

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210201001

http://www.yykxjz.cn/

吴文广, 张继红, 刘毅, 赵云霞, 张坤阳, 王亮亮. 薛家岛海水网箱养殖海域贝藻综合养殖效果及其影响因素分析. 渔业科学进展, 2022, 43(3): 146–155

WU W G, ZHANG J H, LIU Y, ZHAO Y X, ZHANG K Y, WANG L L. Analysis of the effectiveness of the polyculture of shellfish and algae and influencing factors in the Xuejiadao sea cage aquaculture area. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(3): 146–155

薛家岛海水网箱养殖海域贝藻综合养殖效果及其影响因素分析*

吴文广^{1,3} 张继红^{1,2①} 刘毅¹ 赵云霞¹ 张坤阳¹ 王亮亮¹

(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 山东 青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 山东 青岛 266071;

3. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306)

摘要 本研究于2018年9—11月在山东省青岛市薛家岛海域构建了包含鱼类网箱、马氏珠母贝(*Pinctada martensi*)和异枝麒麟菜(*Eucheuma striatum*)的多营养层次综合养殖(IMTA)模式,开展现场实验的同时,在室内测定了马氏珠母贝的摄食生理指标和异枝麒麟菜的营养盐吸收速率,对比分析了贝藻综合养殖对网箱养殖区的水质改善效果。结果显示,实验点马氏珠母贝壳高及特定生长率(SGR)均显著高于对照点,水层为0.50~0.62 m的马氏珠母贝平均壳高显著高于其他水层。实验点异枝麒麟菜的净增重显著高于对照点,水深为0.60~0.90 m的生长速率最高;在24.45℃条件下,马氏珠母贝对颗粒有机物(POM)的摄食率、吸收率和吸收效率均值分别为(4.13±0.77) mg/(h·ind.)、(1.04±0.24) mg/(h·ind.)和(25.00±2.51)%,均显著高于20.74℃实验组;在实验温度范围内,异枝麒麟菜对N、P、Si营养盐的吸收速率均随着温度升高呈先升高再降低的趋势,最高值出现在30℃。实验期间,马氏珠母贝摄食和吸收的POM分别为778.08和144.47 g,异枝麒麟菜吸收的N、P、Si总量分别为8.55、1.11和9.18 g,均高于对照点。研究表明,温度、养殖深度、POM及营养盐浓度是影响马氏珠母贝和异枝麒麟菜生长及生理代谢的主要因素。

关键词 海水网箱养殖; 马氏珠母贝; 异枝麒麟菜; 多营养层次综合养殖

中图分类号 S966 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)03-0146-10

近年来,随着浅海网箱养殖产生的环境污染及生态问题日益凸显,多营养层次综合养殖(IMTA)作为一种健康可持续发展的海水养殖理念,可实现营养物质

在不同营养级生物间的传递和再循环,同时,可提高食物产出效率,达到控制养殖水域富营养化的生态高效养殖目的(Chopin *et al.*, 2001)。唐启升等(2013)研究

* 农业农村部农业国际合作交流项目(“一带一路”热带国家水产养殖科技创新合作)(20180101)、山东省重大科技创新工程专项——“健康海洋”技术创新工程(2018SDKJ0501-3)和中国科学院战略性先导科技专项(A类)“美丽中国生态文明建设科技工程”(XDA23050402)共同资助 [This work was supported by Aquaculture Science and Technology Cooperation Projects of Tropical Countries Along the “Belt and Road” of the Ministry of Agriculture (20180101), the Marine Science and Technology Fund of Shandong Province for Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2018SDKJ0501-3), and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA23050402)].

吴文广, E-mail: wuwg@ysfri.ac.cn

① 通讯作者: 张继红, 研究员, E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2021-02-01, 收修改稿日期: 2021-03-16

表明,多营养层次综合水产养殖是应对多重压力胁迫下近海生态系统显著变化的一条有效途径。目前,该养殖模式已经在世界多个国家(中国、加拿大、挪威、以色列等)广泛实践,并取得了诸多的积极效果(Neori *et al.*, 2004; Gui *et al.*, 2018; Ashkenazi *et al.*, 2019; 张继红等, 2013a)。以贝藻为主体的 IMTA 是水产养殖业绿色发展的代表性模式,通过引入滤食性贝类和大型藻类,利用贝类的滤食及大型藻类光合作用吸收营养盐的功能,可以减轻网箱养殖产生的环境压力,降低有机物和营养盐负荷(张继红等, 2013b)。

20 世纪 70 年代,我国已开展了海水贝藻混养的研究,并取得了较好的养殖效果,但多集中于扇贝、贻贝 (*Mytilus edulis*)、牡蛎 (*Ostrea gigas*) 与海带 (*Laminaria japonica*) 等北方养殖种类(王德利, 2001; 高桦楠等, 2016)。马氏珠母贝 (*Pinctada martensi*) 又称合浦珠母贝,广泛分布在热带或亚热带海域,以过滤海水中微藻、浮游性动物的幼虫和海水中的有机碎屑杂质等为食(邓正华等, 2016)。麒麟菜 (*Eucheuma muricatum*) 是一种世界性海藻,主要分布在热带海域以及亚热带海域,而琼枝麒麟菜 (*Eucheuma gelatiana*) 和异枝麒麟菜 (*Eucheuma striatum*), 又名长心卡帕藻 (*Kappaphycus alvarezii*), 是我国南方地区养殖的主要经济种类(陈攀等, 2018)。针对我国北方传统贝藻养殖所面临的问题,即夏季水温过高导致栉孔扇贝 (*Azumapecten farreri*)、虾夷扇贝 (*Mizuhopecten yessoensis*) 等死亡率上升、产量下降及藻类养殖种类空缺等,马氏珠母贝和麒麟菜是开展贝藻综合养殖的理想经济种类。通过尝试引入马氏珠母贝、异枝麒麟菜等相对更耐高温的热带种类到北方海域开展鱼贝藻 IMTA 模式,有效地利用夏季北方海域相对较高的水温特点及网箱养殖区较高的营养盐浓度(王德利, 2001), 探讨其在北方海域进行规模化养殖的可能性,可作为北方海域夏季海水养殖种类的有益补充。目前,关于浅海网箱养殖、马氏珠母贝与异枝麒麟菜的混养效果研究报道较少。本研究以山东青岛薛家岛网箱养殖海域为研究区域,构建了包含鱼类网箱、马氏珠母贝和异枝麒麟菜的 IMTA 模式,对比并分析了贝藻综合养殖对网箱养殖区的水质改善效果,以期为浅海鱼贝藻 IMTA 模式的建立提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 实验站位设置

实验所需马氏珠母贝和异枝麒麟菜均采自海南

省三亚市养殖区,空运至青岛实验室暂养 7 d 后开始实验。2018 年 9—11 月在山东青岛薛家岛海域设置网箱养殖区(实验点, 35°55′16.6″N, 120°13′04.1″E)和非养殖区(对照点, 35°55′27.6″N, 120°13′15.3″E), 开展海上贝藻综合养殖对比实验(图 1)。网箱养殖区鲈鱼 (*Lateolabrax japonicus*) 养殖密度为 10.8 尾/m³。

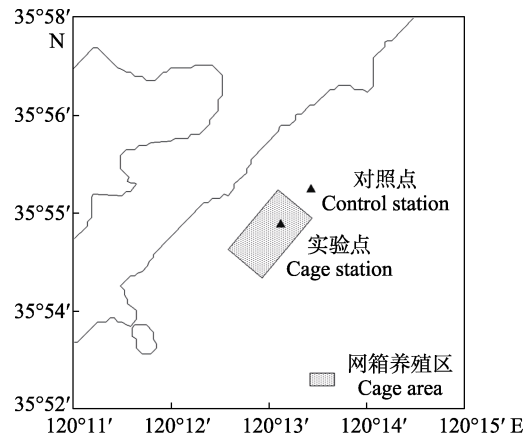


图 1 现场综合养殖实验站位

Fig. 1 The station for field experiments of integrated multi-trophic aquaculture

1.2 布置方案与样品采集

1.2.1 布置方案 参照麒麟菜栽培技术规程(海南省地方标准)(DB46/T192-2010), 挑选色泽鲜亮的异枝麒麟菜进行绑苗, 主绳长为 2.5 m, 苗距为 30 cm, 每条主绳悬挂 7 个不同深度的异枝麒麟菜并编号, 测量每层初始苗的湿重, 分别在对照点和实验点悬挂异枝麒麟菜各 4 绳并编号。参照马氏珠母贝养成技术规程(海南省地方标准)(DB46/T2862-2014), 挑选健康有活力的马氏珠母贝置于养殖吊笼内, 每层放置 3 个, 共 7 层, 每笼 21 个马氏珠母贝, 对照点和实验点各悬挂 5 笼, 测量马氏珠母贝的初始湿重、壳高。在网箱养殖区, 将异枝麒麟菜第 1 层苗绳悬挂在海水表层, 马氏珠母贝养殖笼悬挂在水下 0.26 m 处, 苗绳和养殖笼下端均悬挂坠石使它们在海水中垂直展开, 即马氏珠母贝的吊养深度分别为 0.26、0.32、0.38、0.44、0.50、0.56 和 0.62 m, 异枝麒麟菜的吊养深度分别为 0、0.3、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1 和 2.4 m。非养殖区(对照点)也同样操作。

1.2.2 样品采集和测定 养殖实验于 2018 年 9 月 21 日—11 月 2 日开展, 并于 10 月 15 日和 11 月 2 日分别在实验点和对照点采集样品。温度、盐度、pH 等环境参数均采用多参数水质仪(YSI-EXO₂ 型)测定。总

悬浮颗粒物(TPM)、颗粒有机物(POM)、营养盐等环境参数的采集及测定均采用《海洋监测规范》(GB17378.4-2007)的方法;叶绿素 *a* 采用 Turner-Designs Trilogy 荧光仪(美国)进行测定(吴文广等, 2018)。使用电子天平(梅特勒-ME-2002, 美国)现场称量每个实验组、每绳、每层异枝麒麟菜的湿重并记录对应编号, 统计马氏珠母贝养殖笼内每层的死亡个数, 并记录对应编号, 使用电子天平称量每层马氏珠母贝的生物学参数(壳高、湿重), 称量后均放回原处。实验结束后, 全部取回至实验室进行最终的测量分析。

1.3 室内生理实验

1.3.1 马氏珠母贝摄食生理实验 参照张继红等(2013a, b)的方法, 采用室内静水法测定马氏珠母贝的滤水率(Clearance rate, CR)、摄食率(Feeding rate, FR)、吸收率(Absorption rate)及吸收效率(Absorption efficiency)等生理指标, 每个实验组设置 5 个平行和 3 个空白对照, 每个平行组放置 1 个马氏珠母贝, 实验持续 2 h 后, 收集粪便和假粪。实验结束后, 将贝类分别置于过滤海水中, 排空 2 h, 再次收集粪便, 测定实验用贝的壳高、湿重等生物学指标, 实验用水为网箱区表层自然海水。

1.3.2 异枝麒麟菜营养盐吸收速率实验 选取生长正常的异枝麒麟菜, 充气暂养 7 d 后开始实验。使用吸水纸吸干藻体表面的水分后, 分别测量并记录异枝麒麟菜的湿重, 平均湿重为(9.82±0.51) g, 实验海水使用网箱区表层自然海水脱脂棉过滤, 设置 3 个实验组和 1 个空白对照组, 实验容器为体积 12 L 聚乙烯材质整理箱, 每个实验容器放入实验海水 10 L, 微充气培养, 温度梯度设置为 17℃、20℃、25℃、30℃、35℃共 5 个梯度, 每个温度梯度结束后, 按照每天升温 2℃, 升至实验温度暂养 3 d 后, 继续进行下一个温度梯度实验。实验期间, 培养箱设置 12 h 光照和 12 h 黑暗, 每个温度梯度实验持续 24 h, 按 1.2.2 所述方法测定营养盐浓度。

1.4 计算方法

马氏珠母贝和异枝麒麟菜的特定生长率(specific growth rate, SGR, %/d)计算公式:

$$SGR=100 \times (\ln W_2 - \ln W_1) / t$$

式中, W_2 为结束时湿重(g)或壳高(mm), W_1 为初始湿重(g)或壳高(mm), t 实验持续时间(d)。

马氏珠母贝摄食生理指标的相关计算公式参考周毅等(2002)和张继红等(2013a、b)的方法。

异枝麒麟菜对各项营养盐吸收速率参照方哲等(2008)的方法, 计算公式:

$$C=(N_0-N_t) \times V / (T \times G)$$

式中, C 为营养盐吸收速率($\mu\text{mol/g} \cdot \text{h}$), N_0 为实验结束时空白对照组的各项营养盐浓度($\mu\text{mol/L}$), N_t 为实验过程中各个取样时间点的各项营养盐浓度($\mu\text{mol/L}$), V 为实验所用海水的体积(L), T 为实验时间(h), G 为异枝麒麟菜的湿重(g)。

马氏珠母贝对 POM 的摄食及吸收总量计算公式:

$$M_{\text{pom}}=n \times W_d \times I \times T_a \times 10^{-3}$$

式中, M_{pom} 为马氏珠母贝对 POM 的摄食总量或吸收总量(g), n 为马氏珠母贝最终剩余总个数(ind.), W_d 为马氏珠母贝养殖最终单位个体软组织干重(g/ind.), I 为马氏珠母贝对 POM 的摄食率或吸收率 [$\text{mg}/(\text{h} \cdot \text{g DW})$], T_a 为养殖时间(h)。

异枝麒麟菜 N、P、Si 去除总量计算公式:

$$R=G_a \times M \times C \times T_a \times 10^{-6}$$

式中, R 为异枝麒麟菜对 N、P 或 Si 的去除总量(g), G_a 为异枝麒麟菜净增重(湿重计)(g), M 为 N、P 或 Si 元素的摩尔质量(g/mol), C 为 20℃~25℃时, 异枝麒麟菜对 N、P 或 Si 营养盐吸收速率的平均值 [$\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$], T_a 为养殖时间(h)。

1.5 数据处理

实验数据采用 Microsoft Excel 2010、Surfer8.0 和 Matlab 统计分析软件进行分析及绘图, 采用 SPSS17.0 软件进行独立样本 t 检验分析组间差异($P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著), 贝藻的 SGR 与主要环境因子间的关系采用冗余分析(redundancy analysis, RDA), 分析过程使用 Canoco for Windows 4.5 软件按照国际通用标准完成(吴文广等, 2018)。

2 结果

2.1 环境数据分析

近海网箱养殖实验海区环境参数详见表 1。单因子方差分析(one-way ANOVA)表明, 实验期间, 实验点 TPM、POM、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)及溶解无机氮(DIN)浓度均显著高于对照点($P < 0.05$), 而透明度显著低于对照点; 除第 1 次取样外, 实验点硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)浓度、叶绿素 *a* 浓度均显著高于对照点($P < 0.05$); 除初始取样外, 实验点 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度均显著高于对照点($P < 0.05$); $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 浓度在初始取样时显著低于对照点, 而第 1 次和第 2 次取样时则相反($P < 0.05$)。

表 1 近海网箱养殖实验海区环境参数
Tab.1 The environmental parameters of experimental area in offshore fishcage farming

环境参数 Environmental parameters	日期 Date					
	2018-09-21		2018-10-15		2018-11-02	
	实验点 Cage ₀	对照点 Control ₀	实验点 Cage ₁	对照点 Control ₁	实验点 Cage ₂	对照点 Control ₂
表层温度 T/°C	24.75±0.17	24.75±0.13	21.24±0.15	21.05±0.19	18.24±0.11	17.46±0.12
盐度 S	32.57±0.09	32.55±0.07	32.27±0.08	32.56±0.11	31.51±0.06	31.75±0.05
溶解氧 DO/(mg/L)	6.89±0.37	6.83±0.41	7.35±0.24	7.23±0.31	7.46±0.22	7.39±0.27
pH	8.25±0.03	8.26±0.02	8.25±0.01	8.31±0.02	7.96±0.02	7.96±0.01
水深 Water depth/m	15.22±0.31	15.51±0.25	15.22±0.31	15.51±0.25	15.22±0.31	15.51±0.25
透明度 TRA/m	1.13±0.11	1.51±0.15*	1.30±0.13	1.91±0.21*	1.73±0.15	2.14±0.22*
总悬浮颗粒物 TPM/(mg/L)	111.42±11.17*	86.68±9.57	60.42±7.62*	47.62±8.64	70.78±7.56*	45.20±9.11
颗粒有机物 POM/(mg/L)	22.04±2.12*	17.26±1.31	10.52±1.02*	7.98±0.67	11.34±1.13*	6.22±0.54
叶绿素 a Chl-a/(µg/L)	1.01±0.14*	0.89±0.09	0.83±0.06	0.97±0.05	1.12±0.11*	0.69±0.08
亚硝酸盐氮 NO ₂ -N/(µmol/L)	0.07±0.02	0.09±0.03	0.07±0.03	0.07±0.02	1.27±0.07*	0.77±0.05
硝酸盐氮 NO ₃ -N/(µmol/L)	1.48±0.14*	0.99±0.11	1.09±0.16	1.04±0.18	4.15±0.54*	2.97±0.37
氨氮 NH ₄ ⁺ -N/(µmol/L)	3.66±0.14*	3.38±0.17	3.83±0.21*	3.25±0.16	1.77±0.33*	1.28±0.21
溶解无机氮 DIN/(µmol/L)	5.22±0.97*	4.46±0.44	5.00±0.54*	4.36±0.61	7.19±1.12*	5.01±0.99
磷酸盐 PO ₄ ³⁻ -P/(µmol/L)	0.18±0.03	0.22±0.04	0.32±0.09*	0.22±0.07	0.44±0.11*	0.23±0.08
硅酸盐 SiO ₃ ²⁻ -Si/(µmol/L)	5.27±1.12	8.05±1.45*	4.96±0.99*	4.03±0.57	4.63±0.73*	2.34±0.66

注: 同一取样日期不同数据列中上标有“*”表示差异显著(P<0.05), Cage₀、Cage₁、Cage₂分别代表实验点初始、第1次、第2次测量; Control₀、Control₁、Control₂分别代表对照点初始、第1次、第2次测量; 下同

Note: “*” represented significant differences in the same sampling date, the same below, Cage₀, Cage₁, Cage₂ refers to the initial, first and second shell height in fish cage area, respectively; Control₀, Control₁, Control₂ refers to the initial, first and second shell height in control area, the same as below

2.2 贝藻综合养殖效果分析

2.2.1 马氏珠母贝生长状况

不同时间、不同海水深度的马氏珠母贝壳高和湿重的生长状况见图2和图3。结果表明, 第3次取样时, 实验点和对

照点马氏珠母贝壳高和湿重均显著高于初始值(P<0.05), 实验点马氏珠母贝壳高在0.38 m和0.50~0.62 m水深显著高于其他水层(P<0.05), 对照点马氏珠母贝壳高在0.32和0.50 m处均显著低

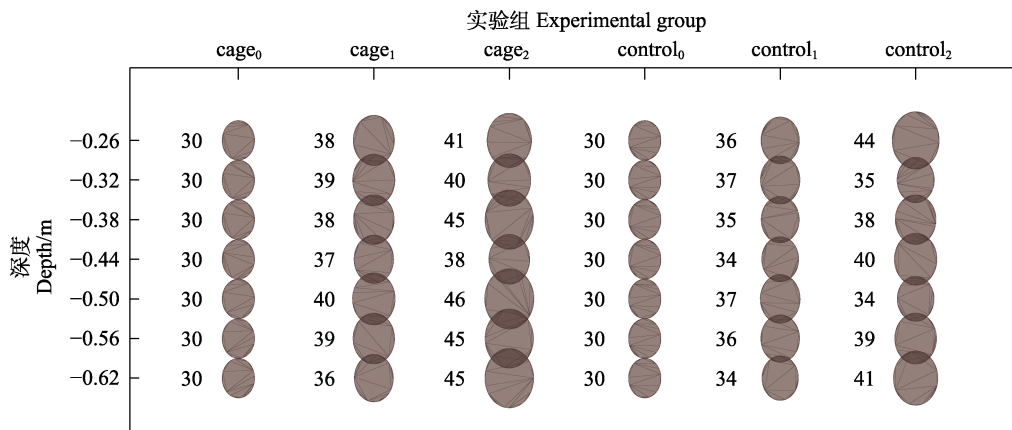


图 2 实验点和对照点马氏珠母贝壳高生长状况(圆形的大小表示贝类的壳高)/mm
Fig.2 The shell height of *P. martensi* in fish cage area and control area (The size of the circle indicates the shell height of the shellfish)/mm

cage₀、cage₁、cage₂ 分别代表实验点初始、第 1 次、第 2 次测量;
control₀、control₁、control₂ 分别代表对照点初始、第 1 次、第 2 次测量; 下同
cage₀, cage₁, cage₂ refers to the initial, first and second shell height in fish cage area, respectively; control₀, control₁, control₂ refers to the initial, first and second shell height in control area, the same as below

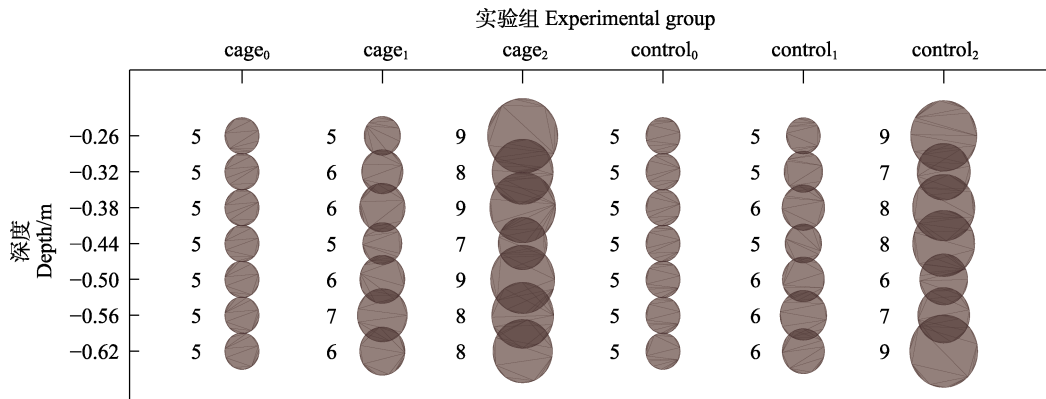


图 3 实验点和对照点马氏珠母贝湿重生长状况(圆形的大小表示贝类的湿重)/g
Fig.3 The wet weight of *P. martensi* in fish cage area and control area (The size of the circle indicates the wet weight of the shellfish)/g

于其他水层($P < 0.05$), 实验点马氏珠母贝的平均壳高和平均湿重分别为(43.71±3.64) mm和(8.42±1.04) g, 对照点马氏珠母贝的平均壳高和平均湿重分别为(38.38±4.50) mm和(7.83±1.80) g。方差分析表明, 第3次取样时, 实验点马氏珠母贝壳高显著高于对照点($P < 0.05$)。

马氏珠母贝在不同深度的实验点和对照点的SGR结果见表2。从表2可以看出, 实验点马氏珠母贝壳高SGR在0.50 m时为最大值(0.96), 在0.44 m为最小值(0.53); 而湿重SGR最大值出现在0.26 m, 为1.66, 最小值出现在深度为0.44 m(0.83); 对照点壳高SGR在0.26 m时为最大值(0.86), 在0.50 m处为最小值(0.29); 湿重SGR最大值出现在深度为0.62 m(1.58), 最小值出现在深度为0.56 m(0.96)。实验点的马氏珠母贝壳高SGR平均值显著高于对照点($P < 0.05$)。

2.2.2 异枝麒麟菜生长状况 异枝麒麟菜在实验点和对照点不同养殖深度的生长状况见图4。从图4可以看出, 异枝麒麟菜在水深为0.60~0.90 m的生长速率最快, 随着水深的增加, 异枝麒麟菜藻体湿重损

失较大。经过43 d的海上养殖实验, 实验点的异枝麒麟菜平均每绳总净增重为(253.48±38.68) g, 0.6~0.9 m水层平均每绳净增重为(200.04±33.02) g, 而对照点平均每绳总净增重为(211.09±43.42) g, 0.60~

表 2 不同深度实验点和对照点马氏珠母贝的SGR(%/d)

Tab.2 The SGR of shell height and wet weight of *P. martensi* in fishcage area and control area in different depth

水深 /m Water depth /m	对照点 Control area		实验点 Fish cage area	
	壳高 Shell height	湿重 Wet weight	壳高 Shell height	湿重 Wet weight
0.26	0.86	1.52	0.73	1.66
0.32	0.32	1.02	0.65	1.34
0.38	0.52	1.38	0.93	1.51
0.44	0.63	1.37	0.53	0.83
0.50	0.29	0.77	0.96	1.45
0.56	0.58	0.96	0.92	1.37
0.62	0.72	1.58	0.94	1.27
平均值 Average value	0.56±0.19	1.23±0.29	0.81±0.16*	1.35±0.26

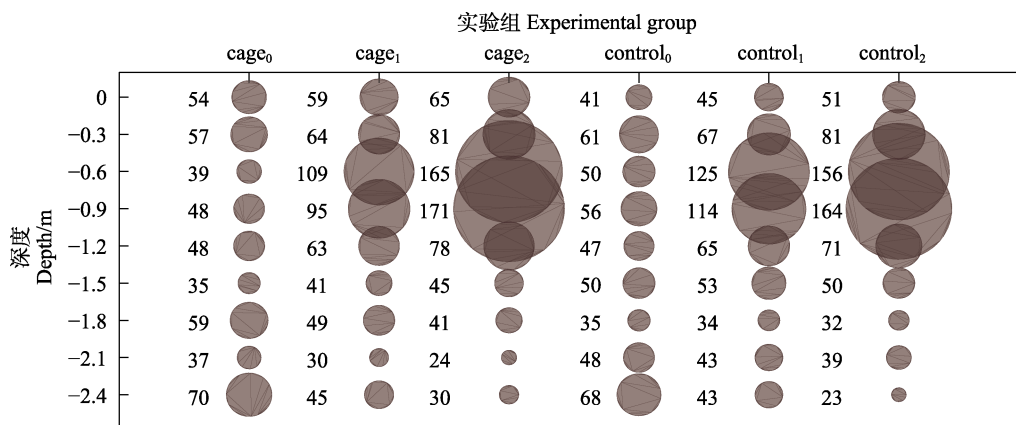


图 4 实验点和对照点异枝麒麟菜生长状况(圆形的大小指示藻类的湿重)/g

Fig.4 The growth of *E. striatum* in fishcage area and control area (The size of the circle indicates the wet weight of the algae)/g

表3 不同深度下实验点和对照点
异枝麒麟菜湿重的 SGR (%/d)

Tab.3 The SGR of *E. striatum* in fish cage area and control area in different depth

水深 Water depth/m	对照点 Control area	实验点 Fish cage area
0	0.52±0.10	0.46±0.22
0.3	0.71±0.59	0.90±0.69
0.6	2.60±0.27	3.21±0.57*
0.9	2.50±0.64	2.32±0.23
1.2	1.00±0.60	1.11±0.38
1.5	-0.12±1.00	0.59±0.01*
1.8	-0.32±1.06	-1.10±0.33
2.1	-0.51±0.10	-1.03±0.10
2.4	-2.47±0.60	-2.88±0.16

0.90 m 水层平均每绳净增重为(106.87±25.96) g, 且该水层实验点异枝麒麟菜的净增重显著高于对照点 ($P<0.05$)。异枝麒麟菜实验点和对照点湿重的 SGR 结果见表 3。从表 3 可以看出, 水深为 0.60~0.90 m 时, 异枝麒麟菜的 SGR 显著高于其他水层, 且实验点的异枝麒麟菜 SGR 在水深为 0.60 和 1.50 m 时显著高于对照点 ($P<0.05$)。

2.3 马氏珠母贝的摄食生理

马氏珠母贝摄食生理实验组水体的环境参数及悬浮颗粒物的特性见表 4。从表 4 可以看出, 10 月 15 日实验组水体的 TPM 及颗粒无机物(PIM)显著高于 9 月 21 日实验组, 而 9 月 21 日实验组水体温度及有机物比率(f)显著高于 10 月 15 日实验组 ($P<0.05$)。马氏珠母贝的生物学参数见表 5。从表 5 可以看出, 2 次实验所用马氏珠母贝生物学指标相比均无显著差异 ($P>0.05$)。不同温度条件下, 马氏珠母贝对实验海区自然海水的摄食生理指标见表 6。从表 6 可以看出, 马氏珠母贝在 24.45℃ 条件下, 实验海区海水 POM 的摄食率、POM 的吸收率和吸收效率平均值分别为 (4.13±0.77) mg/(h·ind.)、(1.04±0.24) mg/(h·ind.) 和 (25.00±2.51)%, 均显著高于 20.74℃ ($P<0.05$), 表明温度对马氏珠母贝的摄食生理产生显著影响。估算了

不同实验组马氏珠母贝对 POM 的去除总量, 实验点和对照点马氏珠母贝对海水中 POM 摄食总量见表 7。从表 7 可以看出, 经过 43 d 的海上养殖实验, 实验点马氏珠母贝的 POM 摄食总量和对 POM 的吸收总量分别为 778.08 和 144.47 g, 均高于对照点。

2.4 异枝麒麟菜的营养盐吸收速率

不同温度的异枝麒麟菜(湿重计)对 N、P、Si 营养盐吸收率见表 8。从表 8 可以看出, 异枝麒麟菜的 N、P、Si 营养盐吸收速率均随着温度升高呈先升高再降低趋势, 最高值出现在 30℃。在 35℃ 温度条件下, 对 N、P、Si 的吸收速率均出现负值, 温度对异枝麒麟菜的营养盐吸收产生显著影响。不同实验组异枝麒麟菜的 N、P、Si 去除效果总量见表 9。从表 9

表4 实验组水体的环境参数及悬浮颗粒物的特性

Tab.4 The environmental parameters and characteristics of suspended particles in experimental groups

环境参数 Environmental parameters	日期 Date	
	2018-09-21	2018-10-15
表层温度 $T/^\circ\text{C}$	24.45±0.55*	20.74±0.37
盐度 S	32.37±0.02	32.17±0.03
溶解氧 DO/(mg/L)	6.86±0.16	7.48±0.11
pH	8.04±0.01	8.18±0.02
总悬浮颗粒物 TPM/(mg/L)	39.05±3.07	46.61±4.31*
颗粒有机物 POM/(mg/L)	9.04±1.11	9.25±1.31
颗粒无机物 PIM/(mg/L)	30.01±2.89	37.36±2.67*
有机物比率 $f/\%$	23.15±2.84*	19.85±1.66

注: *表示不同实验日期同一行数据差异显著 ($P<0.05$)

Note: "*" represented significant differences in the different experiment sampling date ($P<0.05$)

表5 实验组马氏珠母贝的生物学参数

Tab.5 Shell length/height and weight of *P. martensi* used in experiment

实验组 Groups	壳高 Shell height/mm	壳长 Shell length/mm	总干重 Dry weight/g	软组织干重 Dry tissue weight/g
09-21	30.42±0.07	31.91±0.61	2.01±0.11	0.15±0.02
10-15	31.14±0.64	32.60±1.43	2.03±0.14	0.14±0.01

表6 不同温度下马氏珠母贝对自然海水的摄食生理指标

Tab.6 Feeding physiological index of *P. martensi* in different temperatures

实验组 Groups	滤水率 Clearance rate /[L/(h·g DW)]	单位体重摄食率 Ingestion rate /[mg/(h·g DW)]	单位个体摄食率 Ingestion rate /[mg/(h·ind.)]	单位体重吸收率 Absorption rate /[mg/(h·g DW)]	单位个体吸收率 Absorption rate /[mg/(h·ind.)]	吸收效率 Absorption efficiency/%
09-21 (24.45℃)	6.03±0.69*	28.02±5.01*	4.13±0.77*	7.05±1.63*	1.04±0.24*	25.00±2.51*
10-15 (20.74℃)	4.53±0.16	20.55±1.97	2.89±0.42	1.97±2.31	0.28±0.32	9.21±10.46

表7 不同实验组的马氏珠母贝的滤除效果

Tab.7 Filtering effect of *P. martensi* from different experimental groups

实验组 Group	养殖剩余总数量 Total number of /ind.	最终软组织干重均值 Mean dry weight of soft tissue/g	滤食时间 Filter-feeding time/h	颗粒有机物摄食总量 The ingested amount of particulate organic matter/g	对颗粒有机物的吸收总量 The absorbed amount of particulate organic matter/g
实验点 Cage station	97	0.32	1032	778.08	144.47
对照点 Control station	95	0.25	1032	595.37	110.54

表8 不同温度下异枝麒麟菜对氮、磷、硅营养盐的吸收率

Tab.8 The nutrient absorption rate of *E. striatum* in different temperature

吸收速率 Absorption rate/($\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$)	温度 Temperature				
	17 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$	30 $^{\circ}\text{C}$	35 $^{\circ}\text{C}$
溶解无机氮 DIN	0.220 \pm 0.090	0.450 \pm 0.130	0.720 \pm 0.240	0.700 \pm 0.021	-0.240 \pm -0.012
磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.022 \pm 0.010	0.031 \pm 0.020	0.038 \pm 0.010	0.049 \pm 0.011	-0.002 2 \pm -0.001
硅酸盐 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	0.080 \pm 0.030	0.250 \pm 0.130	0.380 \pm 0.120	0.530 \pm 0.170	-0.030 \pm -0.010

表9 不同实验组异枝麒麟菜的 N、P、Si 去除效果对比

Tab.9 The removal amount of nutrient form *E. striatum* in different experimental groups

实验组 Group	净增重 Added weigh /g	氮去除总量 Total removed nitrogen /g	磷去除总量 Total removed phosphorus /g	硅去除总量 Total removed silicon/g
实验点 Cage station	1 013.92	8.55	1.11	9.18
对照点 Control station	844.36	7.12	0.93	7.65

可以看出, 经过 43 d 的海上养殖实验, 实验点异枝麒麟菜的 N、P、Si 去除总量分别为 8.55、1.11 和 9.18 g, 均高于对照点。

2.5 贝藻生长影响因素分析

马氏珠母贝与异枝麒麟菜的 SGR 与环境因子的 RDA 排序见图 5。从图 5 可以看出, 环境因子用实线箭头表示, 贝藻 SGR 用虚线箭头表示。环境因子与 SGR 之间夹角的余弦值代表其相关性, 即夹角越小, 其相关性越强。RDA 分析显示, 温度、TPM、POM 对马氏珠母贝的壳高和湿重的 SGR 有显著影响, 呈正相关($P<0.05$); 而温度、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 、 pH 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 与异枝麒麟菜的湿重 SGR 呈显著正相关($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 鱼贝藻混养系统中的贝藻养殖效果及影响因素

近年来, 海水网箱养殖产生的环境及生态系统问

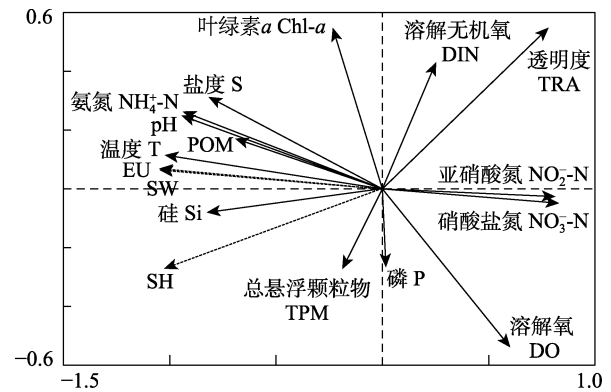


图5 贝藻 SGR 与环境因子 RDA 排序

Fig.5 RDA biplot of SGR from shellfish and algae

EU: 异枝麒麟菜湿重 SGR; SH: 马氏珠母贝壳高 SGR; SW: 马氏珠母贝湿重 SGR
EU: Wet weight SGR of *E. striatum*;
SH: Shell height SGR of *P. martensi* ;
SW: Wet weight SGR of *P. martensi*,

题引起人们的关注, 开展鱼、贝、藻的 IMTA 是缓解这一环境压力的有效途径, 目前, 已成为国际上主推的养殖理念(张继红等, 2018)。然而, 养殖种类的搭配、养殖密度、养殖区的合理布局等是开展 IMTA 的理论基础(杨红生等, 2000)。本研究表明, 实验点马氏珠母贝壳高及 SGR 均显著高于对照点, 且实验点马氏珠母贝壳高在水深为 0.5~0.62 m 时显著高于其他水层; 异枝麒麟菜在水深为 0.60~0.90 m 时生长速率最快, 且异枝麒麟菜的湿重净增重显著高于对照点。与贝、藻单养和混养模式等研究相比(Qian *et al*, 1996; Wu *et al*, 2003), 本研究通过引入鱼类网箱养殖单元的鱼贝藻的混养效果显著。鱼类网箱养殖是投饵

型养殖,是本研究养殖模式运转的中心,其养殖过程中产生的鱼类残饵、粪便等微小颗粒物质可有效地被马氏珠母贝摄食并吸收,同时,鲈鱼和马氏珠母贝代谢释放的 N、P、Si 等无机营养盐被异枝麒麟菜吸收并储存在体内,并释放 O₂ 到该养殖系统中,通过这种养殖方式去除多余的 POM 和营养盐,进一步实现了营养物质高效循环利用(Chopin *et al.*, 2001; Hayashi, *et al.*, 2008; 张继红等, 2013a,b),同时,鱼贝藻养殖模式的养殖效果显著优于贝藻混养模式。

与贝、藻单养相比,影响鱼贝藻养殖效果的因素则更加复杂。本研究表明,温度、养殖水层、POM 及营养盐浓度是影响马氏珠母贝和异枝麒麟菜生长及生理代谢的主要因素。温度是影响海水养殖生物生长的主要因素之一(赖卓欣等, 2019)。近年来,我国北方海域夏季出现水温过高导致扇贝等养殖种类死亡率、藻类养殖种类空缺等问题(高振锟等, 2017)。本研究引入马氏珠母贝、异枝麒麟菜等相对更耐高温的种类到北方海域进行接力养殖,通过有效利用夏季北方海域相对较高的水温特点及网箱养殖区较高的营养盐浓度。结果表明,马氏珠母贝、异枝麒麟菜和鲈鱼的混养模式可以适应北方夏季温度变化,养殖效果显著。养殖水层也是影响贝藻生长的重要因素,马氏珠母贝幼贝单养的吊养深度通常在 1.0~1.5 或 2.0~3.0 m,麒麟菜的吊养深度在 20~40 cm 范围,其吊养深度主要取决于养殖海域的环境特性(符韶等, 2001; 王爱民等, 2010)。本研究中,实验点马氏珠母贝幼贝、异枝麒麟菜吊养深度分别在 0.5~0.62 m 和 0.60~0.90 m 的 SGR 状况要优于其他水层,可能是该养殖系统中的 POM 分布特性、营养盐浓度、透明度及水动力条件等因素对贝藻的适宜生长水层产生了影响(Kasim *et al.*, 2017)。本研究 RDA 结果也表明,温度、养殖深度、POM 及营养盐浓度是影响马氏珠母贝和异枝麒麟菜 SGR 主要因素,因此,在构建鱼贝藻综合养殖模式时,需全面了解不同水层的 POM 及营养盐浓度等因素的分布特性,进行合理的规划,从而使 IMTA 养殖系统具有更高的食物产出能力和实现营养物质的高效利用。

3.2 鱼、贝、藻混养系统中的贝藻养殖环境效应

海水鱼类网箱养殖是一种高密度、集约化的养殖方式,给养殖者带来巨大经济、社会效益的同时,网箱周围残饵粪便等有机颗粒物及 N、P、Si 等无机营养盐负荷不断增大,对环境也造成了一定的负面影响,威胁了海水网箱业的可持续发展(张继红等, 2013a, b)。本研究结果表明,实验点马氏珠母贝的

POM 摄食总量和对 POM 的吸收总量均高于对照点,且实验点异枝麒麟菜的 N、P、Si 去除总量也高于对照点。马氏珠母贝可作为生物滤器有效去除网箱养殖产生的残饵、粪便等颗粒有机物,滤食性贝类主要通过滤食的方式直接影响水体中的营养物质,通过滤食水体中的颗粒物并将其重新包装成粪便和假粪,从而降低了水体中营养物质的浓度,同时,提高了养殖海域透明度,但滤食性贝类及网箱鱼类在生长代谢过程中,会利用呼吸作用释放 CO₂ 和 NH₄⁺-N,在 IMTA 系统中会降低水中的 DO 水平及升高 DIN 浓度,对贝类和鱼类的生长产生负面影响。而本研究通过引入异枝麒麟菜这一藻类养殖单元,利用藻类的生物学特性,吸收并储存网箱养殖产生的 N、P、Si 营养盐,减轻了网箱养殖对环境的压力,提高了养殖品种的多样性和经济效益对网箱养殖水域的生态环境优化作用显著。

在 IMTA 系统中,将 POM、营养盐作为鱼贝、鱼藻和贝藻之间互利关系的纽带已成为共识(Hayashi *et al.*, 2008; 张继红等, 2013a,b;高桦楠等, 2016),鱼贝藻综合养殖系统中,投饵性养殖单元(主要为鱼类)产生的残饵、粪便和营养盐等物质可转化为非投饵性(滤食性贝类、藻类等)养殖单元的营养物质来源(唐启升等, 2013)。本研究结果表明,与贝藻混养相比,网箱区马氏珠母贝对养殖海区 POM 的摄食量和吸收量均提高了 30.69%,异枝麒麟菜对海区 DIN 营养盐的去存量提高了 12.64%,同时,贝藻将系统内的多余营养物质转化为自身的生物质,提高了养殖品种的多样性和经济效益,本研究为建立浅海鱼贝藻 IMTA 技术提供了数据支持和理论支撑。

参 考 文 献

- ASHKENAZI D Y, ISRAEL A, ABELSON A. A novel two-stage seaweed integrated multi-trophic aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 2019, 11(1): 246-262
- CHEN P, CHEN Y, MA J, *et al.* Bottom sowing culture technology of *E.gelatianae* in Xisha Reef area. *Journal of Hainan Tropical Ocean University*, 2018, 25(5): 13-17 [陈攀, 陈燕, 马军, 等. 西沙礁盘区琼枝麒麟菜底播养殖技术研究. 海南热带海洋学院学报, 2018, 25(5): 13-17]
- CHOPIN T, BUSCHMANN A H, HALLING C, *et al.* Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: A key towards sustainability. *Journal of Phycology*, 2001, 37(6): 975-986
- DENG Z H, JIANG S, ZHANG B, *et al.* Ingestion and digestion of pearl oyster (*Pinctada fucata*) on microalgae of different types and concentrations. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(3): 112-118 [邓正华, 姜松, 张博, 等. 合浦珠母贝对不同种类及浓度的单胞藻摄食与消化效果研究. 南

- 方水产科学, 2016, 12(3): 112–118]
- FANG Z, HUANG H Q, BAO S X, *et al.* The preliminary study of *Kappaphycus alvarezii* on absorption of nitrogen and phosphorus in sea water. *Journal of Aquaculture*, 2008, 29(6): 1–4 [方哲, 黄惠琴, 鲍时翔, 等. 异枝麒麟菜对海水中氮、磷吸收的初步研究. *水产养殖*, 2008, 29(6): 1–4]
- FU S, DENG C M, LIANG F L. Mariculture of *Pinotada martensi* and cage improvement for pearl cultivation. *Marine Sciences*, 2001, 25(3): 23–24 [符韶, 邓陈茂, 梁飞龙. 马氏珠母贝养殖与育珠笼具的改进. *海洋科学*, 2001, 25(3): 23–24]
- GAO H N, LI L, ZHENG X, *et al.* Three co-culture patterns of *Pinctada fucata martensii* and macroalgae in circulating aquaculture system. *Journal of Tropical Biology*, 2016, 7(2): 147–152 [高桦楠, 李乐, 郑兴, 等. 循环水系统内马氏珠母贝与 3 种大型藻类的混养状况及水质分析. *热带生物学报*, 2016, 7(2): 147–152]
- GAO Z K, ZHANG J H, LI M, *et al.* Effects of Temperature fluctuation on physiological and immune parameters of scallop (*Patinopecten yessoensis*). *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(3): 148–154 [高振锟, 张继红, 李敏, 等. 温度波动对不同规格虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*) 生理和免疫指标的影响. *渔业科学进展*, 2017, 38(3): 148–154]
- GUI J F, TANG Q S, LI Z J, *et al.* Aquaculture in China success stories and modern trends. Wiley Blackwell, 2018
- HAYASHI L, YOKOYA N S, SÉRGIO O, *et al.* Nutrients removed by *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae) in integrated cultivation with fishes in re-circulating water. *Aquaculture*, 2008, 277(3/4): 185–191
- KASIM M, MUSTAFA A. Comparison growth of, *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae) cultivation in floating cage and longline in Indonesia. *Aquaculture Reports*, 2017, 6: 49–55
- LAO Z X, LIU Y, WANG Q H, *et al.* Cloning of FBP gene in *Pinctada fucata martensii* and its response to temperature stress. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(2): 106–114 [赖卓欣, 刘雅, 王庆恒, 等. 马氏珠母贝 (*Pinctada fucata martensii*) FBP 基因的克隆及其对温度胁迫的响应. *渔业科学进展*, 2019, 40(2): 106–114]
- NEORI A, CHOPIN T, TROELL M, *et al.* Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture*, 2004, 231(1/2/3/4): 361–391
- QIAN P Y, WU C Y, WU M, *et al.* Integrated cultivation of the red alga *Kappaphycus alvarezii* and the pearl oyster *Pinctada martensi*. *Aquaculture*, 1996, 147(1/2): 21–35
- TANG Q S, FANG J G, ZHANG J H, *et al.* Impacts of multiple stressors on coastal ocean ecosystems and Integrated Multi-trophic Aquaculture. *Progress In Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 1–11 [唐启升, 方建光, 张继红, 等. 多重压力胁迫下近海生态系统与多营养层次综合养殖. *海洋水产研究*, 2013, 34(1): 1–11]
- WANG A M, SHI Y H, WANG Y, *et al.* Biology and new farming techniques of *Pinotada martensi*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2010 [王爱民, 石耀华, 王嫣等. 马氏珠母贝生物学与养殖新技术. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010]
- WANG D L. Application and research of the co-culture technique of shellfish and seaweed in China. *Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas*, 2001, 19(1): 78–81 [王德利. 贝藻混养技术在我国海水养殖中的应用与研究. *海洋科学进展*, 2001, 19(1): 78–81]
- WU M, MAK S K K, ZHANG X J, *et al.* The effect of co-cultivation on the pearl yield of *Pinctada martensi* (Dumker). *Aquaculture*, 2003, 221(1/2/3/4): 347–356
- WU C M, GAO H F, DING M L, *et al.* The growth promoting effect of metabolites of *Pinctada martensi* on *Kappaphycus alvarezii*. *Oceanologia et Limnologia Since*, 1997, 28(5): 453–457 [吴汪黔生, 高洪峰, 丁美丽, 等. 合浦珠母贝代谢产物对异枝麒麟菜生长的促进作用. *海洋与湖沼*, 1997, 28(5): 453–457]
- WU W G, ZHANG J H, LIU Y, *et al.* Size-fractionated phytoplankton and its influencing factors in autumn near Zhangzidao Island and its adjacent waters. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(4): 1418–1426 [吴文广, 张继红, 刘毅, 等. 獐子岛及邻近海域秋季浮游植物的粒级结构及其影响因素. *生态学报*, 2018, 38(4): 1418–1426]
- WU W G, ZHANG J H, WANG W, *et al.* Variation of Chl-*a* concentration and its control factors pre-and-post-the-harvest of kelp in Sanggou Bay. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(8): 1178–1186 [吴文广, 张继红, 王巍, 等. 桑沟湾水域叶绿素 *a* 在海带收获前后的变化及其影响因素. *水产学报*, 2015, 39(8): 1178–1186]
- YANG H S, ZHOU Y, WANG J, *et al.* A modelling estimation of carrying capacities for *Chlamys farreri*, *Laminaria japonica* and *Apostichopus japonicus* in Sishiliwan Bay, Yantai, China. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2000, 7(4): 27–31 [杨红生, 周毅, 王健, 等. 烟台四十里湾栉孔扇贝、海带和刺参负荷力的模拟测定. *中国水产科学*, 2000, 7(4): 27–31]
- ZHANG J H, WU T, XU D, *et al.* Feeding on feces, diets and cage farming sediments of *Paralichthys olivaceus* by Japanese scallop *Patinopecten yessoensis*. *Progress In Fishery Sciences*, 2013a, 34(2): 96–102 [张继红, 吴桃, 徐东, 等. 虾夷扇贝对牙鲆的粪便、残饵及网箱养殖区沉积物的摄食. *渔业科学进展*, 2013a, 34(2): 96–102]
- ZHANG J H, WU T, GAO Y P, *et al.* Feeding behavior of 5 species filter-feeding bivalves on *Paralichthys olivaceus* feed, fecal and sediment particulates in cage farming area. *Journal of Fisheries of China*, 2013b, 37(5): 90–97 [张继红, 吴桃, 高亚平, 等. 5 种滤食性贝类对牙鲆的粪便、残饵及网箱养殖区沉降物的摄食行为. *水产学报*, 2013b, 37(5): 90–97]
- ZHANG J H, REN L H, WEI Y W, *et al.* Ecological environment

and sustainable utilization of biological resources in Sanggou Bay. Beijing: Agricultural Press of China, 2018 [张继红, 任黎华, 魏龔伟, 等. 桑沟湾生态环境与生物资源可持续利用. 北京: 中国农业出版社, 2018]

ZHOU Y, YANG H S. Biodeposition method used in bivalval physio-ecological studies. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(6): 74-76 [周毅, 杨红生. 应用于贝类生理生态研究的生物沉积法. 生态学杂志, 2002, 21(6): 74-76]

(编辑 陈 严)

Analysis of the Effectiveness of the Polyculture of Shellfish and Algae and Influencing Factors in the Xuejiadao Sea Cage Aquaculture Area

WU Wenguang^{1,3}, ZHANG Jihong^{1,2①}, LIU Yi¹, ZHAO Yunxia¹, ZHANG Kunyang¹, WANG Liangliang¹

(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, Qingdao, Shandong 266071, China; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266071, China; 3. College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract In recent years, environmental pollution and ecological problems caused by cage aquaculture have become increasingly prominent in shallow seas. The cultivation technique of integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) can be applied to minimize the impact of nutrient enrichment from organic fisheries. The IMTA mode was implemented in September to November 2018 in this study, which included fish cage aquaculture, the shellfish *Pinctada martensi*, and the alga *Eucheuma striatum*. The feeding physiology indicators of *P. martensi* and the nutrient uptake rate of *E. striatum* were measured at different temperatures in the laboratory concurrent with conducting field experiments, and the improvement of the water quality in the cage aquaculture area by IMTA of shellfish and algae were compared and analyzed. The results showed that: (1) the specific growth rate (SGR) of *P. martensi* in the marine fish cage area was significantly higher than that in control area, and the average shell height of *P. martensi* in the 0.50~0.62 m water layer in the cage area was significantly higher than the other water layers. (2) *Eucheuma striatum* had the fastest SGR in the 0.60~0.90 m water layer, and the net wet weight gain of *E. striatum* was significantly higher than that in the control area. (3) At 24.45°C, the average feeding rate, absorption rate, and absorption efficiency of *P. martensi* on particulate organic matter were, respectively, (4.13±0.77) mg/h·ind., (1.04±0.24) mg/h·ind., and (25.00±2.51)%, which were significantly higher than those at 20.74°C. Within the experimental temperature range, the absorption rates of nitrogen, phosphorus, and silicon first increased then decreased with increasing temperature, and the maximum values appeared at 30°C. (4) It is estimated that the total amount of filtered particulate organic matter and the total amount of absorbed particulate organic matter by *P. martensi* in the marine fish cage area during the culture experiment was 778.08 g and 144.47 g, respectively, and the total amount of nitrogen, phosphorus, and silicon removed by *E. striatum* in the marine fish cage area was 8.55 g, 1.11 g, and 9.18 g, respectively; all the above indicators were higher than those in the control area. Temperature, depth of cultivation, particulate organic matter, and nutrient concentrations were the primary factors affecting the growth and physiological metabolism of *P. martensi* and *E. striatum*. This study provides data and theoretical support for the establishment of IMTA technology.

Key words Sea cage mariculture; *Pinctada martensi*; *Eucheuma striatum*; Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA)

① Corresponding author: ZHANG Jihong, E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn