对桑沟湾碳循环的贡献[J]. 渔业现代化, 38(4): 13–16, 31.
- ZHANG MINGLIANG, ZOU JIAN, MAO YUZE, et al, 2011. Contribution of culturing scallop to carbon cycle in Sanggou Bay[J]. Fishery Modernization, 38(4): 13–16, 31 (in Chinese with English abstract).
- 张先基, 2013. 基于 XRF 测碳技术的中国海水贝类养殖碳汇研究[D]. 大连: 辽宁师范大学.
- ZHANG XIANJI, 2013. A research of carbon sink based on the technology of XRF measuring carbon for marine culture of shellfish in China[D]. Dalian: Liaoning Normal University (in Chinese with English abstract).
- 中华人民共和国自然资源部, 2021. HY/T 0305-2021 养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法 碳储量变化法[S]. 北京: 中国标准出版社. Ministry of Natural Resources, People's Republic of China, 2021a. HY/T 0305-2021 Estimation method of maricultural seaweed and bivalve carbon sink—carbon stock variation method[S]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese).
- 中华人民共和国自然资源部, 2022. HY/T0349-2022 海洋碳汇核算方法[S]. 北京: 中国标准出版社. Ministry of Natural Resources, People's Republic of China, 2022. HY/T0349-2022 Accounting methods for ocean carbon sink[S]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese).
- 周毅, 杨红生, 刘石林, 等, 2002. 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, 26(1): 21–27.
- ZHOU YI, YANG HONGSHENG, LIU SHILIN, et al, 2002. Chemical composition and net organic production of cultivated and fouling organisms in Sishili Bay and their ecological effects[J]. Journal of Fisheries of China, 26(1): 21–27 (in Chinese with English abstract).
- BAUER J E, CAI WEIJUN, RAYMOND P A, et al, 2013. The changing carbon cycle of the coastal ocean[J]. Nature, 504 (7478): 61–70.
- BERTOLINI C, BERNARDINI I, BRIGOLIN D, et al, 2021. A bioenergetic model to address carbon sequestration potential of shellfish farming: example from *Ruditapes philippinarum* in the Venice lagoon[J]. ICES Journal of Marine Science, 78(6): 2082–2091.
- CHARRIER M, MARIE A, GUILLAUME D, et al, 2013. Soil calcium availability influences shell ecophenotype formation in the sub-Antarctic land snail, *Notodiscus hookeri*[J]. PLoS One, 8(12): e84527.
- DUARTE C M, LOSADA I J, HENDRIKS I E, et al, 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation[J]. Nature Climate Change, 3(11): 961–968.
- HUMPHREYS M P, DANIELS C J, WOLF-GLADROW D A, et al, 2018. On the influence of marine biogeochemical processes over CO₂ exchange between the atmosphere and ocean[J]. Marine Chemistry, 199: 1–11.
- NELSON K A, LEONARD L A, POSEY M H, et al, 2004. Using transplanted oyster (*Crassostrea virginica*) beds to improve water quality in small tidal creeks: a pilot study[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 298(2): 347–368.
- TAMBURINI E, TUROLLO E, LANZONI M, et al, 2022. Manila clam and Mediterranean mussel aquaculture is sustainable and a net carbon sink[J]. Science of the Total Environment, 848: 157508.
- TANG QISHENG, ZHANG JIHONG, FANG JIANGUANG, 2011. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems[J]. Marine Ecology Progress Series, 424: 97–104.