

珠海外伶仃海洋牧场春季渔业资源生物碳储量初探

魏文迪^{1,2}, 冯雪², 袁华荣², 黎小国², 陈丕茂^{2,3}

1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306
2. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部海洋牧场重点实验室/国家数字渔业(海洋牧场)创新分中心/中国水产科学研究院海洋牧场技术重点实验室/农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站/广东省海洋休闲渔业工程技术研究中心, 广东广州 510300
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海 519082

摘要: 海洋牧场是碳汇渔业的重要组成部分。为评估海洋牧场不同功能区的渔业资源生物储碳情况, 利用珠海外伶仃海洋牧场春季拖网调查数据分析渔业资源现状, 对渔业资源生物碳含量进行测定, 并估算海洋牧场渔业资源生物碳储量。结果显示, 珠海外伶仃海洋牧场春季渔业资源生物量为 4 505.48 kg, 资源密度为 458.34 kg·km⁻², 资源密度对比对比区高 23.34%。硬骨鱼纲的渔业资源生物湿样含碳率为 6.53%~17.02%, 软骨鱼纲为 8.55%~10.19%, 甲壳纲为 6.70%~11.84%, 头足纲为 6.48%~9.89%, 双壳纲为 27.04%~27.39%。珠海外伶仃海洋牧场渔业资源生物碳储量为 495.63 kg, 碳密度为 50.42 kg·km⁻², 碳密度对比对比区高 46.40%; 碳密度排序为: 增殖放流区>新人工鱼礁区>旧人工鱼礁区>对比区。初步分析认为, 应根据不同渔业资源生物含碳率的差异性, 通过投放人工鱼礁、增殖放流等手段调整渔业资源结构, 提高海洋牧场的储碳能力。

关键词: 海洋牧场; 碳含量; 碳储量; 渔业资源; 外伶仃

中图分类号: S 931.4

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Preliminary study on biological carbon storage of fishery resources in Zhuhai Wailingding marine ranching in spring

WEI Wendi^{1,2}, FENG Xue², YUAN Huarong², LI Xiaoguo², CHEN Pimao^{2,3}

1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China
2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of Marine Ranching, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/National Digital Fisheries (Marine Ranching) Innovation Sub-Center/Key Laboratory of Marine Ranching Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environments, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Engineering Technology Research Center of Marine Recreational Fishery, Guangzhou 510300, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: Marine ranching is an important component of carbon sink fisheries. In order to assess the biological carbon storage of fishery resources in different functional areas of marine ranching, based on the trawl survey data from the Zhuhai Wailingding marine ranching in spring, we analyzed the current status of fishery resources, measured the biological carbon content of

收稿日期: 2024-01-25; 修回日期: 2024-03-07

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)资助项目(SML2023SP237); 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111030002); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2023TD06); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2021SD02)

作者简介: 魏文迪(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋牧场生态修复。E-mail: 2483098156@qq.com

通信作者: 陈丕茂(1969—), 男, 研究员, 研究方向为海洋牧场与海洋生态修复。E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn

fishery resources, and estimated the biological carbon storage of fishery resources in the marine ranching. The results show that the biomass of fishery resources in spring was 4 505.48 kg; the resource density was 458.34 kg·km⁻², which was 23.34% higher than that in the contrast area; the carbon content of wet biological samples in fishery resources was 6.53%–17.02% for Osteichthya, 8.55%–10.19% for Chondrichthya, 6.70%–11.84% for Crustacea, 6.48%–9.89% for Cephalopoda, and 27.04%–27.39% for Bivalva; the biological carbon storage of fishery resources of the marine ranching was 495.63 kg; the carbon density was 50.42 kg·km⁻², which was 46.40% higher than that in the contrast area; the carbon density followed a descending trend of stock enhancement area>new artificial reef area>original artificial reef area>contrast area. It is preliminarily suggest that according to the differences in biological carbon content among different fishery resources, the carbon storage capacity of marine ranching could be improved by adjusting the structure of fishery resources through artificial reefs, stock enhancement and other means.

Keywords: Marine ranching; Carbon content; Carbon storage; Fishery resources; Wailingding

海洋储存了地球上约 93% 的二氧化碳 (CO₂)^[1], 海洋碳汇是缓解全球气候变暖、促进人类社会可持续发展的重要手段^[2-3]。充分开发利用海洋碳汇功能, 对我国“双碳”目标的顺利实现意义重大^[4]。目前海洋碳汇研究已成为碳汇研究的热点^[5-6]。碳汇渔业是海洋实现储碳、增汇的重要表现形式^[7], 海洋牧场因建立人工鱼礁、增殖特定物种、养护渔业资源等特点^[8], 成为碳汇渔业的重要组成部分^[9]。

我国的海洋牧场建设已形成了一定规模, 2015—2022 年, 已建立国家级海洋牧场示范区 169 个, 用海面积超过 3 000 km², 但海洋牧场储碳方面的研究较少。李纯厚等^[10]通过水体中叶绿素的含量, 评估了大亚湾海洋牧场的碳汇潜力; 沈新强等^[11]根据长江口人工构建牡蛎礁的跟踪监测数据, 分析了牡蛎礁的恢复潜力和碳储量; 虞宝存和梁君^[12]基于海洋牧场的建设形式, 探讨了海洋牧场的贝藻类应用模式和碳汇功能; 李娇等^[13]基于礁区主要生物的储碳机理, 初步分析了人工鱼礁生态系统的碳汇机理及潜能; 公丕海^[14]针对刺参 (*Apostichopus japonicus*) 和附着牡蛎, 评估了海洋牧场中海珍品的碳储量和储碳价值; 马欢等^[15]在测定分析南海柘林湾海洋牧场生物器官碳含量的基础上估算了海洋牧场海洋生物的碳储量; 崔晨^[16]从河北唐山祥云湾海洋牧场生物、水体、沉积 3 个方面, 初步研究了海洋牧场的碳汇功能、碳储量和储碳价值, 但尚未见针对海洋牧场不同功能区的渔业资源生物储碳情况的研究报道。

广东省珠海市外伶仃海域海洋牧场示范区地处珠海市万山群岛海域, 入选了第四批国家级海洋牧场示范区 (农业农村部公告第 115 号)^[17], 此海洋牧场尚未开展过储碳相关研究。本研究基于 2023 年春季珠海外伶仃海洋牧场渔业资源调查, 结合渔业

资源生物碳含量测定, 对珠海外伶仃海洋牧场渔业资源生物的碳密度、碳储量进行估算, 以期为我国海洋牧场碳汇能力的提升提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

珠海外伶仃海洋牧场调查范围为 114°02'E—114°06'E、22°05'N—22°07'N, 面积为 9.83 km²。海洋牧场 (M) 分为 3 个功能区, 分别为: 旧人工鱼礁区 (A), 海域面积 1.96 km², 已建造并投放礁体 1 781 个, 礁类型为钢筋混凝土结构, 于 2007 年投礁, 2009 年完工; 新人工鱼礁区 (B), 海域面积为 1.5 km², 建造投放礁体 1 156 个, 礁类型为钢筋混凝土结构, 于 2022 年投礁, 2023 年完工; 增殖放流区 (C)。对比区 (D) 设置于距离海洋牧场东边线约 3.71 km 的海域 (图 1)。地图数据来源于全国地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/>, 1:25 万全国基础地理数据库, 2017 公众版)。

1.2 资源调查

2023 年 3 月对珠海外伶仃海洋牧场和对比区开展调查, 共布设 12 个站位, 其中海洋牧场区 9 个、对比区 3 个 (图 1)。调查船为“粤东莞渔 92008”拖网渔船, 主机功率为 143.0 kW、船长 21.68 m、船宽 5.8 m、总吨位 118 t, 拖网上纲为 36 m、下纲为 41 m、网囊目为 30 mm; 每个站位拖网时长为 30 min、平均拖速为 2.5 kn。调查采样和渔获物分析均按 GB/T 12763.6—2007《海洋调查规范 海洋生物调查》中的方法进行。经现场实测, 海洋牧场 (M) 中的 A、B、C 区水深分别介于 25.0~27.3 m、25.0~28.0 m、24.5~25.6 m, 对比区 (D) 水深介于 26.8~27.5 m。

1.3 碳含量样品处理

参考崔晨^[16]、李梦迪^[18]的研究方法, 将珠海

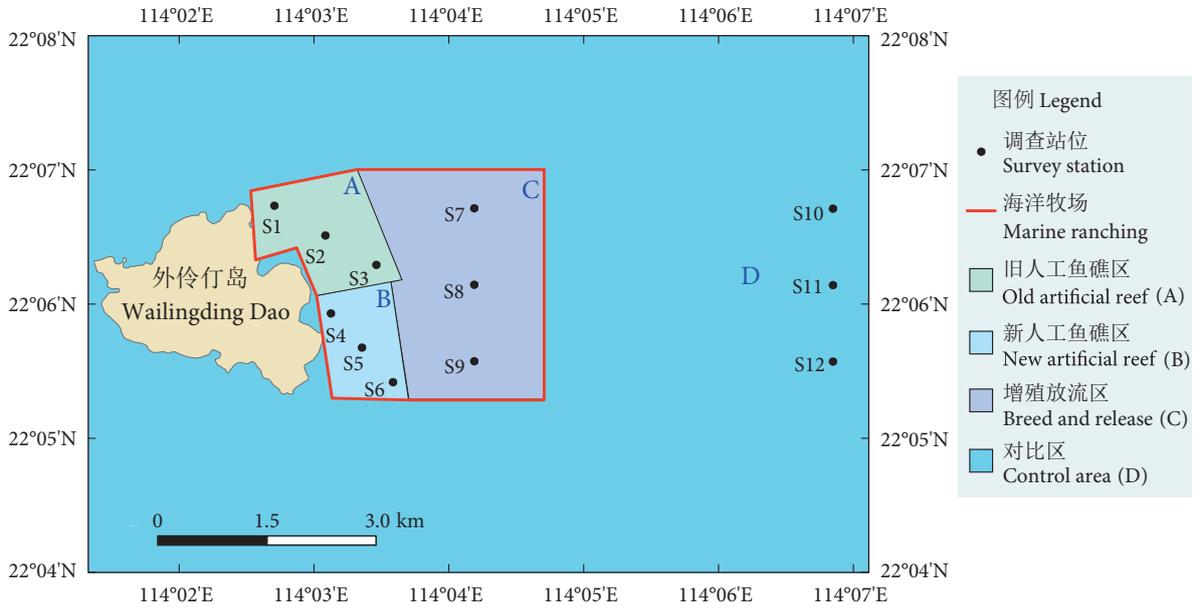


图1 珠海外伶仃海洋牧场调查站位分布

Fig. 1 Survey stations in Zhuhai Wailingding marine ranching

外伶仃海洋牧场渔业资源调查捕获的生物按不同区域分为 A、B、C、D 共 4 组, 组内每种渔获物按生物个体检测其干样碳含量。样品处理方法如下: 先将物种表面清理干净并测其湿质量; 再将样品粉碎均匀后, 于 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 立式冷冻干燥机 (LGJ-18) 冷冻干燥 48 h 至恒质量, 称量其干质量; 将样品用全自动样品快速研磨仪 (Tissuelyser-24) 研磨成粉末状, 使用 Vario EL cube 元素分析仪测定样品的干样含碳率 (%)。

1.4 分析方法

基于扫海面积法^[19], 计算海洋牧场的渔业资源密度, 计算公式为:

$$\rho=c/(s\times q) \quad (1)$$

式中: ρ 为渔业资源密度 ($\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$); c 为拖网平均渔获率 ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$); s 为每小时网具取样面积 ($\text{km}^2\cdot\text{h}^{-1}$); q 为捕捞系数, 取 0.5。

本研究中渔业资源生物含碳率为渔业资源生物中碳原子的质量分数。渔业资源生物样品经过处理得到物种生物干样含碳率, 结合湿质量和干质量的比值, 计算该种生物的湿样含碳率, 计算公式为:

$$\beta_i=\frac{d_i}{w_i}\times\alpha_i \quad (2)$$

式中: β_i 表示种类 i 的渔业资源生物湿样含碳率 (%); d_i 表示种类 i 的渔业资源生物干质量 (g); w_i 表示种类 i 的渔业资源生物湿质量 (g); α_i 表示种类 i 的渔业资源生物干样含碳率 (%)。

海洋牧场中 j 区域 (站位) 的渔业资源生物物种平均含碳率计算公式为:

$$\beta_j=\frac{\sum_{i=1}^n\beta_{j,i}w_{j,i}}{\sum_{i=1}^nw_{j,i}} \quad (3)$$

式中: β_j 表示 j 区域 (站位) 的平均渔业资源生物含碳率 (%); $\beta_{j,i}$ 表示 j 区域 (站位) 内 i 物种的渔业资源生物含碳率 (%); $w_{j,i}$ 表示 j 区域 (站位) 内 i 物种的湿质量 (kg)。

海洋牧场中 j 区域 (站位) 的渔业资源生物碳密度计算公式为:

$$\lambda_j=\rho_j\times\beta_j \quad (4)$$

式中: λ_j 表示 j 区域 (站位) 的平均渔业资源生物碳密度 ($\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$); ρ_j 表示 j 区域 (站位) 的平均渔业资源密度 ($\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}$)。

参考林地碳汇估算方法中的样地清查法^[20], 海洋牧场中 j 区域的渔业资源生物总碳储量计算公式为:

$$C_j=B_j\times\beta_j \quad (5)$$

式中: C_j 表示 j 区域的渔业资源生物总碳储量 (kg); B_j 表示 j 区域的渔业资源生物量 (kg)。

综上, 估算海洋牧场的渔业资源生物总碳储量的计算公式为:

$$C_M=C_A+C_B+C_C \quad (6)$$

式中: C_M 表示海洋牧场渔业资源生物总碳储量 (kg); C_A 表示 A 区渔业资源生物总碳储量 (kg); C_B 表示 B 区渔业资源生物总碳储量 (kg); C_C 表示 C 区渔业资源生物总碳储量 (kg)。

2 结果

2.1 珠海外伶仃海洋牧场渔业资源现状

2023年春季调查所采集的渔业资源生物样品隶属于5纲19目49科67属92种。其中硬骨鱼纲种类最多(11目34科44属54种),软骨鱼纲2目2科2属4种,甲壳纲2目8科15属26种,头足纲2目3科4属6种,双壳纲2目2科2属2种。

按不同区域来看,A区采集到渔业资源生物39种,B区52种(未捕到双壳纲),C区45种,D区43种(表1)。

表1 珠海外伶仃海洋牧场各区物种分布
Table 1 Species distribution by region in Zhuhai Wailingding marine ranching

纲 Class	区域 Region			
	旧人工鱼礁区 (A)	新人工鱼礁区 (B)	增殖放流区 (C)	对比区 (D)
硬骨鱼纲 Osteichthyes	24	29	27	26
软骨鱼纲 Chondrichthyes	2	2	1	3
甲壳纲 Crustacea	10	18	13	10
头足纲 Cephalopoda	2	3	3	3
双壳纲 Bivalvia	1	0	1	1

由图2可知,2023年春季海洋牧场区渔业资源密度变化介于244.96~836.28 kg·km⁻²,平均为458.34 kg·km⁻²。其中,A、B、C区的平均资源密度分别为462.58、417.23、466.72 kg·km⁻²。D区渔业资源密度变化介于281.37~425.22 kg·km⁻²,平均为371.61 kg·km⁻²。海洋牧场区的资源密度比D区高23.34%。

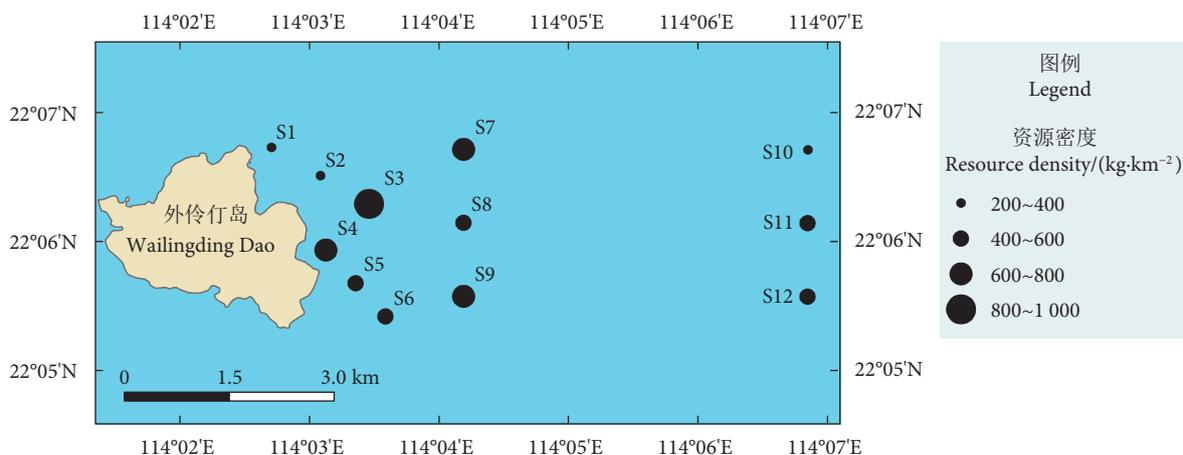


图2 珠海外伶仃海洋牧场渔业资源密度分布

Fig. 2 Distribution of biological resource density in Zhuhai Wailingding marine ranching

2.2 渔业资源生物含碳率特征

2.2.1 各区渔业资源生物含碳率特征

通过各区物种加权平均计算,海洋牧场区硬骨鱼纲、软骨鱼纲、甲壳纲、头足纲、双壳纲的渔业资源生物干样含碳率分别为45.63%、44.36%、33.53%、42.19%、41.99%,D区各纲的干样含碳率分别为44.83%、40.97%、33.95%、45.66%、41.00%。从图3可知,硬骨鱼纲的干样含碳率最高,甲壳纲的最低。海洋牧场区硬骨鱼纲、软骨鱼纲、甲壳纲、头足纲、双壳纲的渔业资源生物湿样含碳率分别为12.16%、9.75%、9.93%、8.74%、27.28%,D区各纲的湿样含碳率分别为11.97%、6.69%、9.85%、6.14%、30.98%。从图4可知,双壳纲的湿样含碳率最高,头足纲的最低。双壳纲储碳能力最强,硬骨鱼纲、甲壳纲、软骨鱼纲储碳能力中等,头足纲储碳能力最弱。

2.2.2 各纲渔业资源生物含碳率特征

由图3可知,硬骨鱼纲生物的干样含碳率中,A区(45.73%)、B区(46.23%)、C区(44.87%)均高于D区(44.83%),海洋牧场区的加权平均值(45.63%)高于D区。软骨鱼纲中,A区(44.88%)、B区(44.25%)、C区(44.32%)均高于D区(40.97%),海洋牧场区的加权平均值(44.36%)高于D区。甲壳纲中,A区(35.45%)高于D区(33.95%),但B区(33.03%)、C区(33.19%)均低于D区,海洋牧场区的加权平均值(33.53%)低于D区。头足纲中,A区(47.49%)高于D区(45.66%),但B区(41.73%)、C区(42.34%)均低于D区,海洋牧场区的加权平均值(42.19%)低于

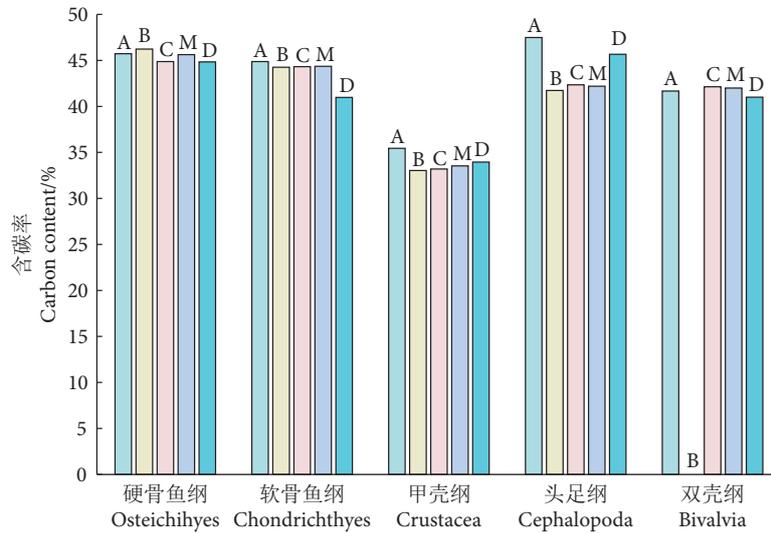


图3 珠海外伶仃海洋牧场各纲生物干样含碳率

注: A. 旧人工鱼礁区; B. 新人工鱼礁区; C. 增殖放流区; M. 海洋牧场区; D. 对比区。

Fig. 3 Carbon content of dry samples of each category in Zhuhai Wailingding marine ranching

Note: A. Old artificial reef; B. New artificial reef; C. Breed and release; M. Marine ranching; D. Control area.

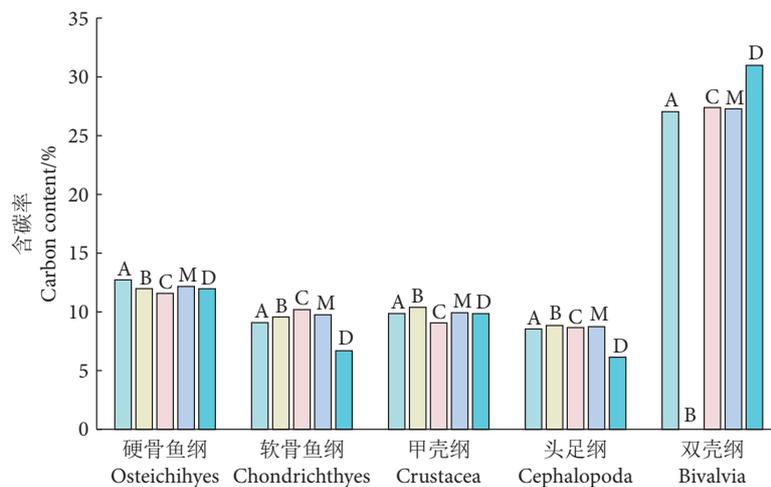


图4 珠海外伶仃海洋牧场各纲生物湿样含碳率

注: A. 旧人工鱼礁区; B. 新人工鱼礁区; C. 增殖放流区; M. 海洋牧场区; D. 对比区。

Fig. 4 Carbon content of wet samples of each category in Zhuhai Wailingding marine ranching

Note: A. Old artificial reef; B. New artificial reef; C. Breed and release; M. Marine ranching; D. Control area.

D 区。双壳纲中, A 区 (41.67%)、C 区 (42.13%) 均高于 D 区 (41.00%), 但 B 区未捕到双壳纲, 海洋牧场区的加权平均值 (41.99%) 高于 D 区。

由图 4 可知, 硬骨鱼纲生物的湿样含碳率中, A 区 (12.73%)、B 区 (11.98%) 均高于 D 区 (11.97%), C 区 (11.58%) 低于 D 区, 海洋牧场区的加权平均值 (12.16%) 高于 D 区。软骨鱼纲中, A 区 (9.08%)、B 区 (9.57%)、C 区 (10.19%) 均高于 D 区 (6.69%), 海洋牧场区的加权平均值 (9.75%) 高于 D 区。甲壳纲中, A 区 (9.86%)、B 区 (10.39%) 均高于 D 区 (9.85%), 但 C 区 (9.06%) 低

于 D 区, 海洋牧场区的加权平均值 (9.93%) 高于 D 区。头足纲中, A 区 (8.54%)、B 区 (8.84%)、C 区 (8.66%) 均高于 D 区 (6.14%), 海洋牧场区的加权平均值 (8.74%) 高于 D 区。双壳纲中, A 区 (27.04%)、C 区 (27.39%) 均低于 D 区 (30.98%), 但 B 区未捕到双壳纲, 海洋牧场区的加权平均值 (27.28%) 低于 D 区。

2.2.3 各科渔业资源生物含碳率特征

A 区渔业资源生物的干样含碳率最高的科是鳊科 (54.39%), 最低的是梭子蟹科 (32.01%); B 区最高的是鳊科 (54.67%), 最低的是弓蟹科 (28.58%);

C区最高的是鲷科(52.43%)，最低的是梭子蟹科(30.51%)；海洋牧场区最高的是鲷科(54.07%)，最低的是弓蟹科(28.58%)。D区最高的是鲷科(54.81%)，最低的是关公蟹科(24.52%)。

A区渔业资源生物的湿样含碳率最高的科是扇贝科(27.04%)，最低的是带鱼科(6.99%)；B区最高

的是笛鲷科(15.92%)，最低的是耳乌贼科(6.48%)；C区最高的是扇贝科(27.39%)，最低的是前肛鳗科(6.53%)；海洋牧场区最高的是扇贝科(27.28%)，最低的是耳乌贼科(6.48%)。D区最高的是乌蛤科(30.98%)，最低的是关公蟹科(4.28%) (表2)。

表2 珠海外伶仃海洋牧场渔业资源生物各科干/湿样含碳率

科名 Family	区域 Region				
	旧人工鱼礁区 (A)	新人工鱼礁区 (B)	增殖放流区 (C)	海洋牧场区 (M)	对比区 (D)
鲷科 Leiognathidae	54.39/15.21	54.67/15.58	52.43/14.23	54.07/15.15	54.81/17.71
赤刀鱼科 Cepolidae	—	42.41/9.35	—	42.41/9.35	—
鲳科 Muraenidae	—	—	43.12/10.90	43.12/10.90	—
带鱼科 Trichiuridae	41.88/6.99	44.87/9.91	46.86/10.36	45.14/9.79	45.22/9.55
笛鲷科 Lutjanidae	45.56/14.94	50.79/15.92	47.43/13.74	48.15/14.78	47.56/13.80
鲷科 Sparidae	50.83/15.91	51.54/14.68	—	51.11/15.39	—
毒鲉科 Synanceiidae	—	41.51/9.98	41.45/10.38	41.49/10.10	—
对虾科 Penaeidae	38.93/10.40	38.29/9.95	38.60/10.23	38.63/10.20	38.53/10.21
耳乌贼科 Sepiolidae	—	44.27/6.48	—	44.27/6.48	—
魴鲱科 Triglidae	—	—	36.86/9.68	36.86/9.68	—
仿石鲈科 Haemulidae	—	—	47.12/13.55	47.12/13.55	—
飞鱼科 Exocoetidae	46.17/13.46	—	—	46.17/13.46	46.57/12.83
鲱科 Clupeidae	45.16/13.17	40.55/11.72	47.03/11.27	44.75/11.75	47.58/12.15
弓蟹科 Varunidae	—	28.58/10.38	—	28.58/10.38	—
狗母鱼科 Synodidae	46.36/14.21	44.38/9.83	—	46.22/13.79	—
鼓虾科 Alpheidae	—	—	—	—	40.02/9.68
关公蟹科 Dorippidae	—	31.84/8.45	31.45/8.17	31.55/8.24	24.52/4.28
管鞭虾科 Solenoceridae	—	42.31/9.26	40.98/8.28	41.83/8.88	—
海鲗科 Ariidae	—	50.55/15.78	—	50.55/15.78	—
鲳科 Dasyatidae	44.88/9.08	44.04/9.46	44.32/10.19	44.25/9.69	40.93/7.00
鸡笼鲷科 Drepanidae	41.14/11.49	—	43.08/10.88	41.84/11.26	—
金线鱼科 Nemipteridae	43.25/12.14	45.89/12.58	46.52/12.19	45.21/12.30	39.97/12.02
蓝子鱼科 Siganidae	46.80/13.99	—	—	46.80/13.99	44.49/11.78
鳗鲗科 Plotosidae	—	47.54/11.18	—	47.54/11.18	—
乌蛤科 Cardiidae	—	—	—	—	41.00/30.98
鲆科 Bothidae	41.07/11.41	46.68/10.69	41.31/10.08	43.28/10.94	35.94/9.98
鲈科 Serranidae	38.93/9.72	42.02/10.25	39.99/9.91	40.59/10.01	42.14/10.35
前肛鳗科 Dysommidae	—	42.30/10.57	45.68/6.53	44.59/7.39	45.45/11.35
枪乌贼科 Loliginidae	47.49/8.54	42.81/7.68	45.53/7.61	44.48/7.69	45.66/6.14

续表 2

to be continued

科名 Family	区域 Region				
	旧人工鱼礁区 (A)	新人工鱼礁区 (B)	增殖放流区 (C)	海洋牧场区 (M)	对比区 (D)
雀鲷科 Pomacentridae	—	—	—	—	38.79/9.40
扇贝科 Pectinidae	41.67/27.04	—	42.13/27.39	41.99/27.28	—
舌鳎科 Cynoglossidae	—	—	—	—	42.25/10.02
蛇鳎科 Ophichthidae	—	—	—	—	43.85/11.34
鲹科 Caranginae	45.80/11.08	42.47/11.16	43.11/11.26	43.48/11.13	44.37/13.26
石首鱼科 Sciaenidae	43.81/9.45	46.50/12.46	46.34/11.46	45.29/10.70	46.56/11.43
梭子蟹科 Portunidae	32.01/9.20	32.64/11.20	30.51/8.95	32.18/10.44	32.08/9.91
鲷科 Soleidae	33.51/9.27	—	43.87/12.16	39.73/11.00	—
天竺鲷科 Apogonidae	39.98/9.46	40.98/10.74	44.54/12.02	42.35/10.98	42.72/9.70
鲷科 Tetraodontidae	—	40.04/8.07	39.98/8.05	40.03/8.06	—
乌贼科 Sepiidae	—	41.01/9.89	40.59/9.48	40.78/9.66	—
虾蛄科 Squillidea	32.93/10.23	29.29/7.51	31.68/8.10	30.56/7.92	34.56/9.43
鰕虎科 Gobiidae	—	—	39.51/9.75	39.51/9.75	—
鲷科 Callionymidae	41.51/7.60	—	—	41.51/7.60	—
牙鲆科 Paralichthyidae	—	38.73/10.40	43.27/12.09	41.82/11.54	43.27/12.13
鳐科 Rajidae	—	—	—	—	40.98/6.61
鲷科 Platycephalidae	45.36/11.67	44.47/11.37	42.93/10.31	44.28/11.11	40.00/9.59
鲆科 Sphyrnaenidae	—	46.15/10.45	43.74/12.17	44.65/11.43	38.27/8.96
藻虾科 Hippolytidae	—	—	39.62/10.52	39.62/10.52	—
长鲷科 Centrolophidae	45.48/7.82	—	42.28/8.02	43.89/7.91	42.89/8.43

注: “—”代表未捕到该科渔业资源生物。

Note: “—” represents the fishery resources that had not been caught.

2.3 海洋牧场及对比区储碳能力分析

海洋牧场区渔业资源生物平均湿样含碳率为 11.00%; 其中, A 区渔业资源生物的湿样含碳率介于 10.61%~11.42%, 平均为 10.78%; B 区介于 9.79%~14.13%, 平均为 11.99%; C 区介于 10.73%~11.05%, 平均为 10.86%。D 区介于 8.49%~10.09%, 平均为 9.27%。海洋牧场区内各区的平均生物含碳率均高于 D 区(图 5)。

海洋牧场区渔业资源生物的平均碳密度为 50.42 kg·km⁻²; 其中 A、B、C 区渔业资源生物的碳密度分别介于 27.97~88.71 kg·km⁻²、34.37~74.28 kg·km⁻²、37.00~58.84 kg·km⁻²。D 区渔业资源生物碳密度介于 25.46~42.88 kg·km⁻²。海洋牧场区内各区的平均生物碳密度均高于 D 区(图 6)。

依据区域渔业资源生物碳储量公式计算可知, 海洋牧场区的总碳储量为 495.63 kg, 其中 A、B、

C 区的碳储量分别为 97.76、75.04、322.84 kg; A、B、C 区渔业资源生物的平均碳密度分别为 49.88、50.03、50.68 kg·km⁻², C 区的最高。D 区渔业资源生物的平均碳密度为 34.44 kg·km⁻², 海洋牧场区渔业资源生物的平均碳密度比 D 区高 46.40%(表 3)。

3 讨论

3.1 海洋牧场渔业资源生物含碳率

使用元素分析法, 分析海洋牧场不同渔业资源生物物种的含碳率, 可以研究渔业资源生物对海洋牧场储碳能力的影响。本研究表明, 珠海外伶仃海洋牧场渔业资源生物的干样含碳率介于 23.88%~59.66%, 硬骨鱼纲、软骨鱼纲、甲壳纲、头足纲、双壳纲干样含碳率的加权平均值分别为 45.63%、44.36%、33.53%、42.19%、41.99%。李梦迪^[18]测定岩礁鱼类的干样含碳率分布介于 42.95%~

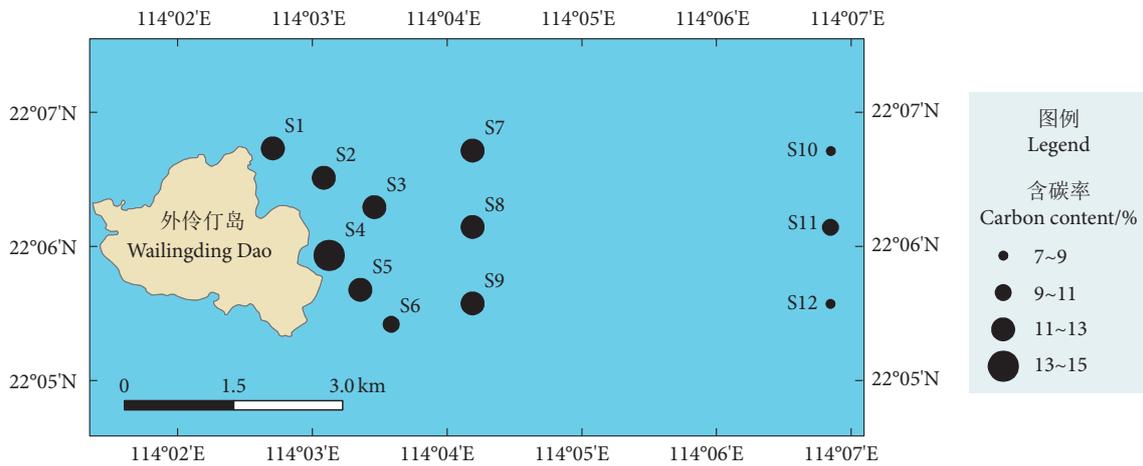


图5 珠海外伶仃海洋牧场渔业资源生物含碳率分布

Fig. 5 Distribution of biological carbon content in Zhuhai Wailingding marine ranching

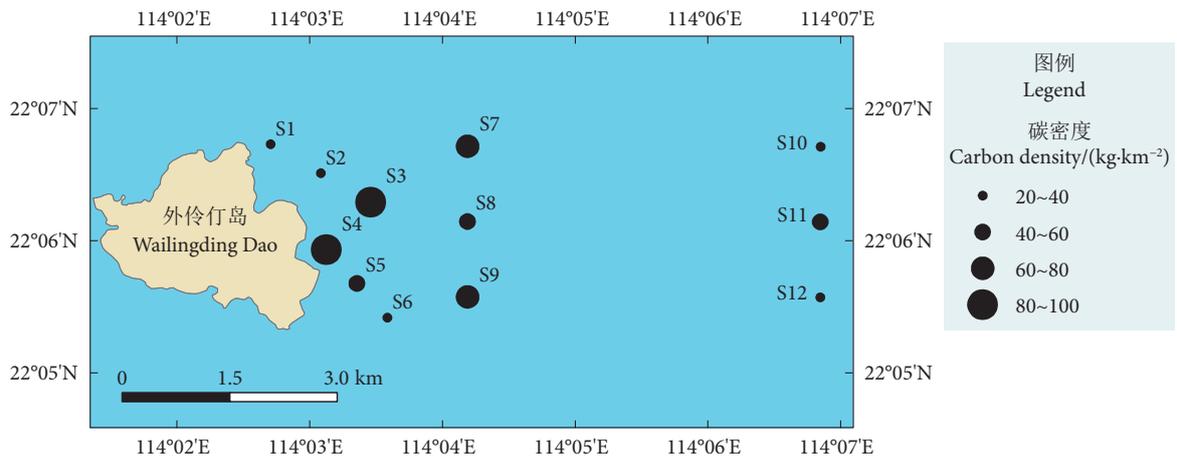


图6 珠海外伶仃海洋牧场渔业资源生物碳密度分布

Fig. 6 Distribution of biocarbon density in Zhuhai Wailingding marine ranching

表3 珠海外伶仃海洋牧场区域渔业资源生物储碳能力分布

Table 3 Distribution of carbon storage capacity in Zhuhai Wailingding marine ranching

区域 Region	海域面积 Area/km ²	渔获生物量 Biomass/kg	资源密度 Resource density/(kg·km ⁻²)	含碳率 Carbon content/%	碳密度 Carbon density/(kg·km ⁻²)	碳储量 Carbon storage/kg
旧人工鱼礁区 (A)	1.96	906.65	462.58	10.78	49.88	97.76
新人工鱼礁区 (B)	1.50	625.85	417.23	11.99	50.03	75.04
增殖放流区 (C)	6.37	2 972.99	466.72	10.86	50.68	322.84
海洋牧场区 (M)	9.83	4 505.48	458.34	11.00	50.42	495.63
对比区 (D)	—	—	371.61	9.27	34.44	—

50.19%，平均值为 46.1%。倪添等^[21]使用加权平均含碳率法，测定樟子松人工林的树干、根、叶和枝的干样含碳率平均值分别为 47.73%、46.98%、49.66% 和 48.32%，整树的含碳率平均值为 47.81%。Palou 等^[22]测定绿藻干样含碳率介于 27.2%~35.8%，平均值为 32.1%。与本研究相比，海洋生物平均干样含碳率与岩礁鱼类相近，小于樟子松人

工林，大于绿藻。

珠海外伶仃海洋牧场渔业资源生物的湿样含碳率介于 6.53%~27.39%，硬骨鱼纲、软骨鱼纲、甲壳纲、头足纲、双壳纲湿样含碳率的加权平均值分别为 12.16%、9.75%、9.93%、8.74%、27.28%。马欢等^[15]测定硬骨鱼纲湿样含碳率介于 5.13%~15.93%、甲壳纲介于 7.67%~12.52%、腹足纲介于

5.88%~15.14%、双壳纲介于4.24%~18.77%、头足纲介于3.86%~5.10%，平均值分别为10.25%、9.35%、10.58%、10.10%、4.48%。李梦迪^[18]测定岩礁鱼类的湿样含碳率介于11.05%~13.25%，平均值为12.30%。卢振彬和黄美珍^[23]测定底层鱼类的湿样含碳率平均值为13.54%。本研究的硬骨鱼纲湿样含碳率与李梦迪^[18]的研究结果相近，略高于马欢等^[15]的结果，略低于卢振彬和黄美珍^[23]的结果，主要原因可能是不同海域的鱼类等生物种类组成不同。

3.2 海洋牧场不同功能区渔业资源生物碳储量

从位置分布看，海洋牧场内不同功能区渔业资源生物的碳储量有明显差异，主要是由各区生物含碳率和资源密度的差异造成的。在渔业资源生物碳密度上，新人工鱼礁区的区域碳密度(50.03 kg·km⁻²)总体略高于旧人工鱼礁区(49.88 kg·km⁻²)，略低于增殖放流区(50.68 kg·km⁻²)。人工鱼礁的投放会以丰富与养护渔业资源、为附着生物提供附着场地的形式^[24]，参与碳的吸收与固定。当前珠海外伶仃海洋牧场依据人工鱼礁投礁时间的不同，可分为新、旧人工鱼礁区，两个礁区之间虽会相互作用形成规模效应^[25]，但因渔业资源生物群落分布会受到礁体类型、礁龄、礁体规模的影响^[26]，且不同功能区渔业资源生物含碳率不同，二者的区域渔业资源生物碳密度也存在差异。在渔业资源密度方面，旧人工鱼礁区的资源密度(462.58 kg·km⁻²)略低于增殖放流区(466.72 kg·km⁻²)，高于新人工鱼礁区(417.23 kg·km⁻²)。新人工鱼礁区的渔业资源密度低于旧人工鱼礁区和增殖放流区，可能与新人工鱼礁投礁时间较短，尚未完全发挥其生态效应有关^[27]。增殖放流通过人为向海域投放海洋生物幼体，实现渔业资源增殖^[28]，在改善海洋生态环境^[29]的同时，发挥着生物储碳、增汇的作用。本研究发现增殖放流区的渔业资源密度和渔业资源生物碳密度相比于新人工鱼礁区、旧人工鱼礁区均最高，这从侧面反映出珠海外伶仃海洋牧场多年进行人工鱼礁与增殖放流对渔业资源具有良好的养护效果。据此，要提高海洋牧场的储碳能力，可以从两方面入手：1) 改善渔业资源结构，提高海洋牧场内渔业资源生物含碳率较高物种的生物量占比；2) 通过建设人工鱼礁和增殖放流等手段提高海洋牧场的渔业资源密度。在后续研究中，可通过合理配置海洋牧场的不同功能区，提高海洋牧场的生物碳汇能力。

3.3 海洋牧场与对比区渔业资源生物碳储量

渔业资源生物含碳率的差异、不同季节、不同统计方法都会造成碳储量估算结果的不同，本研究对珠海外伶仃海洋牧场渔业资源生物储碳能力的估算相对保守。海洋牧场区平均渔业资源生物含碳率(11.00%)、渔业资源密度(458.34 kg·km⁻²)、渔业资源生物碳密度(50.42 kg·km⁻²)分别比对比区(9.27%、371.61 kg·km⁻²、34.44 kg·km⁻²)高18.66%、23.34%、46.40%。海洋牧场区渔业资源生物碳密度和渔业资源密度均大于对比区，反映出珠海外伶仃海洋牧场养护效果的优越性，结合广东省珠海市外伶仃海洋牧场长期致力于区域渔业资源与海洋生态环境的修复与养护^[30]的历史背景，可知海洋牧场的建设不仅能修复生态环境、养护渔业资源、提高海洋生物资源量^[31]，还能大幅度提高海洋牧场所在区域的生物储碳能力。但总体上，珠海外伶仃海洋牧场生物碳储量的估算结果还存在一定的保守性，受疫情影响本次调查时间为春季，基于冯雪等^[32]的研究，对比历史资料可知春季渔业资源的数量与丰富度会因秋、冬季节的大量捕捞而处于全年最低水平。此外，为保护人工鱼礁生态环境，常使用拖网等网具避开礁区^[33]，根据詹启鹏等^[34]、Chong^[35]的研究可知礁区内部渔业资源更丰富，因此本研究针对海洋生物碳储量的估算可能低于实际情况，据此可推测海洋牧场的生物储碳能力可能更强，估算结果相对保守。因海洋微生物^[36]、海底沉积物^[37]、水中溶解的碳^[38]均会影响渔业资源生物赖以生存的海洋生态环境，进而影响渔业资源生物的储碳能力，为更好地估算海洋牧场渔业资源生物的碳储量，后续可结合上述因素进行深入研究。

4 结论与展望

海洋牧场作为碳汇渔业的重要组成部分，不仅为渔业资源生物提供适宜生存和繁殖的场所，增殖养护渔业资源的种类与数量，同时通过碳在食物网中的循环、生物的死亡与沉积、人类对经济渔业资源生物的捕捞等过程，参与碳的吸收、移除与固定。当前，海洋碳汇的测算方法与体系虽已初步建立，但与海洋牧场碳汇相关的研究成果较少，从海洋牧场碳汇作用原理来看，仍缺乏人工鱼礁、增殖放流、渔业资源捕捞相关的碳汇核算方法研究。因此，本研究针对海洋牧场的人工鱼礁、增殖放流等

功能区,探究珠海外伶仃海洋牧场的储碳能力,既填补了岛礁型海洋牧场生物储碳研究方面的空白,又评估了珠海外伶仃海洋牧场渔业资源生物的碳储量,可为后续进一步合理配置海洋牧场功能区、提高海洋牧场储碳能力提供参考。

受限于时间和资金,本研究仅进行了珠海外伶仃海洋牧场渔业资源生物的碳储量研究,未能估算珠海外伶仃整个海洋牧场生态系统的碳储量。今后随着对海洋牧场碳汇基础理论和评估技术的深入研究,应把珠海外伶仃海洋牧场生态系统作为一个整体,研究海洋牧场中的生物碳储量变化、碳溶解机制等,以测算海洋牧场的整体碳汇能力。

参考文献:

- [1] 聂弯,黄靖,夏炎,等.海洋蓝碳生态系统服务价值评估:以盐城市海洋蓝碳为例[J].生态经济,2023,39(12):41-48.
- [2] MAITENYI-HILL C, REITHMAIER G, YAU Y Y Y, et al. Inorganic carbon outwelling from a Mediterranean seagrass meadow using radium isotopes[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2023, 283: 108248.
- [3] 焦念志.研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求[J].中国科学院院刊,2021,36(2):179-187.
- [4] 谢素美,罗伍丽,贺义雄,等.中国海洋碳汇交易市场构建[J].科技导报,2021,39(24):84-95.
- [5] 陈小龙,狄乾斌,侯智文,等.海洋碳汇研究进展及展望[J].资源科学,2023,45(8):1619-1633.
- [6] XU Y F, LIU H P, YANG Y F, et al. Assessment of carbon sink potential and methane reduction scenarios of marine macroalgae (*Gracilaria*) cultivation[J]. Sci China Earth Sci, 2023, 66: 1047-1061.
- [7] 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.
- [8] 陈丕茂,舒黎明,袁华荣,等.国内外海洋牧场发展历程与定义分类概述[J].水产学报,2019,43(9):1851-1869.
- [9] 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[J].渔业科学进展,2022,43(5):1-7.
- [10] 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.
- [11] 沈新强,全为民,袁骥.长江口牡蛎礁恢复及碳汇潜力评估[J].农业环境科学学报,2011,30(10):2119-2123.
- [12] 虞宝存,梁君.贝藻类碳汇功能及其在海洋牧场建设中的应用模式初探[J].福建水产,2012,34(4):339-343.
- [13] 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.
- [14] 公丕海.海洋牧场中海珍品的固碳作用及固碳量估算[D].上海:上海海洋大学,2014:18-39.
- [15] 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[J].南方水产科学,2017,13(6):56-64.
- [16] 崔晨.祥云湾海洋牧场人工鱼礁区碳汇功能初步研究[D].保定:河北农业大学,2021:1-8.
- [17] 中华人民共和国农业农村部.中华人民共和国农业农村部公告第115号[EB/OL]. [2024-01-10]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201812/t20181229_6165798.htm.
- [18] 李梦迪.石雀滩海洋牧场典型岩礁鱼类碳储量评估方法对比及其价值核算研究[D].舟山:浙江海洋大学,2023:10-19.
- [19] 罗惠桂,汪佳仪,谢珍玉,等.三亚蜈支洲岛毗邻海域鱼类物种多样性及群落结构特征[J].海洋科学,2023,47(7):74-86.
- [20] 侯瑞萍,夏朝宗,陈健,等.长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J].生态学报,2022,42(23):9483-9498.
- [21] 倪添,谢龙飞,董利虎.黑龙江省樟子松人工林含碳量估算方法的比较[J].生态学杂志,2023,42(7):1774-1782.
- [22] PALOU A, JIMÉNEZ P, CASALS J, et al. Evaluation of the Near Infrared Spectroscopy (NIRS) to predict chemical composition in *Ulva ohnoi*[J]. J Appl Phycol, 2023, 35(5): 2007-2015.
- [23] 卢振彬,黄美珍.福建近海主要经济渔业生物营养级和有机碳含量研究[J].台湾海峡,2004(2):153-158.
- [24] 张荣良.烟台近岸人工鱼礁与自然岩礁食物网结构与功能对比研究[D].北京:中国科学院大学,2021:1-14.
- [25] PAN Y, TONG H H, WEI D Z, et al. Review of structure types and new development prospects of artificial reefs in China[J]. Front Mar Sci, 2022, 9: 1-17.
- [26] 李建都,赵祺,刘晋冀,等.黄渤海不同人工鱼礁区渔业生物群落结构特征及生物增量影响要素[J].中国水产科学,2023,30(3):371-383.
- [27] 张镇,董建宇,孙昕,等.莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区大型底栖动物的营养结构特征[J].水产学报,2023,47(9):62-75.
- [28] 水柏年.海洋渔业资源增殖放流反思及优化探讨[J].大连海洋大学学报,2023,38(5):737-743.
- [29] 李木子,曾雅,任同军.中国渔业增殖放流问题及对策研究[J].中国水产,2021(9):42-45.
- [30] 冯雪,范江涛,孙晓,等.珠海外伶仃人工鱼礁对鱼类资源养护效果初步评估[J].南方农业学报,2021,52(12):3228-3236.
- [31] 张秀梅,纪棋严,胡成业,等.海洋牧场生态系统稳定性及其对干扰的响应:研究现状、问题及建议[J].水产学报,2023,47(11):107-121.
- [32] 冯雪,戴小杰,范江涛,等.外伶仃海洋牧场附近海域渔业资源季节动态变化分析[J].南方水产科学,2023,19(5):32-38.
- [33] 曾旭.马鞍列岛岩礁性鱼类栖息地利用与保护型人工鱼礁选址研究[D].上海:上海海洋大学,2019:1-9.
- [34] 詹启鹏,董建宇,孙昕,等.芙蓉岛海域人工鱼礁投放对大型底栖动物群落结构和功能性状的影响[J].应用生态学报,2023,34(3):796-804.
- [35] CHONG L. Evaluating the socioecological effects and feedbacks of artificial reefs for recreational fisheries and Gulf of Mexico red snapper management[D]. Gainesville: University of Florida, 2023: 15-21.
- [36] ZHANG Y, ZHAO M X, CUI Q, et al. Processes of coastal ecosystem carbon sequestration and approaches for increasing carbon sink[J]. Sci China Earth Sci, 2017, 60(5): 809-820.
- [37] EPSTEIN G, ROBERTS C M. Does biodiversity-focused protection of the seabed deliver carbon benefits? A UK case study[J]. Conserv Lett, 2022, 16(1): 1-9.
- [38] 蒋鑫坤,李丽,董双林.贝类养殖区CO₂释放量化新模型的应用研究[J].中国水产科学,2022,29(12):1693-1703.