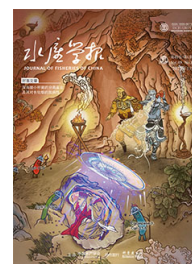


DOI: 10.11964/jfc.20240114308

## 枸杞岛养殖厚壳贻贝生长特征及可移出碳汇量的季节性差异评估



王一航<sup>1</sup>, 盘钰峰<sup>1</sup>, 夏飞宇<sup>1</sup>, 徐颖<sup>1</sup>, 董奕飞<sup>1</sup>, 杨扬<sup>1</sup>,  
王晓丽<sup>1</sup>, 田晓飞<sup>1</sup>, 田阔<sup>1</sup>, 杨晓龙<sup>1</sup>, 李宏亮<sup>2</sup>, 张秀梅<sup>1\*</sup>

1. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316022; 2. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012

### 摘要:

**【目的】** 探明贝类养殖活动的固碳增汇潜力。

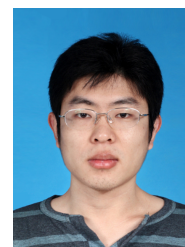
**【方法】** 以枸杞岛筏式养殖厚壳贻贝为研究对象, 调查了其生长特征与附着动物群落特征的季节变化及其与环境因子的相关性, 并基于养殖贝类及附着动物的生物量碳密度, 测定评估了厚壳贻贝及其附着动物的可移出碳汇量。

**【结果】** 厚壳贻贝软组织含水率、肥满度和性腺指数存在明显的季节、年龄和区域差异, 其中软组织含水率具体表现为春>冬>秋>夏, 1龄>2龄+, 养殖区中部>近岸和远岸, 与肥满度和性腺指数呈现出相反的趋势, 且性腺指数呈现出4龄>3龄>2龄>1龄的规律; 厚壳贻贝壳/软组织含碳率、软组织湿重比均存在显著的季节差异, RDA分析表明, 软组织含水率和氮氮二者呈现较强正相关关系, 软组织含碳率、肥满度和性腺指数与叶绿素a、温度和总氮等环境因子呈现较强正相关关系; 附着动物丰度和生物量存在较大的季节差异, 其中春季生物量最高, 主要物种为绿侧花海葵、网纹纹藤壶、带偏顶蛤、缪氏哲蟹、短毛海鳞虫等; 厚壳贻贝生物量碳密度秋季最高, 为129.98 g C/kg, 春季最低, 为108.29 g C/kg, 附着动物生物量碳密度春季最高, 为6.85 g C/kg, 夏季最低, 为1.38 g C/kg。

**【结论】** 通过收获贻贝和附着动物, 综合可移出生物量碳密度最高可达135.34 g C/kg, 估算2021年枸杞岛贻贝养殖可收获约 $3.02 \times 10^4$  t C, 综合可产生的碳汇经济价值约为1049万元。研究结果对于最大化提高厚壳贻贝养殖的可移出碳汇能力, 以及深入认识和科学评估贝类养殖的碳汇效应具有重要的理论依据和现实意义。

**关键词:** 厚壳贻贝; 生长特征; 附着动物; 可移出碳汇; 枸杞岛

第一作者: 王一航, 从事贝类资源增殖学研究, E-mail: wangyh@zjou.edu.cn



通信作者: 张秀梅, 从事渔业资源增殖学研究, E-mail: xiumei1227@163.com

资助项目: 浙江省基础公益计划(LDT23D06023D06); 舟山市科技计划(2023C41004)

收稿日期: 2024-01-04

修回日期: 2024-05-06

文章编号:  
1000-0615(2025)01-019313-17  
中图分类号: S 931.3  
文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)  
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)

海洋作为地球最大的碳库, 其碳汇过程对全球气候变暖起到巨大的调节和缓冲作用, 其中渔业碳汇不仅是海洋碳汇的重要组成部分, 也是研究近海海洋碳循环过程的重要一环<sup>[1-2]</sup>。贝类养殖是我国近海养殖产量的主要贡献来源, 2022年全国养殖贝类产量达到1569.58万t, 占全国水产养殖产量的69%<sup>[3]</sup>。养殖过程中, 贝类会吸收利用自然水



体中不同形式的碳用于自身生长和繁殖, 通过人为收获贝类将这部分碳转移出水体的过程又称为可移出碳汇过程, 也是最主要的渔业碳汇来源之一<sup>[1,4-6]</sup>。滤食性贝类能通过“生物泵”和“碳酸盐泵”作用由海洋表层向海底输送大量的颗粒有机碳 (POC) 和碳酸钙躯壳<sup>[7]</sup>, 尤其是筏架式养殖比底播养殖碳汇能力更优异<sup>[8]</sup>。另外, 通过收获活动能将大量生物碳从海水中移除, 这对养殖海域及其毗邻海域的碳循环产生积极影响<sup>[9-10]</sup>。权伟等<sup>[11]</sup>估算了浙江 2004—2013 年近海贝类养殖年均可移出碳为 6.29 万 t, 占全国年均固碳量的 6.55%, 其中固碳量最高的为蛏类、蚶类、牡蛎、贻贝。杨晓龙等<sup>[12]</sup>估算了 2011—2020 年浙江省贝、藻海水养殖的年可移出碳分别为 7.88 万 t 和 0.43 万 t, 相当于每年减排 30.5 万 t 的 CO<sub>2</sub>, 节约减排成本约 2 887 万元。孙雪峰等<sup>[13]</sup>估算了 2010—2020 年江苏省贝藻养殖年平均可移出碳约为 6.38 万 t, 每年固定 CO<sub>2</sub> 达 23.41 万 t。赵祺等<sup>[14]</sup>核算了河北省 2012—2019 年贝藻年可移出碳约为 33.44 万 t。据估算, 通过合理的拓展、养护和强化管护措施, 大力发展健康、生态、可持续的碳汇渔业新生产模式, 中国的海洋渔业和水产养殖业有望实现 4.6×10<sup>8</sup> t/a 固碳量, 相当于我国每年 10% 的碳减排量<sup>[15]</sup>。因此, 贝类养殖潜藏着可观的固碳能力和巨大的可移出碳汇量。

目前研究贝类碳汇机理主要集中在 3 个方面, 包括从宏观尺度探寻养殖区碳“源”“汇”和不同界面碳通量的动态格局<sup>[16-19]</sup>; 从微观尺度探寻贝类生理活动向水体和沉积物碳扩散的作用机制<sup>[5,9,20]</sup>; 以及基于张继红等<sup>[21]</sup>以往按照生物量碳密度法计算碳汇量。其中第三种方法主要针对估算贝类养殖结束收获时贝类钙化形成贝壳以及摄食饵料形成的软组织, 通过测定贝类产量、干湿比重及其碳含量计算贝类固定的可移出碳汇量。该方法可简单快速估算出养殖海域贝类可移出碳汇量, 但如果调查条件不足会忽略其附着生物碳汇贡献价值, 以及不同季节的可移出碳汇量差异。特别是筏式或吊笼养殖的贝类, 养殖贝体及器材上容易附着大量的附着生物, 包括滤食性且具有石灰质躯壳的小型腹足类、双壳类、藤壶等生物<sup>[21]</sup>。例如, 周毅等<sup>[22]</sup>估算了四十里湾养殖栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 附着的玻璃海鞘 (*Ciona intestinalis*) 碳的

净生产量可达栉孔扇贝碳净生产量的 6.4%。梁君等<sup>[23]</sup>对东极海洋牧场厚壳贻贝 (*Mytilus coruscus*) 养殖区的可移出碳汇能力进行了评估, 发现网纹纹藤壶 (*Amphibalanus reticulatus*) 和蕈枝螭 (*Obelia*) 两种附着生物的固碳量约占厚壳贻贝固碳量的 4.8%。值得注意的是, 滤食性贝类的摄食行为和生长速率容易受到食物丰度、食物成分、温度、盐度、潮流特征等环境因素以及自身年龄、规格的影响, 造成异速生长<sup>[24-25]</sup>, 因此贝类碳汇能力具有明显的季节、空间差异特征<sup>[26]</sup>。例如, 张继红等<sup>[27]</sup>发现桑沟湾的养殖栉孔扇贝在深水区的生物固碳速率比浅水区高 2 倍, 导致区域性差异的主要原因可能是由于生长速率、养殖密度及存活率的差异。因此需要开展多季节和多空间尺度的调查, 才能更深入了解贝类动态生长特征, 最终准确评估贝类可移出的碳汇量。

舟山枸杞岛冠有“贻贝之乡”之称, 是厚壳贻贝的中国主产区, 2021 年养殖区面积达到 1 200 hm<sup>2</sup>, 产量达到 22.77 万 t, 其中后头湾贻贝养殖区是枸杞岛最大的贻贝养殖区域, 占整个枸杞岛养殖区 70% 以上。在贻贝养殖过程中会直接或间接地吸收、转移或固定大量的碳, 另外在贻贝壳上也附着了大量藤壶、海葵等高碳汇生物, 这对于渔业碳汇发展发挥着巨大贡献。为此, 本实验对不同季节及不同年龄枸杞岛养殖厚壳贻贝的生长特征进行了测定, 并分析了贻贝及其附着动物的固碳量, 进而评估枸杞岛养殖贻贝可移出碳汇能力, 研究成果为碳汇渔业健康可持续发展, 实现贝类碳汇的最大化利用具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查海域及站位设置

本研究选取浙江省嵊泗县枸杞岛后头湾贻贝养殖区作为调查采样地。参照养殖区潮流方向及水动力特征<sup>[28-29]</sup>, 在养殖区内共设置 12 个调查站位 G1~G12, 共分为近岸、中部、远岸 3 块区域, 其中 G1、G2、G3、G7 和 G8 为近岸养殖区域, G9、G10 和 G11 为中部养殖区域, G4、G5、G6 和 G12 为远岸养殖区域 (图 1)。

### 1.2 样品采集及处理

本研究于 2021 年 11 月、2022 年 1 月、2022

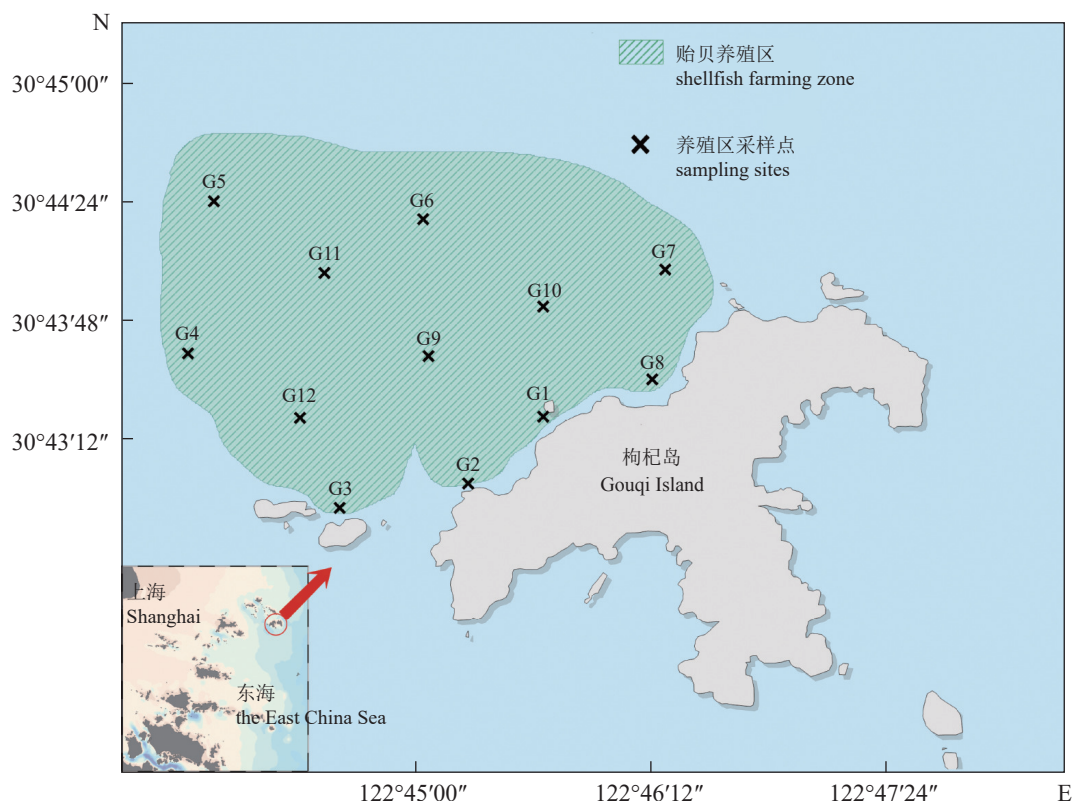


图 1 调查海域和站位分布图

Fig. 1 Investigating area and sites distribution

年 4 月及 2022 年 8 月在贻贝养殖区开展共 4 个连续季度的调查。各季度在 12 个站位中采集足量 1~4 龄厚壳贻贝用于分析不同年龄贻贝的生长特征, 每个季度采集量不低于 300 只; 针对近岸 (G2 和 G7)、中部 (G9)、远岸 (G5 和 G6) 5 个站位的 2 龄+贻贝苗绳, 分别进行生物样品采集, 用于分析不同站位的贻贝生长特征、含碳特征、附着动物特征, 每个站位随机选取 3 串贻贝苗绳, 测量苗绳长度, 分别在每串的上、中、下部位采集垂直长度 25 cm 内所有的养殖贻贝及大型附着动物进行物种鉴定、称重、计数, 并采集表层水样进行环境因子分析。

本实验主要针对养殖贻贝的可移出碳汇能力进行评估, 因此用于评估的厚壳贻贝为达到收获年龄的贻贝 (2 龄+)。厚壳贻贝的年龄根据贝壳表面年轮、壳长、生长季节确定 (1 龄贝壳长约为 24.0~56.0 mm, 2 龄贝壳长约为 56.0~75.0 mm, 3 龄贝壳长约为 75.0~85.0 mm, 4 龄贝壳长约为 85.0~100.0 mm)<sup>[30]</sup>。所获样品的采集、保存、分类、计数及称重均按《海洋监测规范》<sup>[31]</sup> 进行。

本研究获得了浙江海洋大学实验动物管理

和使用伦理委员会批准, 实验过程中操作人员严格遵守浙江海洋大学伦理规范, 并按照浙江海洋大学伦理委员会制定的《浙江海洋大学实验动物管理办法》规章制度执行。

### 1.3 养殖贻贝生长评估

将每个站位的厚壳贻贝样品随机编号, 剪去厚壳贻贝样品壳外的足丝, 清洗去除表面污物及附着生物, 擦干后测量壳长、壳宽和壳高 (精确度 0.1 mm)、并称量软体部和贝壳部湿重 (精确度 0.01 g)。称重后, 置于 60 °C 烘箱中烘干至恒重 (48 h 以上), 称量软体部干重和空壳干重, 用于计算生长指标。

$$F = W_D / C_D \quad (1)$$

式中,  $F$  为肥满度;  $W_D$  为软组织干重 (g);  $C_D$  为壳干重 (g)。

$$W_M = (W_W - W_D) / W_W \quad (2)$$

式中,  $W_M$  为软组织含水率 (%);  $W_W$  为软组织湿重 (g);  $W_D$  为软组织干重 (g)。

$$G = G_D / W_D \quad (3)$$



式中,  $G$  为性腺指数;  $G_D$  为性腺干重 (g)。

$$C_M = (C_W - C_D) / C_W \quad (4)$$

式中,  $C_M$  为壳含水率 (%);  $C_W$  为壳湿重 (g)。

$$R_C = C_W / T; R_W = W_W / T \quad (5)$$

式中,  $R_C$  为壳湿重比 (%);  $R_W$  为软组织湿重比 (%);  $T$  为总湿重 (g)。

#### 1.4 环境因子的检测

依照《海洋调查规范第4部分: 海水化学要素调查》<sup>[32]</sup> 规范操作进行, 采用 CTD (SBE37 SM 型号) 测量氮饱和度 (nitrogen, mL/L), 氧饱和度 (oxygen, mL/L), 温度 (temperature, °C), 盐度 (salinity); 使用重氮-偶氮法测定亚硝酸盐 (nitrite, mg/L); 采用锌镉还原法测定硝酸盐 (nitrate, mg/L); 采用抗坏血酸还原磷钼蓝法测定活性磷 (SRP, mg/L); 采用水杨酸分光光度法测量氨氮 (ammonia, mg/L); 采用过硫酸钾氧化法测定总磷 (TP, mg/L); 使用德国耶拿 multi N/C 3100 TOC 总有机碳/总氮分析仪测定总碳 (TC, mg/L)、总有机碳 (TOC, mg/L)、总无机碳 (TIC, mg/L)、总氮 (TN, mg/L); 按照《海洋监测规范第6部分: 海洋生物调查》中的规定进行调查取样测定叶绿素  $a$  含量 (Chl.  $a$ ,  $\mu\text{g/L}$ )<sup>[33]</sup>。

#### 1.5 生物量碳密度及可移出碳汇能力评估

按照《海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查》<sup>[33]</sup> 中的规定稍作调整, 对养殖贻贝附着动物的生物量及生物量碳密度进行评估。由于养殖贻贝和附着动物生长空间的特殊性, 经测算发现以面积为单位计算不同季节养殖厚壳贻贝或附着动物的生物量、丰度及生物量碳密度存在极大的不准确性, 因此, 本研究最终以产量计算厚壳贻贝可移出碳量, 并通过贻贝产量计算附着动物的可移出碳量, 即需要调整附着动物生物量、生物量碳密度、丰度分别以每千克湿重厚壳贻贝附着动物的湿重、含碳率、数量计算, 单位分别为 g/kg、g/kg、个/kg。

参照《养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法 碳储量变化法》<sup>[34]</sup> 最新的行业标准提出的海水养殖贝类可移出碳汇核算体系, 本实验将贻贝养殖系统的可移出碳汇分为养殖贻贝储碳量和附着动物储碳量计算, 即养殖厚壳贻贝的可移出碳汇能力计算公式:

$$C_S = S_M + S_F \quad (6)$$

式中,  $C_S$  为可移出碳汇能力;  $S_M$  为可移出养殖贻贝储碳量;  $S_F$  为可移出附着生物储碳量。

$$S_M = S_S + S_T \quad (7)$$

式中,  $S_S$  为贝壳固碳量;  $S_T$  为软组织固碳量。

$$S_S = B \times R_C \times (1 - C_M) \times C_S \quad (8)$$

式中,  $B$  为生物量;  $C_S$  为壳含碳率。

$$S_T = B \times R_W \times (1 - W_M) \times C_T \quad (9)$$

式中,  $C_T$  为软组织含碳率。

用于检测的贻贝样品在测碳含量前使用 60 °C 烘箱烘干至恒重, 软体部和贝壳部分别研磨至 100 目过筛, 用 Thermo Flash Smart 型号元素分析仪测定含碳率 (精度  $\leq 0.1\%$ )。采用同样的方法测量附着生物可移出储碳量, 其中双壳类、腹足类、藤壶类分别测贝壳和软体部分的固碳量, 其他物种不进行壳和软体部分分离, 直接测定整体固碳量。

#### 1.6 数据分析

采用 R 语言和 SPSS 软件进行统计分析, 数据差异性采用单因子方差分析 (One-Way ANOVA),  $P < 0.05$  为差异显著。利用 Taylor 公式  $W = aL^b$  拟合厚壳贻贝的贝壳湿重-壳长、软组织湿重-壳长的关系, 式中  $L$  为壳长 (mm),  $W$  为湿重 (g),  $a$  为生长的条件因子,  $b$  为幂指数。

## 2 结果

### 2.1 壳长与贝壳重、软组织湿重的关系

选取各季度所采集的厚壳贻贝, 分析其壳长与贝壳重、软组织湿重的分布关系。厚壳贻贝的壳长 ( $L$ ) 与贝壳湿重 ( $C_W$ ) 的关系为  $C_W = 0.00010 \times L^{2.718}$  ( $n=880$ ,  $R^2=0.8460$ ), 而软组织湿重 ( $W_W$ ) 与  $L$  的关系为  $W_W = 0.00002 \times L^{2.99}$  ( $n=880$ ,  $R^2=0.6615$ ) (图 2)。

### 2.2 不同年龄厚壳贻贝生长特征的季节差异

春季 2 龄+贻贝的软组织含水率无显著差异, 夏、秋、冬季 1 龄贻贝的软组织含水率均显著高于 2 龄+贻贝 ( $P < 0.05$ ), 而 2 龄+贻贝之间无显著差异。各季节不同年龄贻贝的肥满度与软组织含水率呈现完全相反的趋势, 具体表现为各季度 1 龄贻贝的肥满度均显著低于 2 龄+

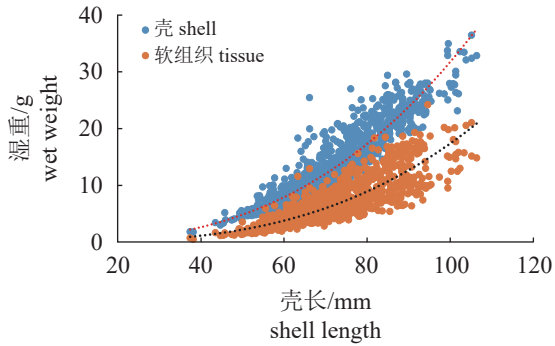


图2 厚壳贻贝壳长与壳湿重、软组织湿重的关系

Fig. 2 Relationship between shell length and shell weight, tissue weight of *M. coruscus*

贻贝 ( $P<0.05$ ), 而 2 龄+贻贝之间无显著差异。1 龄贻贝的性腺指数在秋季显著高于 2 龄+贻贝 ( $P<0.05$ ), 而 2 龄+贻贝的性腺指数在秋季无显著差异; 在其他季节, 年龄对贻贝性腺指数的高低表现出显著的决定性作用, 具体表现为 4 龄>3 龄>2 龄>1 龄 ( $P<0.05$ ) (图 3~图 5)。

### 2.3 不同养殖区域厚壳贻贝生长特征的季节差异

对不同站位的 2 龄+可收获厚壳贻贝的生长指标分析发现, 软组织含水率、肥满度、性腺指数存在显著的季节差异 ( $P<0.05$ ), 肥满度和性腺指数表现为夏季>秋季>冬季>春季, 软组织含水率则表现为相反的趋势。其中, 春季

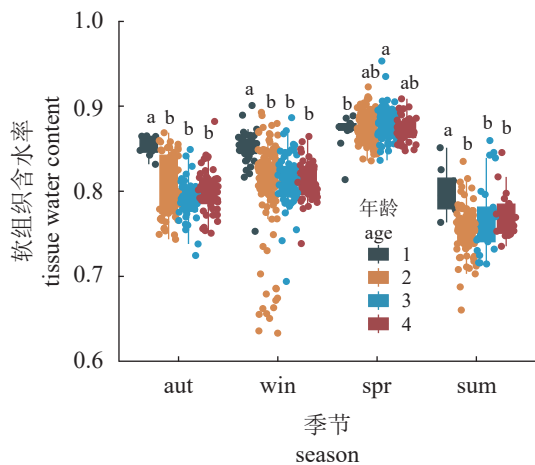


图3 不同年龄厚壳贻贝软组织含水率的季节差异

aut. 秋季, win. 冬季, spr. 春季, sum. 夏季; 不同字母代表存在显著差异 ( $P<0.05$ ); 下同。

Fig. 3 Seasonal differences in tissue water content of *M. coruscus* at different ages

aut. autumn, win. winter, spr. spring, sum. summer; different letters indicate significant difference ( $P<0.05$ ); the same below.

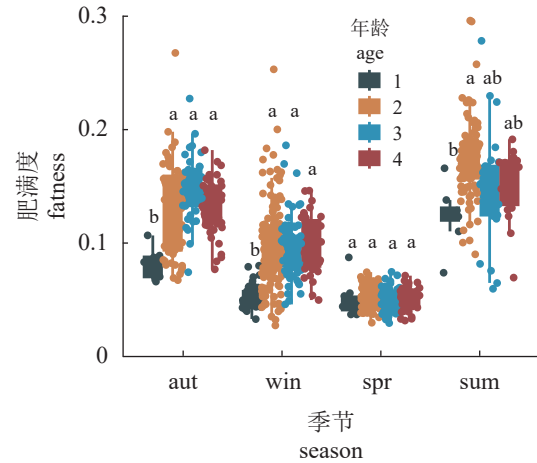


图4 不同年龄厚壳贻贝肥满度的季节差异

Fig. 4 Seasonal differences in fatness of *M. coruscus* at different ages

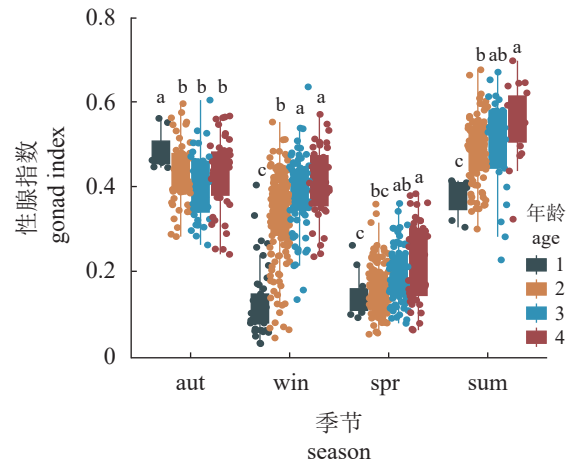


图5 不同年龄厚壳贻贝性腺指数的季节差异

Fig. 5 Seasonal differences in gonad index of *M. coruscus* at different ages

各站位之间软组织含水率、肥满度和性腺指数的波动范围较小, 但近岸软组织含水率显著高于远岸和中部, 近岸肥满度显著高于远岸, 中部性腺指数显著低于其他位置 ( $P<0.05$ )。夏季各位置软组织含水率无显著差异, 但近岸肥满度显著高于远岸, 近岸性腺指数显著高于远岸和中部 ( $P<0.05$ )。秋冬季节中部软组织含水率显著高于其他位置, 肥满度呈现相反的趋势 ( $P<0.05$ ); 秋季中部性腺指数显著高于远岸, 但冬季中部性腺指数显著低于其他位置 ( $P<0.05$ ) (图 6~图 8)。

### 2.4 厚壳贻贝含碳率等指标的季节差异

厚壳贻贝壳的含碳率在春季显著低于收获

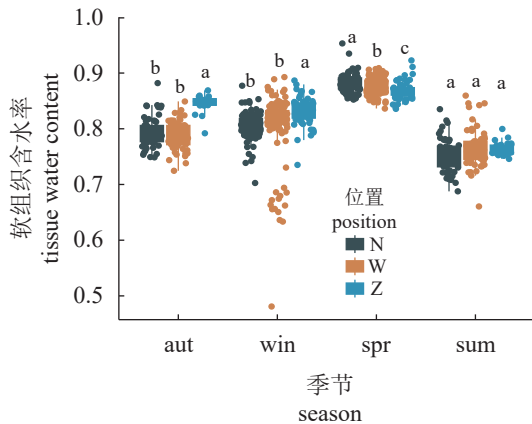


图 6 不同站位厚壳贻贝软组织含水率的季节差异

N. 近岸, W. 远岸, Z. 中部; 下同。

Fig. 6 Seasonal differences in tissue water content of *M. coruscus* at different sites

N. nearshore area, W. farshore area, Z. middle area; the same below.

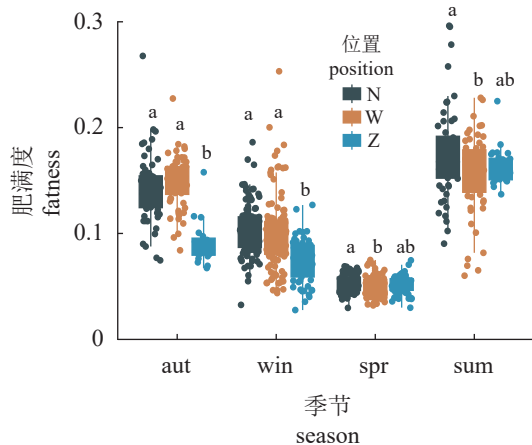


图 7 不同站位厚壳贻贝肥满度的季节差异

Fig. 7 Seasonal differences in fatness of *M. coruscus* at different sites

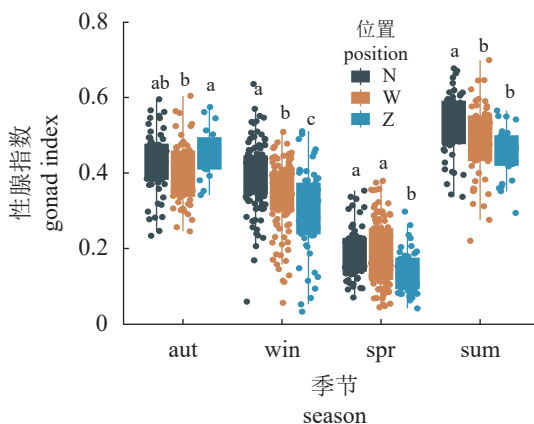


图 8 不同站位厚壳贻贝性腺指数的季节差异

Fig. 8 Seasonal differences in gonad index of *M. coruscus* at different sites

季节(夏、秋、冬) ( $P < 0.05$ ), 而收获季节间无显著差异。软组织含碳率在春季显著低于夏季和秋季, 其中秋季显著高于其他 3 个季节 ( $P < 0.05$ )。壳含水率在夏季显著高于其他季节 ( $P < 0.05$ )。软组织含水率在春季显著高于其他季节, 且夏季显著低于其他季节 ( $P < 0.05$ )。壳湿重比在各季节间均有显著差异, 具体表现为春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季 ( $P < 0.05$ ) (表 1)。

表 1 不同季节厚壳贻贝含碳率等指标的差异

Tab. 1 Seasonal differences in carbon indexes of *M. coruscus*

指标 index	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
壳含碳率/% (n=30) shell carbon content	0.13 <sup>a</sup>	0.15 <sup>b</sup>	0.16 <sup>b</sup>	0.15 <sup>b</sup>
软组织含碳率/% (n=30) tissue carbon content	0.41 <sup>a</sup>	0.43 <sup>b</sup>	0.45 <sup>c</sup>	0.43 <sup>ab</sup>
壳含水率/% (n=240) shell moisture content	0.021 <sup>a</sup>	0.027 <sup>b</sup>	0.023 <sup>a</sup>	0.021 <sup>a</sup>
软组织含水率/% (n=240) tissue moisture content	0.88 <sup>c</sup>	0.77 <sup>a</sup>	0.80 <sup>b</sup>	0.81 <sup>b</sup>
壳湿重比/% (n=240) shell wet weight ratio	0.71 <sup>d</sup>	0.62 <sup>b</sup>	0.60 <sup>a</sup>	0.67 <sup>c</sup>

注: 不同字母代表存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

Notes: Different letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ).

### 2.5 厚壳贻贝生长及含碳率等指标与环境因子的 RDA 分析

采用冗余分析 (RDA) 探究不同站位厚壳贻贝生长指标与环境因子之间的关联性, 轴 1 占总解释变量的 86.37% (图 9)。其中, TOC、TP、SRP、氨氮、氮气和轴 1 呈明显的负相关性, 与春季站位聚为一支。叶绿素 *a*、总氮、硝酸盐、亚硝酸盐、温度、盐度、TIC、N/P 和轴 1 呈明显的正相关性, 与夏秋季聚为一支。肥满度和氨氮含量有较强的负相关性, 而氨氮含量和软组织含水率二者呈较强正相关关系。影响软组织含碳率和性腺指数的主要环境因子为叶绿素 *a* 和总氮的含量 (图 9)。

### 2.6 附着动物的季节分布特征

2021—2022 年对枸杞岛的养殖区站位进行 4 个季度的调查, 共鉴定出附着动物 153 种, 其中秋季 74 种、冬季 56 种、春季 74 种、夏季 74 种, 分别隶属刺胞动物门 (Cnidaria)、软体动

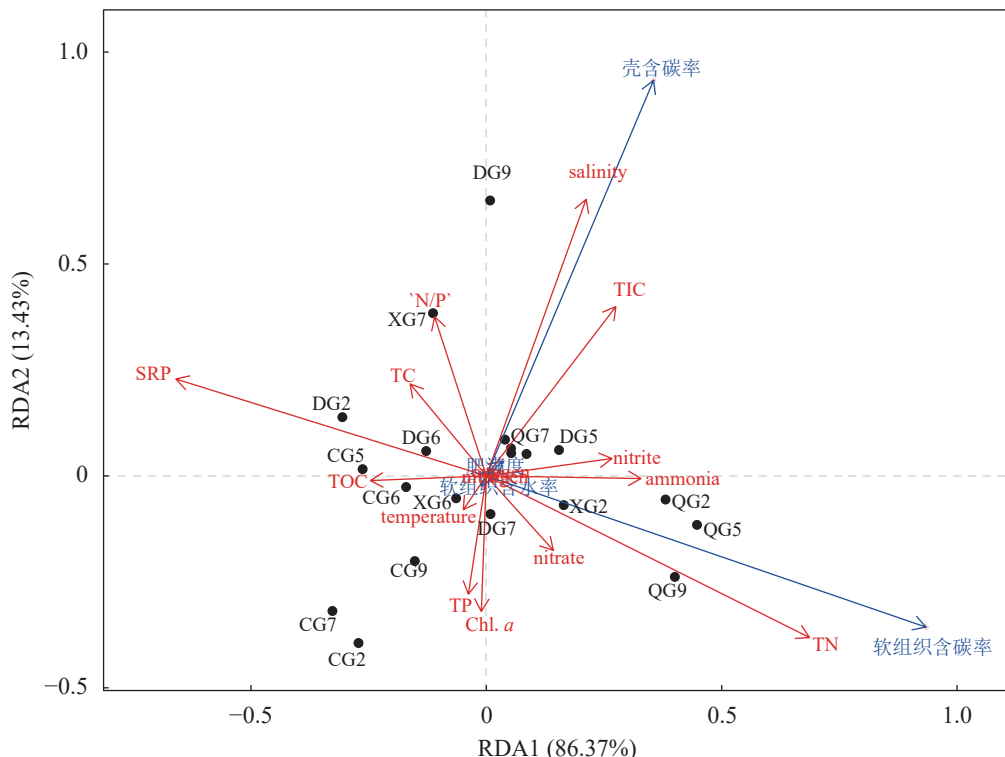


图 9 厚壳贻贝生长等指标与环境因子间的 RDA 分析

Fig. 9 RDA analysis between growth indexes of *M. coruscus* and environmental factors

物门 (Mollusca)、环节动物门 (Annelida)、节肢动物门 (Arthropoda)、棘皮动物门 (Echinodermata)、纽形动物门 (Nemertea) 及脊索动物门 (Chordata), 其中多毛纲 (Polychaeta)、软甲纲 (Malacostraca)、双壳纲 (Bivalvia)、腹足纲 (Gastropoda)、珊瑚纲 (Anthozoa)、鞘甲纲 (Thecostraca) 及海鞘纲 (Ascidiacea) 占主要组成部分 (图 10)。

春季附着动物的平均生物量最高, 达到 70.59 g/kg; 秋季次之, 达到 53.45 g/kg; 冬季为 48.43 g/kg; 夏季最低, 仅为 16.54 g/kg, 其中环节动物、甲壳动物、软体动物、刺胞动物、脊索动物 5 个门类的生物量之和均占各季度总生物量的 98% 以上 (图 11)。春季, 附着动物的生物量以绿侧花海葵 (*Anthopleura midori*) (22.16 g/kg)、网纹纹藤壶 (17.61 g/kg)、带偏顶蛤 (*Modiolus comptus*) (6.72 g/kg)、缪氏哲蟹 (*Menippe rumphii*) (4.62 g/kg)、短毛海鳞虫 (*Halosydna brevisetosa*) (4.02 g/kg) 为主。夏季, 网纹纹藤壶 (2.34 g/kg)、短毛海鳞虫 (2.00 g/kg)、绿侧花海葵 (1.94 g/kg)、日本侧花海葵 (*A. japonica*) (1.38 g/kg)、带偏顶蛤 (0.94 g/kg) 的生

物量最高。秋季, 黄侧花海葵 (*A. xanthogrammica*) (17.64 g/kg)、网纹纹藤壶 (10.33 g/kg)、带偏顶蛤 (7.69 g/kg)、疣荔枝螺 (*Thais clavigera*) (3.43 g/kg)、短毛海鳞虫 (2.1 g/kg) 的生物量最高。冬季, 网纹纹藤壶 (20.88 g/kg)、带偏顶蛤 (5.47 g/kg)、疣荔枝螺 (3.35 g/kg)、短毛海鳞虫 (2.49 g/kg)、条纹隔贻贝 (*Mytilisepta virgata*) (1.8 g/kg) 的生物量最高。

RDA 分析结果表明, 前两轴能够解释各层次生物量变化的 88.41%。其中, 软甲纲的分布与叶绿素 *a*、温度、总氮、总碳、盐度、亚硝酸盐呈明显正相关性, 与夏季聚为一支。蛇尾纲 (Ophiuroidea)、鞘甲纲、珊瑚纲的生物量与氨氮、硝酸盐呈较强正相关, 受其他环境因子影响较少 (图 12)。

### 2.7 厚壳贻贝及附着动物生物量碳密度及可移出碳汇能力的季节差异

根据计算公式和表 1, 可初步算出各季节仅养殖厚壳贻贝的可移出碳汇能力, 其中春季每千克厚壳贻贝可移出碳量为 108.29 g C, 夏季为 129.33 g C/kg, 秋季为 129.98 g C/kg, 冬季为 126.01 g C/kg, 收获季节 (夏、秋、冬) 比春



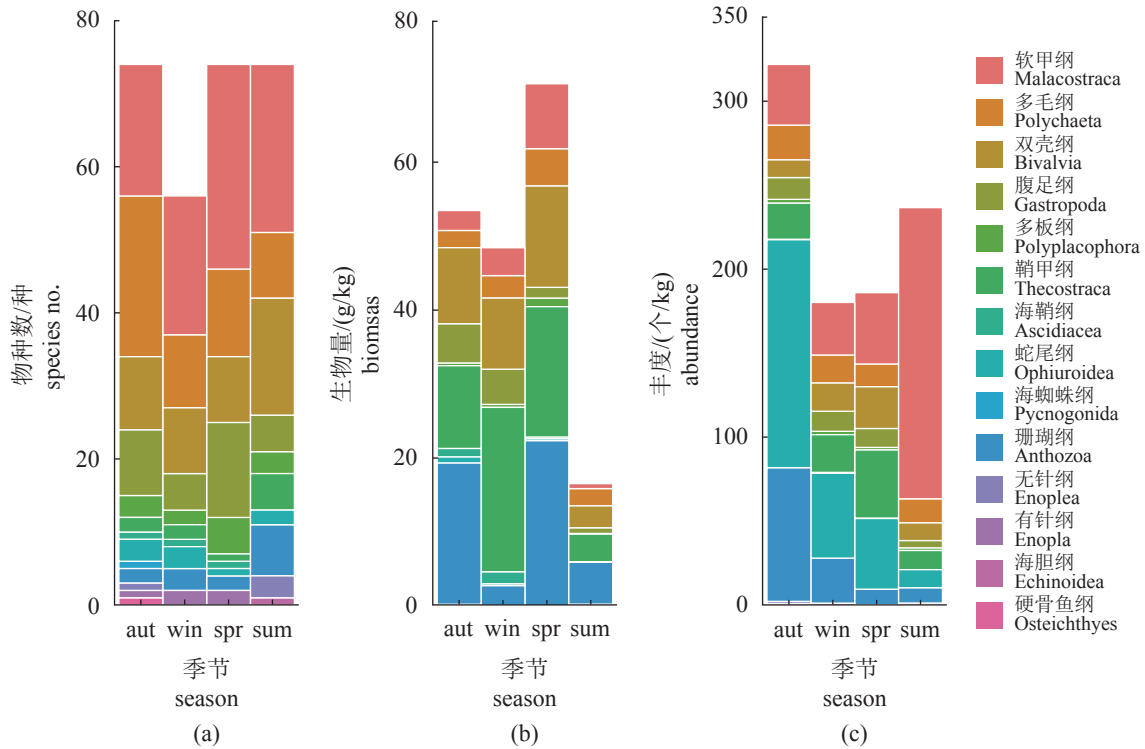


图 10 厚壳贻贝附着动物的物种数 (a)、生物量 (b) 及丰度 (c) 的季节变化

Fig. 10 Seasonal changes of species numbers (a), biomass (b) and abundance (c) of epiphytic animals of *M. coruscus*

季每千克贻贝多移出约 20 g C。

对附着生物含碳率、含水率、壳湿重比、生物量等可移出碳汇相关参数的测定结果见表 2。通过标准化处理计算得到贻贝及附着动物的生物量碳密度, 其中春季的附着动物碳密度最高达到了 6.85 g C/kg, 冬季 5.55 g C/kg 次之, 其次为秋季 5.36 g C/kg, 夏季最低为 1.38 g C/kg。春季和夏季固碳量最高的物种为网纹纹藤壶, 其次是海葵类; 秋季固碳量最高的物种为海葵类 (1.23 g C/kg), 其次为带偏顶蛤 1.22 g C/kg、网纹纹藤壶 1.14 g C/kg; 冬季固碳量最高的物种为网纹纹藤壶 2.3 g C/kg, 其次为带偏顶蛤 0.86 g C/kg。附着动物碳密度总体呈现出与附着动物生物量正相关的趋势。

综上得出春季每千克厚壳贻贝共可移出碳为 115.14 g C, 夏季为 130.71 g C, 秋季为 135.34 g C, 冬季为 131.56 g C。

### 3 讨论

#### 3.1 厚壳贻贝生长差异分析

枸杞岛养殖厚壳贻贝的生长指标分析结果表明, 肥满度和性腺指数符合夏>秋>冬>春的季节变化规律,

各季节贻贝的肥满度与软组织含水率呈现完全相反的趋势, 且 1 龄贻贝的肥满度均显著低于 2 龄+贻贝, 而 2 龄+贻贝之间无显著差异, 这与程亮等<sup>[30]</sup>研究结果相一致。水温、饵料浓度等环境因子是影响厚壳贻贝生长和性腺发育的重要因素, 这与对贻贝生长特征的研究结果相符<sup>[35-37]</sup>。在一定的温度范围内, 随着温度的升高, 贝类的摄食率、生长速率和性腺发育速率均会增加<sup>[38-41]</sup>, 夏秋季节是贻贝快速生长和性腺发育的主要阶段, 其性腺指数和肥满度也处于全年中最高水平<sup>[42-43]</sup>。冬季水温降低且水体浊度升高, 贻贝的滤食率有所降低, 使贻贝生长缓慢甚至消耗夏秋季积累在脂肪的能量<sup>[44]</sup>。到了春季水温有所回升, 厚壳贻贝进入生殖期, 随后性腺由排放期向增殖期转变, 经历排精排卵等生殖活动后贻贝消耗大量的能量, 因此肥满度和性腺指数降至最低, 软组织含水率升至最高<sup>[30, 45]</sup>。研究表明糖原是海洋贝类的主要能量载体, 在成贝配子形成时提供能量, 并且性腺-内脏团是储存糖原的主要器官<sup>[46]</sup>, 因此相较于 2 龄和 3 龄贻贝, 1 龄贻贝为了达到首次性成熟可能需要积累更多的能量用于性腺发育, 从而会更晚时间甚至到秋季才开始产卵。



秋冬季节, 养殖区外围站位的贻贝肥满度显著高于中部站位, 可能是因为养殖区边缘海水流动交换较快, 多为东南至西北间往返复流<sup>[47]</sup>,

水质优良并且有外来的饵料补充, 食物竞争压力小, 环境条件更利于贻贝的生长, 这与陈清满<sup>[47]</sup>测得枸杞岛后头湾养殖区外围紫贻贝 (*M.*

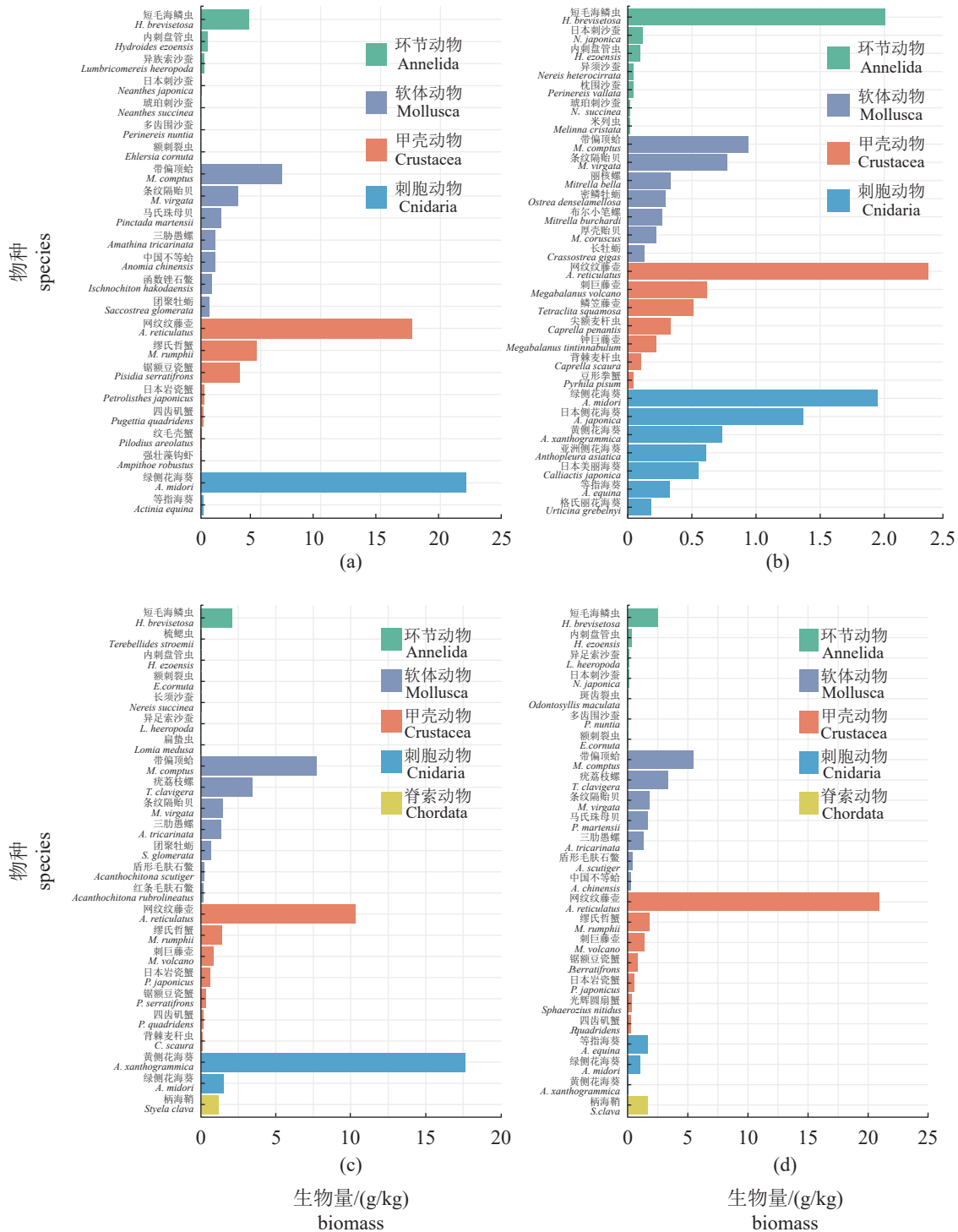


图 11 厚壳贻贝主要附着动物的生物量季节变化

(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季。每个纲列出排名前 7 的物种。

Fig. 11 Seasonal changes of biomass of primary epiphytic animals of *M. coruscus*

(a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter. The top 7 species in each class were listed.

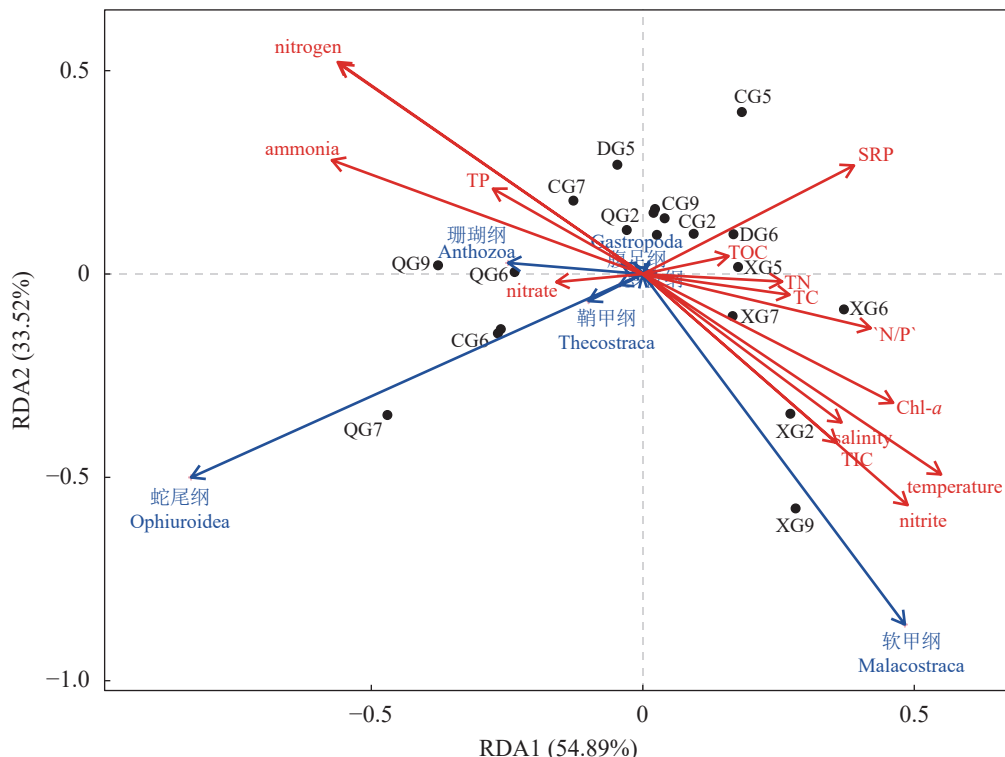


图 12 附着动物生物量与环境因子间的 RDA 分析

Fig. 12 RDA analysis between biomass of primary epiphytic animals and environmental factors

*galloprovincialis*) 生长速率大于养殖区中间区域基本一致。厚壳贻贝软组织和壳的含碳率在春季显著低于夏、秋、冬三季, RDA 分析表明, 软组织含碳率和水体叶绿素 *a* 含量呈明显正相关。本研究显示春季养殖区饵料浓度较低, 限制了贻贝的生长过程。另外, 3 月是厚壳贻贝生殖活动的高峰期<sup>[30]</sup>, 排精和排卵过程消耗了大量的碳, 因此, 春季 4 月调查其软组织的含碳率较低, 而到秋季, 贻贝的生长速率减缓, 性腺发育成熟, 因此软组织的含碳率较高, 与关莹莹等<sup>[48]</sup> 对枸杞岛养殖区贻贝生长调查结果基本一致。然而对比发现, 本研究在 2021 年采集于枸杞岛的养殖厚壳贻贝相比 2013 年采集于东极岛、2001 年采集于枸杞岛的养殖厚壳贻贝要瘦小很多<sup>[35, 49]</sup>, 2021 与 2013 年贻贝的贝壳重 ( $C_W$ ) 与壳长 ( $L$ ) 的关系未发生改变, 均为  $C_W=0.0001 \times L^{2.718}$ , 软组织湿重 ( $W_W$ ) 与  $L$  的关系分别为  $W_W=0.00002 \times L^{2.99}$  和  $W_W=0.00003 \times L^{3.1}$ , 同等壳长的情况下 2021 年可收获贻贝 (>7 cm 夏秋季) 的软体湿重不足 2013 年贻贝软体湿重的 50%, 总湿重也不足 2001 年贻贝总湿重的 50%。造成贻贝质量下降的根本原因可能是养殖密度过高, 已大大超过养殖区的养殖容量。

### 3.2 附着生物可移出碳汇的季节差异

不同的附着动物的生物量和丰度有明显的季节更替现象, 春季和秋季的绿侧花海葵生物量超过 17 g/kg, 而夏季和冬季仅不到 2 g/kg, 春季、秋季和冬季的网纹纹藤壶生物量超过 20 g/kg, 而夏季仅约 2 g/kg, 这也是造成夏季附着动物的整体生物量偏低的主要原因。经调查得知, 由于海葵营养和经济价值较高, 贻贝养殖户全年有采集贻贝、苗绳和浮子上附着的海葵的习惯, 其中夏季海葵生物量最高, 每串贻贝上可收获高达约 1 kg 的海葵, 冬季也可收获 0.4 kg 海葵, 因此渔民的采集活动可能是导致夏季调查海葵生物量偏低的主要原因。此外夏季是贻贝生长旺季, 大量摄食水体中的饵料<sup>[48]</sup>, 增加了滤食性生物的食物竞争压力, 导致一些滤食性的藤壶无法适应生境而死亡。另外, 夏季麦秆虫大量繁殖, 多棘麦秆虫 (*Caprella acanthogaster*) 主要以悬浮的动物幼虫为食<sup>[50]</sup>, 可能会限制其他附着动物的繁殖。在全年贻贝养殖过程中, 网纹纹藤壶、海葵类、带偏顶蛤作为优势种占据了与贻贝相似的生态位, 这与梁君等<sup>[23]</sup>、任黎华<sup>[51]</sup> 对养殖区附着生物调查优

表 2 不同季节厚壳贻贝附着动物生物量及碳储量差异

Tab. 2 Seasonal differences in biomass accumulation and stored carbon of epiphytic animals on *M. coruscus*

门 phylum	物种分类 classification	含碳率/% carbon content	含水率/% moisture content	$R_C$ /%	spr $B_M$ / (g/kg)	sum $B_M$ / (g/kg)	aut $B_M$ / (g/kg)	win $B_M$ / (g/kg)	spr $S_C$ / (g C/kg)	sum $S_C$ / (g C/kg)	aut $S_C$ / (g C/kg)	win $S_C$ / (g C/kg)	
甲壳动物 Crustacea	网纹纹藤壶 <i>A. reticulatus</i>	11.81 (S) 20.63 (T)	2.99 62.90	88.00	17.61	2.34	10.33	20.88	1.94	0.26	1.14	2.30	
	刺巨藤壶 <i>M. volcano</i>	13.70 (S) 20.61 (T)	3.15 62.93	88.41	0	0.61	0.84	1.34	0.00	0.08	0.11	0.17	
	鳞笠藤壶 <i>T. squamosa</i>	21.62 (S) 43.65 (T)	3.32 63.75	89.63	0	0.51	0	0	0.00	0.10	0.00	0.00	
	日本岩瓷蟹 <i>P. japonicus</i>	33.32	71.56	/	0.27	0	0.60	0.56	0.03	0.00	0.06	0.05	
	锯额豆瓷蟹 <i>P. serratifrons</i>	34.84	76.92	/	3.24	0.02	0.34	0.80	0.26	0.00	0.03	0.06	
	缪氏哲蟹 <i>M. rumphii</i>	33.76	64.50	/	4.64	0	1.41	1.76	0.56	0.00	0.17	0.21	
	四齿矶蟹 <i>P. quadridens</i>	58.42	52.81	/	0.21	0	0.14	0.28	0.06	0.00	0.04	0.08	
	钩虾类 Gammaridea	35.03	84.62	/	0.14	0.05	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	
	麦秆虫类 Caprellidea	4.3	87.50	/	0.09	0.52	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
	软体动物 Mollusca	条纹隔贻贝 <i>S. virgatus</i>	18.00 (S) 36.50 (T)	1.44 50.63	71.34	3.09	0.77	1.44	1.80	0.55	0.14	0.26	0.32
		带偏顶蛤 <i>M. comptus</i>	15.60 (S) 45.60 (T)	2.88 56.89	85.53	6.72	0.94	7.69	5.47	1.06	0.15	1.22	0.86
密鳞牡蛎 <i>O. denselamellosa</i>		14.53 (S) 46.13 (T)	2.47 53.92	90.00	0	0.30	0	0	0.00	0.04	0.00	0.00	
中国不等蛤 <i>A. chinensis</i>		13.26 (S) 43.14 (T)	2.56 33.73	70.00	1.16	0.08	0.11	0.26	0.20	0.01	0.02	0.05	
云石肌蛤 <i>Musculus cupreus</i>		20.60	45.28	/	0	0.09	0	0	0.00	0.01	0.00	0.00	
马氏珠母贝 <i>P. martensii</i>		15.30	26.70	/	1.67	0.05	0	1.64	0.19	0.01	0.00	0.18	
疣荔枝螺 <i>T. clavigera</i>		17.13 (S) 47.28 (T)	2.56 52.66	73.14	0	0	3.43	3.34	0.00	0.00	0.62	0.61	
三肋愚螺 <i>A. tricarinata</i>		15.44 (S) 41.70 (T)	2.43 4.98	56.07	1.19	0.12	1.37	1.33	0.31	0.03	0.35	0.34	
丽小笔螺 <i>M. bella</i>		30.44	30.23	/	0.01	0.33	0.12	0	0.00	0.07	0.03	0.00	
布尔小笔螺 <i>M. burchardi</i>		26.23	29.56	/	0.08	0.27	0.05	0.05	0.01	0.05	0.01	0.01	
石鳖类 Polyplacophora		19.84	40.70	/	1.17	0.10	0.38	0.40	0.14	0.01	0.04	0.05	
环节动物 Annelida		裂虫类 Syllidae	39.83	86.84	/	0.01	0	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
		沙蚕类 Nereididae	5.56	88.63	/	4.42	2.24	2.25	2.68	0.03	0.01	0.01	0.02
	盘管虫类 Hydroides	13.56	26.14	/	0.57	0.10	0.04	0.33	0.06	0.01	0.00	0.03	
	纽虫类 Nemertea	39.59	81.54	/	0.08	0.03	0.02	0.07	0.01	0.00	0.00	0.01	

· 续表 2 ·

门 phylum	物种分类 classification	含碳率/% carbon content	含水率/% moisture content	$R_C$ /%	spr $B_M$ / (g/kg)	sum $B_M$ / (g/kg)	aut $B_M$ / (g/kg)	win $B_M$ / (g/kg)	spr $S_C$ / (g C/kg)	sum $S_C$ / (g C/kg)	aut $S_C$ / (g C/kg)	win $S_C$ / (g C/kg)
棘皮动物 Echinodermata	蛇尾类 Ophiuroidea	1.62	38.80	/	0.23	0.05	0.79	0.23	0.00	0.00	0.01	0.00
	马粪海胆 <i>Hemicentrotus pulcherrimus</i>	16.72	53.94	/	0	0.19	0	0	0.00	0.01	0.00	0.00
脊索动物 Chordata	柄海鞘 <i>S. clava</i>	13.43	91.86	/	0.26	0	1.16	1.64	0.00	0.00	0.01	0.02
刺胞动物 Cnidaria	海葵类 Actiniaria	41.85	84.63	/	22.35	5.71	19.14	2.69	1.44	0.37	1.23	0.17
总计 total					69.21	15.42	51.8	47.64	6.85	1.38	5.36	5.55

注: S. 壳, T. 软组织,  $R_C$ . 壳湿重占比,  $B_M$ . 生物量,  $S_C$ . 储碳量。

Notes: S. shell, T. soft tissue,  $R_C$ . shell wet weight ratio,  $B_M$ . biomass,  $S_C$ . stored carbon.

势种类高度相似。另外, 由于本研究仅调查了贻贝贝体及苗绳上的附着动物, 而忽略了缆绳以及浮球上的附着生物, 但实际上这部分附着了大量的大型藻类、海葵、双壳类、节肢动物, 其生物量碳密度可能远高于贝体及苗绳上的附着动物, 并且养殖户会定期清理附着的大型藻类, 实际可移出碳汇量会更高, 因此缆绳和浮球附着生物发挥的固碳作用也不能被忽视。因此, 枸杞岛贻贝养殖过程中共存着物种多样性、生物量、丰度均较高的附着生物群落, 具有极其可观的潜在碳汇功能<sup>[4]</sup>。

### 3.3 综合可移出碳汇能力评估

贝类通过吸收利用水体中的碳而形成贝壳和软组织中的碳需要通过长周期的生物地球化学循环才会再回到大气中<sup>[52]</sup>。因此, 根据养殖产量和养殖生物体碳含量的计算能够简单有效定量评估贝类可移出碳汇量, 对于海洋渔业碳汇交易机制的建立和发展具有重要意义。针对枸杞岛贻贝养殖区, 秋季贻贝和附着生物的碳密度均保持在较高水平, 综合碳密度可达 135.34 g C/kg, 2021 年通过收获贻贝可移出约  $3.02 \times 10^4$  t C, 基于李昂等<sup>[53]</sup>的碳汇价值测算模型, 综合可产生的碳汇经济价值约为 1 049 万元。因此, 秋季收获贻贝可以最大限度发挥可移出碳汇能力, 同时秋季贻贝肥满度也保持在较高水平, 能够满足市场需求。另外, 2 龄+贻贝含碳率虽无显著差异, 但 2 龄贻贝的年生长及固碳速率比 3 龄及 4 龄贻贝高出约 23 %<sup>[35]</sup>, 因此, 收获充分生长的 2 龄贻贝理论上可以更高效地实现渔业碳汇价值。结合梁君等<sup>[49]</sup>对舟

山中街山列岛养殖厚壳贻贝生长规律的研究, 本研究认为, 在保证产业需求和养殖经济效益的前提下, 可对收获贻贝的年龄比例做适当调整, 提升贻贝养殖的可移出碳汇能力, 实现增汇。另外, 根据采样数据统计得到单根苗绳生长贻贝的平均数量为 1 250 个, 估得枸杞岛养殖 2 龄、3 龄、4 龄贻贝平均每根 2.8 m 长的苗绳到收获季节可收获得贻贝及附着动物湿重约为 22.3、40.5 和 51.3 kg, 分别固碳 2.9、5.3 和 6.7 kg, 单根苗绳的产量和固碳量远高于桑沟湾 2.5 m 养殖长牡蛎 (*Crassostrea gigas*) 苗绳收获季节可收获牡蛎湿重 (约 15 kg) 和固碳量 (约 0.9 kg C)<sup>[51]</sup>。然而贻贝肥满度的下降可能会显著影响其生物固碳量, 目前实际贻贝的固碳收益效率可能不足 20 年前的一半, 因此合理控制养殖密度和改善养殖结构不仅能够改善贻贝的质量, 还能大大提高其固碳收益的效率。

## 4 结论

本研究评估了枸杞岛养殖厚壳贻贝及其附着生物可移出碳汇量的季节演替规律, 进一步完善了贝类可移出碳汇的评估方法, 提出了固碳增汇的贻贝养殖管理建议, 研究结果为完善海洋碳交易体系提供了重要参考依据。

### 参考文献 (References):

- [1] 张继红, 刘毅, 吴文广, 等. 海洋渔业碳汇项目方法学探究 [J]. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 151-159.  
Zhang J H, Liu Y, Wu W G, et al. Overview of the marine fish-



- ery carbon sink project methodology[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(5): 151-159 (in Chinese).
- [ 2 ] 王江海, 孙贤贤, 徐小明, 等. 海洋碳封存技术: 现状、问题与未来 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30(1): 17-25.  
Wang J H, Sun X X, Xiu X M, *et al.* Marine carbon sequestration: current situation, problems and future[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(1): 17-25.
- [ 3 ] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2023 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.  
Bureau of Fisheries and Aquaculture Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2023 China fisheries statistical yearbook[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2023 (in Chinese).
- [ 4 ] 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.  
Tang Q S, Jiang Z J, Mao Y Z. Clarification on the definitions and its relevant issues of fisheries carbon sink and carbon sink fisheries[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(5): 1-7 (in Chinese).
- [ 5 ] Ren W H. Study on the removable carbon sink estimation and decomposition of influencing factors of mariculture shellfish and algae in China—a two-dimensional perspective based on scale and structure[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(17): 21528-21539.
- [ 6 ] 张永雨, 张继红, 梁彦韬, 等. 中国近海养殖环境碳汇形成过程与机制 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(12): 1414-1424.  
Zhang Y Y, Zhang J H, Liang Y T, *et al.* Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(12): 2097-2107.
- [ 7 ] Jin D, Hoagland P, Buesseler K O. The value of scientific research on the ocean's biological carbon pump[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 749: 141357.
- [ 8 ] Van Der Schatte Olivier A, Le Vay L, Malham S K, *et al.* Geographical variation in the carbon, nitrogen, and phosphorus content of blue mussels, *Mytilus edulis*[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112291.
- [ 9 ] 蒋增杰, 方建光, 毛玉泽, 等. 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*, 2022, 43(5): 106-114.
- Jiang Z J, Fang J G, Mao Y Z, *et al.* Research progress on the carbon sink function of filter-feeding shellfish mariculture and future scientific issues[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(5): 106-114 (in Chinese).
- [10] 李娇, 李梦迪, 公丕海, 等. 海洋牧场渔业碳汇研究进展 [J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 142-150.  
Li J, Li M D, Gong P H, *et al.* Research progress on fishery carbon sinking associated with marine ranching[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(5): 142-150 (in Chinese).
- [11] 权伟, 应苗苗, 康华靖, 等. 浙江近海贝类养殖及其碳汇强度研究 [J]. *渔业现代化*, 2014, 41(5): 35-38.  
Quan W, Ying M M, Kang H J, *et al.* The study of shellfish mariculture and carbon sink capacity in the coastal areas of Zhejiang Province[J]. *Fishery Modernization*, 2014, 41(5): 35-38 (in Chinese).
- [12] 杨晓龙, 张秀梅, 唐文海, 等. 浙江省贝藻海水养殖碳汇能力及经济价值评估 [J]. *浙江海洋大学学报 (自然科学版)*, 2023, 42(3): 248-254.  
Yang X L, Zhang X M, Tang W H, *et al.* Assessment of carbon sink capacity and economic value of shellfish and algae mariculture in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition)*, 2023, 42(3): 248-254 (in Chinese).
- [13] 孙雪峰, 陈爱华, 张雨, 等. 江苏省海水养殖贝藻类碳汇能力评估 [J]. *水产养殖*, 2022, 43(8): 8-12.  
Sun X F, Chen A H, Zhang Y, *et al.* Potential assessment of carbon sink capacity by bivalves and seaweeds in mariculture in Jiangsu Province[J]. *Journal of Aquaculture*, 2022, 43(8): 8-12 (in Chinese).
- [14] 赵祺, 张云岭, 崔晨, 等. 河北省海水贝藻养殖碳汇强度评估与脱钩分析 [J]. *河北渔业*, 2022(5): 35-39,44.  
Zhao Q, Zhang Y L, Cui C, *et al.* Carbon sink intensity assessment and decoupling analysis of shellfish and macroalgae marine culture in Hebei Province[J]. *Hebei Fisheries*, 2022(5): 35-39,44 (in Chinese).
- [15] 高源, 付忠伟, 张兆敏. 中国海洋渔业碳排放减排潜力及预测 [J]. *广东海洋大学学报*, 2022, 42(3): 39-44.  
Gao Y, Fu Z W, Zhang Z M. Analysis and prediction of carbon emission reduction potential of marine fishery in China[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2022, 42(3): 39-44 (in Chinese).

- Chinese).
- [16] 常佳楠, 段元亮, 张建琳, 等. 枸杞岛贻贝养殖海域碳通量及固碳能力研究 [J]. *中国水产科学*, 2022, 29(11): 1589-1600.
- Chang J N, Duan Y L, Zhang J L, *et al.* Carbon flux and carbon sequestration capacity in a shellfish culture area of Gouqi Island[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(11): 1589-1600 (in Chinese).
- [17] 彭鹏飞, 马媛, 史荣君, 等. 考洲洋牡蛎养殖海域海-气界面 CO<sub>2</sub> 交换通量的时空变化 [J]. *海洋科学*, 2022, 46(10): 140-149.
- Peng P F, Ma Y, Shi R J, *et al.* Temporal and spatial variation in the sea-air CO<sub>2</sub> flux in the oyster aquaculture area of Kaozhou Bay[J]. *Marine Sciences*, 2022, 46(10): 140-149 (in Chinese).
- [18] 韦章良, 韩红宾, 胡明, 等. 三沙湾盐田港海水养殖海域海-气界面 CO<sub>2</sub> 交换通量的时空变化 [J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(1): 106-115.
- Wei Z L, Han H B, Hu M, *et al.* Seasonal variation of sea-air CO<sub>2</sub> flux in mariculture area in Yantian Harbor, Sansha Bay[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(1): 106-115 (in Chinese).
- [19] Mahmood T, Fang J G, Jiang Z J, *et al.* Seasonal distribution, sources and sink of dissolved organic carbon in integrated aquaculture system in coastal waters[J]. *Aquaculture International*, 2017, 25(1): 71-85.
- [20] Feng J C, Sun L W, Yan J Y. Carbon sequestration via shellfish farming: a potential negative emissions technology[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 171: 113018.
- [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 (in Chinese).
- [22] 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 and net organic production of cultivated and fouling organisms in Sishili Bay and their ecological effects[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, 26(1): 21-27 (in Chinese).
- [23] 梁君, 王伟定, 虞宝存, 等. 东极海洋牧场厚壳贻贝筏式养殖区可移出碳汇能力评估 [J]. *浙江海洋学院学报 (自然科学版)*, 2015, 34(1): 9-14.
- Liang J, Wang W D, Yu B C, *et al.* Evaluation on removable carbon sink capability of raft culture zones of *Mytilus coruscus* for the marine ranching in Dongji Islands[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition)*, 2015, 34(1): 9-14 (in Chinese).
- [24] Webb J L, Vandenbor J, Pirie B, *et al.* Effects of temperature, diet, and bivalve size on the ingestion of sea lice (*Lepeophtheirus salmonis*) larvae by various filter-feeding shellfish[J]. *Aquaculture*, 2013, 406-407: 9-17.
- [25] Hu B J, Zhou J, Dong J Y, *et al.* Association of algae diversity and *Hyriopsis schlegelii* growth in mixed fish-mussel aquaculture[J]. *Algal Research*, 2022, 65: 102736.
- [26] Bertolini C, Bernardini I, Brigolin D, *et al.* 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*, 2021, 78(6): 2082-2091.
- [27] 张继红, 方建光, 唐启升, 等. 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*, 2013, 34(1): 12-16.
- Zhang J H, Fang J G, Tang Q S, *et al.* Carbon sequestration rate of the scallop *Chlamys farreri* cultivated in different areas of Sanggou Bay[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 12-16 (in Chinese).
- [28] 陈清满, 章守宇, 林军, 等. 枸杞岛紫贻贝生长状况及其与环境因子关系 [J]. *上海海洋大学学报*, 2012, 21(5): 809-815.
- Chen Q M, Zhang S Y, Lin J, *et al.* Growth conditions of *Mytilus edulis* Linnaeus and its relationship with environmental factors in Gouqi Island[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(5): 809-815 (in Chinese).
- [29] 温英, 林军, 杨冠林, 等. 贻贝浮筏养殖设施水动力效应及附生海藻碎屑运输的数值模拟 [J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(6): 1549-1561.
- Wen Y, Lin J, Yang G L, *et al.* Study on hydrodynamic effect of suspended mussel aquaculture facilities and detritus transportation of epiphytic seaweed[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(6): 1549-1561 (in Chinese).
- [30] 程亮, 徐善良, 刘飞, 等. 厚壳贻贝性腺不同发育时期肥满度

- 与生化成分分析 [J]. 海洋学研究, 2013, 31(4): 68-73.
- Cheng L, Xu S L, Liu F, *et al.* Study on the meat condition index and biochemical compositions of *Mytilus coruscus* in different gonad development stages[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2013, 31(4): 68-73 (in Chinese).
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第 6 部分: 生物体分析: GB 17378.6-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The specification for marine monitoring—Part 6: organism analysis: GB 17378.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese)
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第 4 部分: 海水化学要素调查: GB/T 12763.4—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey—Part 4: survey of chemical parameters in sea water: GB/T 12763.4-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese)
- [33] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查: GB/T 12763.6—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey—part 6: marine biological survey: GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese)
- [34] 中华人民共和国自然资源部. 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[S].
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Estimation method of maricultural seaweed and bivalve carbon sink—carbon stock variation method: HY/T 0305-2021[S]. (in Chinese)
- [35] 张义浩, 赵盛龙. 嵊山列岛贻贝养殖种类生长发育调查 [J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2003, 22(1): 67-73.
- Zhang Y H, Zhao S L. Mussel species and growth developing investigation around Shengshan archipelago[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition)*, 2003, 22(1): 67-73 (in Chinese).
- [36] 林军, 邓明星, 章守宇, 等. 贻贝养殖海域表层水温季节变化及其对紫贻贝生长的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(6): 918-926.
- Lin J, Deng M X, Zhang S Y, *et al.* Seasonal variation of surface water temperature and its ecological impacts in a mussel aquaculture farm[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(6): 918-926 (in Chinese).
- [37] Azpeitia K, Ferrer L, Revilla M, *et al.* Growth, biochemical profile, and fatty acid composition of mussel (*Mytilus galloprovincialis* Lmk.) cultured in the open ocean of the Bay of Biscay (northern Spain)[J]. *Aquaculture*, 2016, 454: 95-108.
- [38] 吴静. 温度和盐度对华贵栉孔扇贝 (*Mimachlamys nobilis* Reeve) 存活、免疫指标及生理指标的影响 [D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- Wu J. Effects of temperature and salinity on survival, immune indexes and physiological indexes of *Mimachlamys nobilis* Reeve[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2019 (in Chinese).
- [39] Laing I. Effect of temperature and ration on growth and condition of king scallop (*Pecten maximus*) spat[J]. *Aquaculture*, 2000, 183(3-4): 325-334.
- [40] Steinarsson A, Imsland A K. Size dependent variation in optimum growth temperature of red abalone (*Haliotis rufescens*)[J]. *Aquaculture*, 2003, 224(1-4): 353-362.
- [41] Marshall R, Scott McKinley R, Pearce C M. Effect of temperature on gonad development of the Pacific geoduck clam (*Panopea generosa* Gould, 1850)[J]. *Aquaculture*, 2012, 338-341: 264-273.
- [42] Thorarinsdóttir G G, Gunnarsson K. Reproductive cycles of *Mytilus edulis* L. on the west and east coasts of Iceland[J]. *Polar Research*, 2003, 22(2): 217-223.
- [43] Smaal A C, Vonck A P M A. Seasonal variation in C, N and P budgets and tissue composition of the mussel *Mytilus edulis*[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 153(1): 167-179.
- [44] 付英杰. 两种养殖模式下枸杞岛紫贻贝的生长特征及其对水域水质的影响 [D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2014.
- Fu Y J. The growth characteristics of *Mytilus edulis* Linnaeu in Gouqi Island and its effect on the water quality[D]. Zhoushan:

- Zhejiang Ocean University, 2014 (in Chinese).
- [45] 毛江静, 童巧琼, 曹潇, 等. 厚壳贻贝人工促熟与自然成熟亲贝的饱满度与营养成分比较 [J]. *生物学杂志*, 2017, 34(5): 53-56.
- Mao J J, Tong Q Q, Cao X, *et al.* Differences of fatness and nutrient content in artificially and naturally ripened *Mytilus coruscus*[J]. *Journal of Biology*, 2017, 34(5): 53-56 (in Chinese).
- [46] 邓传敏, 孔令锋, 于瑞海, 等. 长牡蛎壳金选育群体性腺发育与营养成分的周年变化 [J]. *中国水产科学*, 2017, 24(1): 40-49.
- Deng C M, Kong L F, Yu R H, *et al.* Seasonal variation in gonadal development and nutritive components in the golden shell colored strain of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(1): 40-49 (in Chinese).
- [47] 陈清满. 枸杞岛海域养殖紫贻贝生长与生态因子关系初步研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- Chen Q M. Preliminary research on the relationship between growth conditions of *Mytilus edulis* Linnaeus and ecological factors in Gouqi island[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012 (in Chinese).
- [48] 关莹莹, 林军, 焦俊鹏, 等. 高滤食压力下贻贝筏式养殖场及周边海域浮游植物群落特征 [J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(4): 543-553.
- Guan Y Y, Lin J, Jiao J P, *et al.* The characteristics of phytoplankton community of mussel raft farms and surrounding waters under high filtration pressure[J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(4): 543-553 (in Chinese).
- [49] 梁君, 虞宝存, 毕远新, 等. 中街山列岛海域厚壳贻贝生物学特征及生长规律 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(2): 471-476.
- Liang J, Yu B C, Bi Y X, *et al.* The biological characteristics and growth patterns of *Mytilus coruscus* in the waters of Zhongjieshan Islands[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(2): 471-476 (in Chinese).
- [50] 魏龔伟. 桑沟湾污损生物—多棘麦杆虫的基础生态学研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
- Wei Y W. Basic ecology research on biofouling *Caprella acanthogaster* in Sungao Bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014 (in Chinese).
- [51] 任黎华. 桑沟湾筏式养殖长牡蛎及其主要滤食性附着生物固碳功能研究 [D]. 青岛: 中国科学院大学海洋研究所, 2014.
- Ren L H. Research on carbon sequestration of cultured oyster *Crassostrea gigas* and its fouling organisms in Sungo Bay[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [52] 尹钰文, 车鉴, 魏海峰, 等. 辽宁省 2010—2019 年海水养殖贝藻类碳汇能力评估 [J]. *海洋开发与管理*, 2022, 39(9): 17-23.
- Yin Y W, Che J, Wei H F, *et al.* Carbon sink capacity assessment of mariculture shellfish and algae in Liaoning Province from 2010 to 2019[J]. *Ocean Development and Management*, 2022, 39(9): 17-23 (in Chinese).
- [53] 李昂, 刘存歧, 董梦荟, 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 (in Chinese).



## Evaluation of seasonal variations on the growth features and removable carbon sinks of cultured mussels *Mytilus coruscus* in Gouqi Island

WANG Yihang<sup>1</sup>, PAN Yufeng<sup>1</sup>, XIA Feiyu<sup>1</sup>, XU Ying<sup>1</sup>, DONG Yifei<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>,  
WANG Xiaoli<sup>1</sup>, TIAN Xiaofei<sup>1</sup>, TIAN Kuo<sup>1</sup>, YANG Xiaolong<sup>1</sup>,  
LI Hongliang<sup>2</sup>, ZHANG Xiumei<sup>1\*</sup>

1. School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

**Abstract:** Marine fishery carbon sinks are an important component of blue carbon. Fishery activities such as shellfish farming are considered among the most promising carbon sink activities. However, precise assessment of carbon sinks in shellfish farming still requires further investigation. To explore the potential of carbon sink in shellfish farming, this study focused on the raft-cultured mussels *Mytilus coruscus* near Gouqi Island. We examined the seasonal variations in their growth characteristics and the community features of the epiphytic animals, as well as their correlation with environmental factors. Based on the biomass carbon density (BCD) of the cultured mussels and epiphytic animals, we evaluated the removable carbon sink. The results revealed seasonal, age, and regional differences in the tissue moisture, fatness, and gonad index of the mussels. Tissue moisture exhibited the following patterns: spring > winter > autumn > summer, age 1 > age 2+, and the center area > the periphery area, showing opposite trends to both fatness and gonad index. Additionally, the gonad index followed the pattern of age 4 > age 3 > age 2 > age 1. There are significant seasonal differences in the carbon content of the tissues and the shells, as well as the wet weight ratio of the tissues. Redundancy analysis (RDA) showed a positive correlation between tissue moisture and ammonia nitrogen. Carbon content of the tissues, fatness, and gonad index were positively correlated with environmental factors such as chlorophyll *a*, temperature, and total nitrogen. A total of 153 species were identified among the epiphytic animals, belonging to the phyla Coelenterata, Mollusca, Annelida, Arthropoda, Echinodermata, Nemertina, and Chordata. The main classes included Polychaeta, Malacostraca, Bivalvia, Gastropoda, Anzhozoa, Thecostraca, and Ascidiacea. Seasonal differences were observed in the abundance and biomass of epiphytic animals, with the highest biomass detected in spring, primarily consisting of *Anthopleura midori*, *Amphibalanus reticulatus*, *Modiolus comptus*, *Menippe rumphii*, and *Halosydna brevisetosa*. RDA analysis indicated that the biomass of the Malacostraca animals was positively correlated with chlorophyll *a*, temperature, total nitrogen, total carbon, salinity, and nitrite, while the biomass of Ophiuroidea, Anzhozoa, and Thecostraca animals was positively correlated with ammonia nitrogen and nitrate content. The BCD of the mussels was highest at 129.98 g C/kg in autumn and lowest at 108.29 g C/kg in spring. The BCD of epiphytic animals was highest at 6.85 g C/kg in spring and lowest at 1.38 g C/kg in summer. By harvesting the mussels and epiphytic animals, the maximum BCD that can be removed from the water can reach 135.34 g C/kg. In 2021, farming *M. coruscus* in Gouqi could harvest approximately  $3.02 \times 10^4$  tons of carbon, generating an economic value of carbon sink about 10.49 million yuan. Our results provide an important theoretical basis and practical significance for maximizing the removable carbon sink capacity through farming *M. coruscus*, as well as for deepening the understanding and evaluation of the carbon sink effects of shellfish farming.

**Key words:** *Mytilus coruscus*; growth features; epiphytic animals; removable carbon sinks; Gouqi Island

**Corresponding author:** ZHANG Xiumei. E-mail: [xiumei1227@163.com](mailto:xiumei1227@163.com)

**Funding projects:** Basic Public Welfare Research Project of Zhejiang Province (LDT23D06023D06); Science and Technology Plan Project of Zhoushan Municipality (2023C41004)