

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20220329001

http://www.yykxjz.cn/

黄俊杭, 房景辉, 方建光, 于瑞海, 郑小东, 毛玉泽, 蒋增杰. 牡蛎-海参筏式综合养殖可行性研究. 渔业科学进展, 2023, 44(4): 111-120

HUANG J H, FANG J H, FANG J G, YU R H, ZHENG X D, MAO Y Z, JIANG Z J. Feasibility of integrated oyster-sea cucumber raft culture. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(4): 111-120

牡蛎-海参筏式综合养殖可行性研究*

黄俊杭^{1,2} 房景辉^{1①} 方建光¹ 于瑞海² 郑小东² 毛玉泽¹ 蒋增杰¹

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 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; 2. 中国海洋大学 海水养殖教育部重点实验室 山东 青岛 266003)

摘要 为探究牡蛎-海参筏式综合养殖模式的可行性,在2个具有代表性的牡蛎养殖区——山东荣成桑沟湾和乳山挂子场海域开展了长牡蛎(*Crassostrea gigas*)-仿刺参(*Apostichopus japonicus*)筏式笼养效果对比实验。在牡蛎养殖笼中,奇数层放养长牡蛎,偶数层放养仿刺参。实验设置3个因子:偶数层的底盘类型(普通养殖盘、无孔养殖盘和无孔养殖盘加无节网)、放养仿刺参的密度(1、2和4头/盘)和放养海域(桑沟湾和挂子场),共18个处理组,每组5个重复,实验期为2020年11月—2021年6月。实验期间,对两海域水体6项指标(叶绿素 a 、颗粒有机物、活性磷酸盐、亚硝酸盐、硝酸盐和铵盐)和实验动物的生长、存活等方面进行跟踪测定和比较分析。结果显示,两海域叶绿素 a 和颗粒有机物无显著性差异($P>0.05$),但其他4项营养盐指标均差异显著($P<0.05$)。处理组中,两海域各处理组间牡蛎个体体重及肥满度无显著差异($P>0.05$),海参低密度处理组中,海参个体体重及成活率显著高于海参高密度处理组($P<0.05$);在其他处理条件相同时,无孔养殖盘处理组的仿刺参个体体重高于普通养殖盘处理组,在挂子场海域有显著差异($P<0.05$)。本研究表明,在牡蛎养殖笼偶数层使用无孔养殖盘并放养1头仿刺参,能在降低牡蛎养殖密度的同时,显著提高仿刺参的个体体重和成活率。综上,该牡蛎-海参筏式综合养殖模式可以作为牡蛎规模化养殖区的有益补充。

关键词 仿刺参;长牡蛎;多营养层次综合养殖;生长;营养盐;水环境

中图分类号 S968.9 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2023)04-0111-10

我国是水产养殖大国,养殖产量和面积均位于世界首位,其中,牡蛎养殖产量占全球牡蛎总养殖产量的80%(于潇等,2020)。但伴随着养殖产业的迅猛发展,也产生了一系列的问题。近年来,为了追求经济利益,养殖海区内牡蛎养殖密度不断增加,辽宁大连大窑湾海区、广西钦州、北海和防城港等地均因为牡蛎养殖密度不断增加,出现产量下降、个体变瘦、牡蛎大量死亡和病害频繁发生等问题(隋锡林等,2002;

潘英等,2021)。因此,迫切需要探索新型养殖模式,以期解决上述问题。

随着人们对海洋生态系统的深入研究,生态养殖模式逐渐被人们接受并加以推广,其中,多营养层次综合养殖模式(integrated multi-trophic aquaculture, IMTA)是公认的环境友好型养殖模式。该养殖模式的核心是将不同生态位的种类,按照适当比例在同一水体中进行养殖,部分生物的排泄物作为另一生物的饵料,在减

* 十三五“蓝色粮仓科技创新”国家重点研发计划(2019YFD0900803)、国家自然科学基金面上项目(41876185)和中国水产科学研究院基本科研业务费(2020TD50)共同资助。黄俊杭, E-mail: 18565729720@163.com

① 通信作者: 房景辉, 研究员, E-mail: fangjh@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2022-03-29, 收修改稿日期: 2022-04-25

少废物排放的同时,增加经济效益,使能量和营养得到充分利用。目前,许多研究证实,该养殖模式应用效果显著(Ashkenazi *et al*, 2019; Gui *et al*, 2018),可以增加单位面积产出(于潇等, 2020)、改善海域环境(张继红等, 2013)、提高物质利用率(吴文广等, 2021)。

规模化养殖的滤食性贝类,在摄食后会产生大量的生物沉积物,将水体中的颗粒物由上层搬运至底层(聂梦晨等, 2022)。大量有机物以生物沉积物的形式累积到养殖区海底,会对底质环境造成一定负面影响(Hatcher *et al*, 1994)。研究表明,海参能大量摄食贝类产生的富含有机质的沉积物,加快系统内营养盐的循环,降低沿海贝类及鱼类养殖造成的营养负荷(赵聚萍, 2018; 秦培兵等, 1999)。因此,在多营养层次综合养殖原理的基础上,利用具有沉积食性的海参对滤食性贝类产生的生物沉积物进行摄食,可能形成一种新型的综合养殖模式。基于此,本研究通过改进养殖方式,尝试在长牡蛎(*Crassostrea gigas*)的下层水体中养殖仿刺参(*Apostichopus japonicus*),进行牡蛎-海参筏式综合养殖,目的是使牡蛎产生的生物沉

积物得到原位利用,降低牡蛎养殖密度,维持经济效益。

1 材料与方法

1.1 实验生物来源

实验所使用的牡蛎为长牡蛎,海参为仿刺参,均由山东荣成楮岛水产有限公司提供。挑选规格相近、活力好的长牡蛎和仿刺参用于实验。长牡蛎和仿刺参初始体重分别为(60±15) g和(40±10) g。

1.2 实验设计

本研究选择了2个具有代表性的牡蛎养殖海域(图1):山东省荣成市桑沟湾海域(37°03'58"N, 122°33'28"E)和山东省乳山市挂子场渔港附近海域(36°43'48"N, 121°36'21"E)。

使用牡蛎养殖笼(直径为31 cm,高约为170 cm,孔径为1.6 cm,共10层)进行实验。长牡蛎和仿刺参隔层放养,奇数层放养总重0.6 kg的长牡蛎,每个养

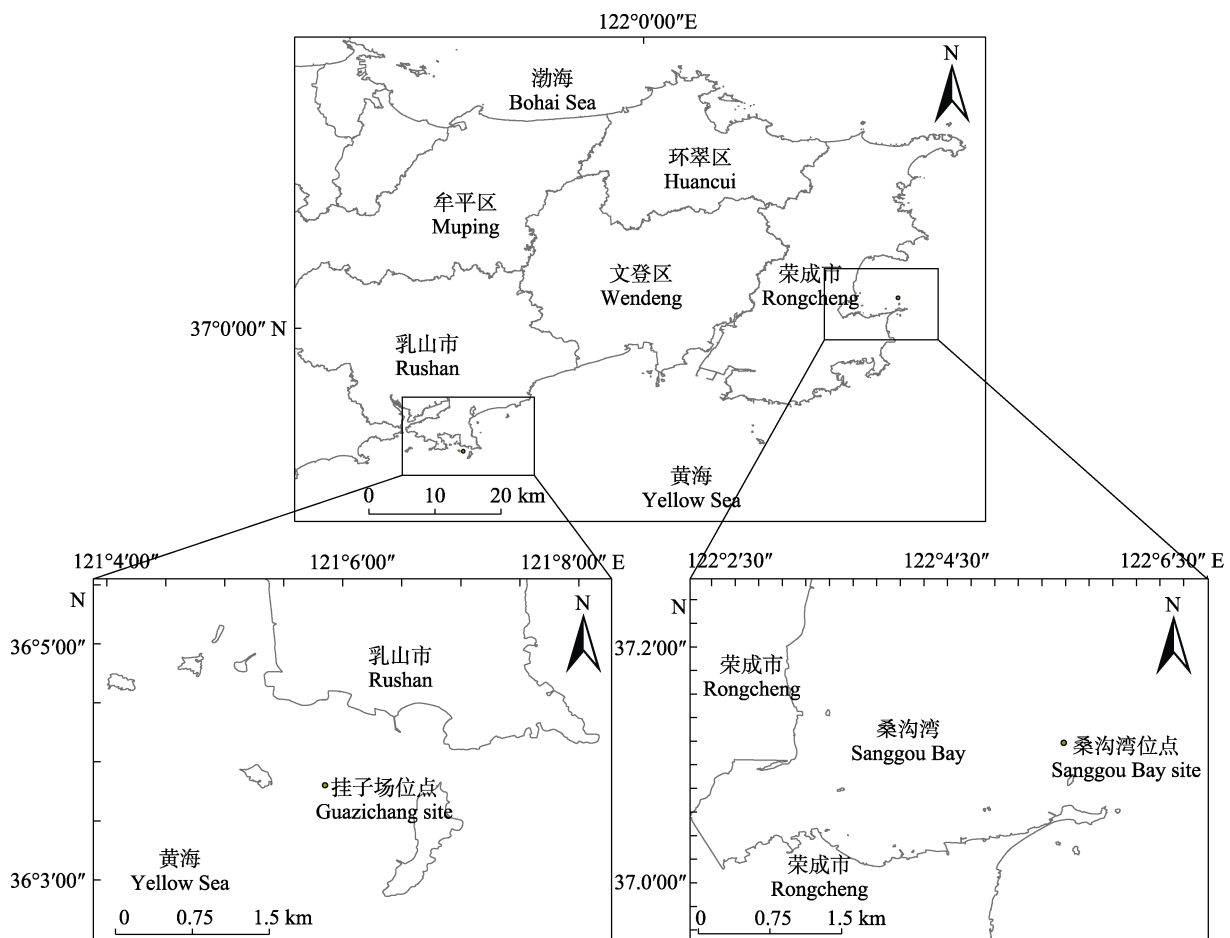


图1 实验海域示意图

Fig.1 Sketch map of experimental sea area

殖笼内长牡蛎的初始总重为 3 kg; 偶数层放养仿刺参, 其数量根据如下实验分组确定: 每偶数层放养仿刺参分为 3 个密度, 分别为 1、2 和 4 头, 标记为海参密度 1、2、4 头/盘。偶数层的养殖盘分为普通养殖盘和无孔养殖盘 2 种, 分别标记为 P 和 W 处理; 同时, 在部分无孔养殖盘的笼内放置约为 2 倍养殖盘面积的无结网, 标记为 J 处理。每个海域 9 个处理组编号见表 1。本研究在 2 个海域进行, 共 18 个处理组, 每个处理组 5 个重复, 每个实验海域使用 45 个养殖笼, 实验共使用 90 个养殖笼。

表 1 处理组编号

Tab.1 Treatment group number

养殖盘处理 Treatment of plate	海参密度 Density of sea cucumber/(ind./plate)		
	1	2	4
	普通养殖盘 P Common plate	P1	P2
无孔养殖盘 W Holeless plate	W1	W2	W4
无孔养殖盘+无结网 J Holeless plate with non-knot nets	J1	J2	J4

1.3 样品采集

实验时间为 2020 年 11 月—2021 年 6 月, 每月定期前往 2 个实验海域进行样品采集。现场随机选取 5 个取样位点, 使用 YSI 多参数水质分析仪(Eureka 公司, 美国)测量实验海域的水温(T)、盐度(S)、溶解氧(DO)和 pH 值。每个位点采集 2.5 L 表层水, 参照《海洋监测规范 GB17378.4-2007》进行现场固定, 将水样带回实验室进行相关分析。

每 2 个月采集 1 次长牡蛎和仿刺参样品, 每个处理组采集长牡蛎个体 30 个、仿刺参个体 5 个, 用于测量生长指标。养殖实验结束后, 对所有养殖笼内长牡蛎和仿刺参进行称重和计数, 计算不同处理组长牡蛎和仿刺参的平均单笼总重和成活率。

1.4 样品测定

使用游标卡尺测量长牡蛎壳高、壳长和壳宽, 使用电子天平(0.01 g 精度)测量长牡蛎的总湿重、软体部湿重和仿刺参湿重。将长牡蛎软体部和壳在 70 °C 烘箱内烘干 72 h 至恒重后, 测量长牡蛎软体部干重和壳干重。

叶绿素 a (Chl- a)参照《海洋监测规范 GB 17378.7-2007》使用分光光度法测定; 颗粒有机物(POM)参照

《海洋调查规范 GB/T 12763.9-2007》, 使用预先灼烧称重后的 GF/F 玻璃纤维滤膜测定; 活性磷酸盐(PO_4^{3-} -P)、亚硝酸盐(NO_2^- -N)、硝酸盐(NO_3^- -N)和铵盐(NH_4^+ -N)参照《海洋调查规范 GB/T 12763.4-2007》分别使用抗坏血酸还原磷钼蓝法、重氮-偶氮法、锌镉还原法和次溴酸钠氧化法测定。

1.5 计算公式和数据分析

牡蛎个体肥满度(condition index, CI)计算公式(Walne, 1976):

$$CI = DW_t/DW_s \times 100\%$$

式中, DW_t 表示牡蛎软体部干重, DW_s 表示牡蛎壳干重。

实验数据均采用平均值±标准差(Mean±SD)表示。使用 SPSS 23.0 统计分析软件分析数据; 采用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene 检验方法对数据进行正态分布检验和方差齐性检验。使用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验不同海域和取样月份对海域 Chl- a 、POM、 PO_4^{3-} -P、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的影响; 使用三因素方差分析(three-way ANOVA)检验不同海域、养殖盘和海参密度对长牡蛎单笼总重、仿刺参单笼总重、仿刺参个体体重、仿刺参成活率、长牡蛎个体体重和长牡蛎肥满度的影响, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著水平, $P < 0.01$ 作为差异极显著水平。对存在显著交互效应的因变量, 分析各处理组间的简单效应; 对不存在显著交互效应、仅存在显著主效应的因变量, 使用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 多重比较分析各处理组间是否存在显著差异。使用 GraphPad Prism 7.0 软件绘制图表。

2 结果

2.1 养殖区环境因子变化

2.1.1 叶绿素 a 和颗粒有机物 双因素方差分析显示, 海域对 Chl- a 和 POM 影响不显著($P > 0.05$); 取样月份对 Chl- a 和 POM 影响均极显著($P < 0.01$); 海域和取样月份交互效应对 Chl- a 影响显著($P < 0.05$), 对 POM 影响极显著($P < 0.01$) (表 2)。

12 月和翌年 5 月两海域 Chl- a 含量存在显著差异($P < 0.05$), 其他各月份两海域 Chl- a 含量无显著差异($P > 0.05$)。相同海域内各月份 Chl- a 含量差异显著($P < 0.05$), 桑沟湾海域变化范围为 0.92~2.11 $\mu\text{g/L}$, 挂子场海域变化范围为 0.88~2.41 $\mu\text{g/L}$ (图 2a)。

12 月两海域 POM 含量存在显著差异($P < 0.05$), 其他各月份两海域 POM 含量无显著差异($P > 0.05$)。相同海域各月份差异显著($P < 0.05$), 桑沟湾海域变化

范围为 3.57~12.52 mg/L, 挂子场海域变化范围为 4.02~11.59 mg/L (图 2b)。

2.1.2 营养盐 双因素方差分析显示, 海域和取样月份对 4 项营养盐指标的影响均极显著($P < 0.01$); 海域和取样月份交互效应对 $PO_4^{3-}-P$ 和 NO_3-N 的影响极显著($P < 0.01$), 对 NO_2-N 和 NH_4^+-N 的影响不显著($P > 0.05$) (表 2)。

12 月桑沟湾海域 $PO_4^{3-}-P$ 浓度显著低于挂子场海域($P < 0.05$), 其他各月桑沟湾海域均高于挂子场海域, 除 1 月和 6 月以外的月份差异显著($P < 0.05$); 相同海域各月的 $PO_4^{3-}-P$ 浓度差异显著($P < 0.05$), 整体表现为先下降后上升的趋势(图 3a)。

挂子场海域 NO_2-N 浓度整体高于桑沟湾海区, 除 3 月、6 月以外的月份差异显著($P < 0.05$); 相同海域各月 NO_2-N 浓度差异显著($P < 0.05$), 整体较为稳定(图 3b)。

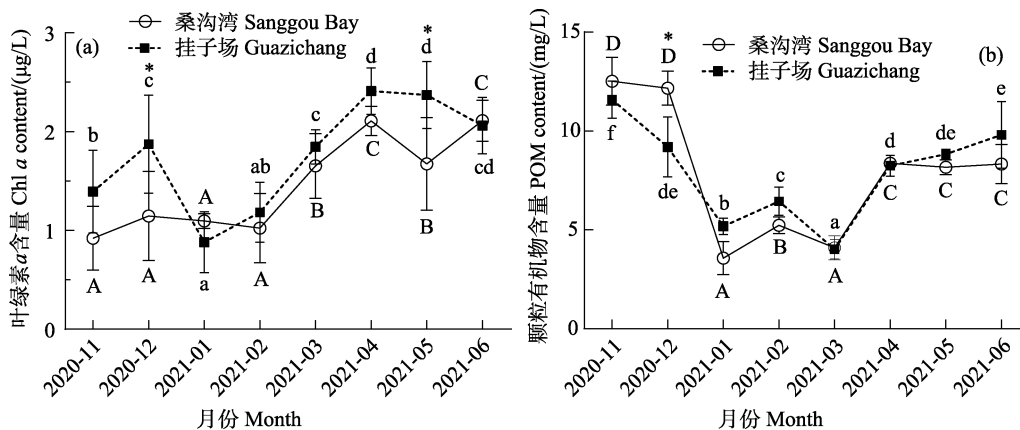


图 2 实验海域叶绿素 a 和颗粒有机物含量变化

Fig.2 Variation of Chlorophyll a content and POM content in experimental sea areas

不同大写字母表示桑沟湾海域不同月份数据差异显著($P < 0.05$); 不同小写字母表示挂子场海域不同月份数据差异显著($P < 0.05$); *表示相同月份不同海域数据差异显著($P < 0.05$), 下同。

Different capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different months in Sanggou Bay, and Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different months in Guazichang.

* indicates significant differences ($P < 0.05$) between sea areas in the same month, the same as below.

桑沟湾海域 NO_3-N 浓度整体高于挂子场海域, 除 4 月和 6 月以外的月份差异显著($P < 0.05$); 相同海域各月份 NO_3-N 浓度差异显著($P < 0.05$), 整体表现为下降趋势(图 3c)。

桑沟湾海域 NH_4^+-N 浓度整体高于挂子场海域, 除 2 月和 5 月以外的月份差异显著($P < 0.05$); 相同海域各月份 NH_4^+-N 浓度差异显著($P < 0.05$), 整体较为稳定(图 3d)。

2.2 长牡蛎和仿刺参的生长

2.2.1 长牡蛎总重和仿刺参总重 三因素方差分析显示(表 3), 养殖盘和海参密度对仿刺参和长牡蛎

表 2 海域与取样月份对海域环境因子影响的双因素方差分析结果

Tab.2 Two-way ANOVA analysis of the influence of sea area and month on the environmental factors

环境因子	P 值 P value		
	海域 Sea area	取样月份 Month	海域×取样月份 Sea area × month
Chl-a	0.163	<0.001**	0.019*
POM	0.590	<0.001**	<0.001**
$PO_4^{3-}-P$	<0.001**	<0.001**	<0.001**
NO_2-N	<0.001**	<0.001**	0.109
NO_3-N	<0.001**	<0.001**	<0.001**
NH_4^+-N	<0.001**	<0.001**	0.107

注: **: $P < 0.01$, *: $0.01 < P < 0.05$, 下同。

Note: ** represents $P < 0.01$, * represents $0.01 < P < 0.05$, the same as below.

单笼总重影响均极显著($P < 0.01$), 海域影响不显著($P > 0.05$); 两因素交互作用对仿刺参单笼总重影响不显著($P > 0.05$), 对长牡蛎单笼总重影响显著($P < 0.05$); 三因素交互作用对仿刺参单笼总重影响不显著($P > 0.05$), 对长牡蛎单笼总重影响显著($P < 0.05$)。

相同养殖盘和海参密度条件下, W2 和 J2 处理组不同海域之间长牡蛎单笼总重存在显著差异($P < 0.05$), 其他各处理组不同海域之间均无显著差异($P > 0.05$)。相同海域和海参密度条件下, 密度为 1 头/盘时, W 和 J 处理组显著高于 P 处理组($P < 0.05$)。相同海域和养殖盘条件下, 当养殖盘为普通养殖盘(P)时, 2 头/盘的处理组显著高于 1 头/盘的处理组($P < 0.05$), 与

4 头/盘的处理组差异不显著($P>0.05$) (图 4a)。

相同养殖盘和海参密度条件下, 各处理组不同海域之间仿刺参单笼总重均无显著差异($P>0.05$)。相同海域和海参密度条件下, W 处理组仿刺参单笼总重显著高于 P 和 J 处理组($P<0.05$)。相同海域和养殖盘条件下, 密度为 4 头/盘的处理组仿刺参单笼总重显著高于 1 和 2 头/盘的处理组($P<0.05$)。相对于初始体重,

1 头/盘的处理组仿刺参单笼总重表现出增长, 其他处理组均表现为下降(图 4b)。

2.2.2 仿刺参个体体重和存活率 三因素方差分析显示(表 3), 海域对仿刺参个体体重影响极显著($P<0.01$), 对其成活率影响不显著($P>0.05$), 海参密度对两指标影响均极显著($P<0.01$), 养殖盘对两指标影响均不显著($P>0.05$); 两因素交互作用中只有海域×

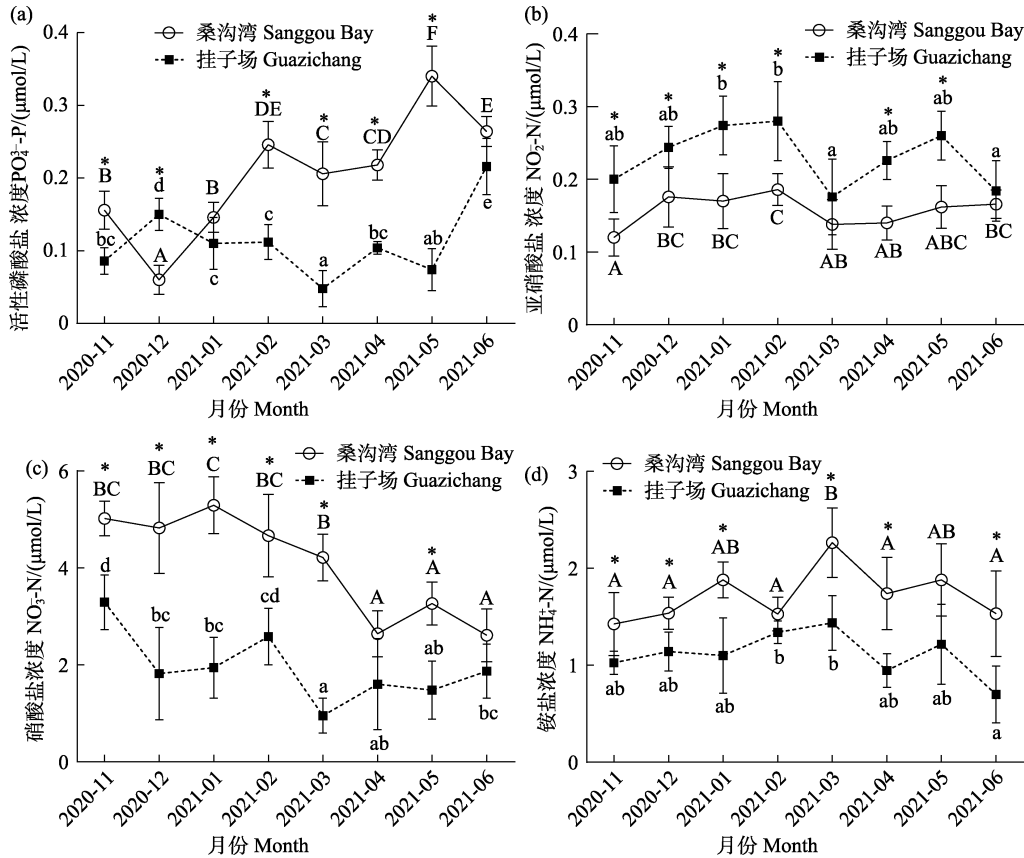


图 3 实验海域营养盐含量变化

Fig.3 Variation of nutrient contents in experimental sea areas

表 3 海域、养殖盘和海参密度对长牡蛎及仿刺参生长指标的三因素方差分析结果

Tab.3 Three-way ANOVA analysis of the influence of sea area, aquaculture plate, and sea cucumber density on the growth index of the *C. gigas* and *A. japonicus*

因素 Factor	生长指标 Growth index					
	仿刺参单笼总重 Total weight of sea cucumber	长牡蛎单笼总重 Total weight of oysters	仿刺参个体体重 Sea cucumber weight	仿刺参成活率 Survival rate of sea cucumber	长牡蛎个体体重 Oyster weight	长牡蛎肥满度 Condition index
A	0.343	0.537	<0.001**	0.100	0.834	0.186
B	0.005**	<0.001**	0.131	0.161	0.969	0.529
C	<0.001**	<0.001**	<0.001**	<0.001**	0.682	0.578
A × B	0.622	0.007**	0.213	0.148	0.991	0.679
A × C	0.277	0.026*	0.028*	0.432	0.996	0.938
B × C	0.057	<0.001**	0.093	0.737	0.990	0.090
A × B × C	0.301	0.031*	0.011*	0.430	0.996	0.688

注: A 表示海域, B 表示养殖盘, C 表示海参密度。

Note: A represents sea area, B represents aquaculture plate, and C represents sea cucumber density.

海参密度交互作用对仿刺参个体体重影响显著($P < 0.05$), 其他两因素交互作用对两指标影响均不显著($P > 0.05$); 三因素交互作用对仿刺参个体体重影响显著($P < 0.05$), 对其成活率影响不显著($P > 0.05$)。

相同养殖盘和海参密度条件下, 除 W1、J1 和 P4 处理组挂子场海域仿刺参个体体重显著高于桑沟湾海域以外($P < 0.05$), 其他各处理组不同海域之间均无显著差异($P > 0.05$)。相同海域和海参密度条件下, 挂子场海域的 W1 和 J1 处理组仿刺参个体体重显著高于 P1 处理组($P < 0.05$)。相同海域和养殖盘条件下, 密度为 1 头/盘的处理组显著高于 2 和 4 头/盘处理组($P < 0.05$); 同时, 相对于初始仿刺参个体体重, 仅有密度为 1 头/盘的处理组表现出增长, 其他密度处理组均表现为下降(图 5a)。

相同养殖盘和海参密度条件下, 各处理组不同海域之间海参成活率均无显著差异($P > 0.05$)。相同海域和海参密度条件下, 仅有桑沟湾海域 W2 处理组显著低于 P2 和 J2 处理组($P < 0.05$), 其他各组之间无显著差异($P > 0.05$)。相同海域和养殖盘条件下, 海参密度为 1 头/盘的处理组显著高于 2 和 4 头/盘处理组($P < 0.05$) (图 5b)。

2.2.3 长牡蛎个体体重和肥满度 三因素方差分析显示, 3 种因素对长牡蛎个体体重及其肥满度均无

显著影响($P > 0.05$); 两因素和三因素交互作用对两指标均无显著影响($P > 0.05$) (表 3)。

在所有组别中, 长牡蛎个体体重各组间均无显著差异($P > 0.05$) (图 6a)。

相同养殖盘和海参密度条件下, 各处理组不同海域之间长牡蛎肥满度均无显著差异($P > 0.05$)。相同海域和海参密度条件下, 仅有桑沟湾海域 W2 处理组长牡蛎肥满度显著低于 P2 处理组($P < 0.05$), 其他各组间无显著差异($P > 0.05$)。相同海域和养殖盘条件下, 仅有桑沟湾海域 W2 处理组长牡蛎肥满度显著低于 W1 和 W4 处理组($P < 0.05$), 其他各组间无显著差异($P > 0.05$) (图 6b)。

3 讨论

3.1 实验海域水质条件变化对牡蛎养殖的启示

桑沟湾和挂子场海域都是我国北方重要的水产养殖海域, 其中, 挂子场海域隶属于山东省乳山海域, 以牡蛎养殖著称, 有“中国牡蛎之乡”的美誉(Fang *et al.*, 2016; 谭林涛等, 2019)。目前, 很大一部分牡蛎在桑沟湾海区生长至一定规格后, 转运去乳山海域中进行育肥养殖, 这说明在生产实践中人们得出了乳山海域水质比桑沟湾海域更适合牡蛎生长的结论(徐雯雯

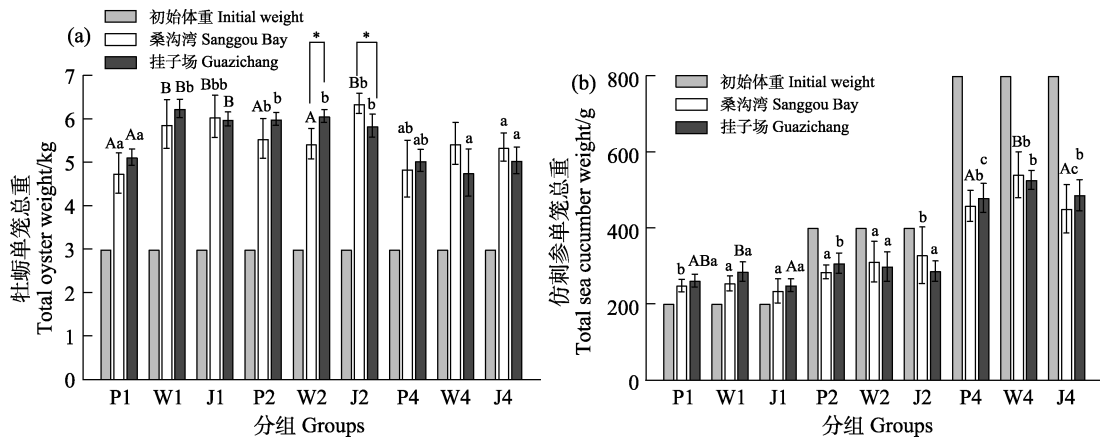


图4 长牡蛎和仿刺参单笼总重比较

Fig.4 Comparison of total weight of *C. gigas* and *A. japonicus* in a single aquaculture cage

P 代表普通养殖盘处理组, W 代表无孔养殖盘处理组, J 代表添加无节网处理组; 数字 1、2、4 分别代表每层投放海参密度为 1、2、4 头/盘; 不同大写字母表示相同海域和海参密度条件下不同养殖盘组数据差异显著($P < 0.05$);

不同小写字母表示相同海域和养殖盘条件下不同海参密度组数据差异显著($P < 0.05$);

*表示相同处理条件下不同海域数据差异显著($P < 0.05$), 下同。

P represents the common aquaculture plate treatment group, W represents the holeless aquaculture plate treatment group, and J represents the treatment group of adding non-knot net. Numbers 1, 2, and 4 represent the density of sea cucumbers treated as 1, 2, and 4 ind./plate. Different capital letters indicate significant differences of different aquaculture plate groups in the same sea area and sea cucumber density ($P < 0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences of different sea cucumber density groups in the same sea area and using the same kind of aquaculture plate ($P < 0.05$).

* indicate significant differences ($P < 0.05$) between different sea areas in the same treatment group, the same as below.

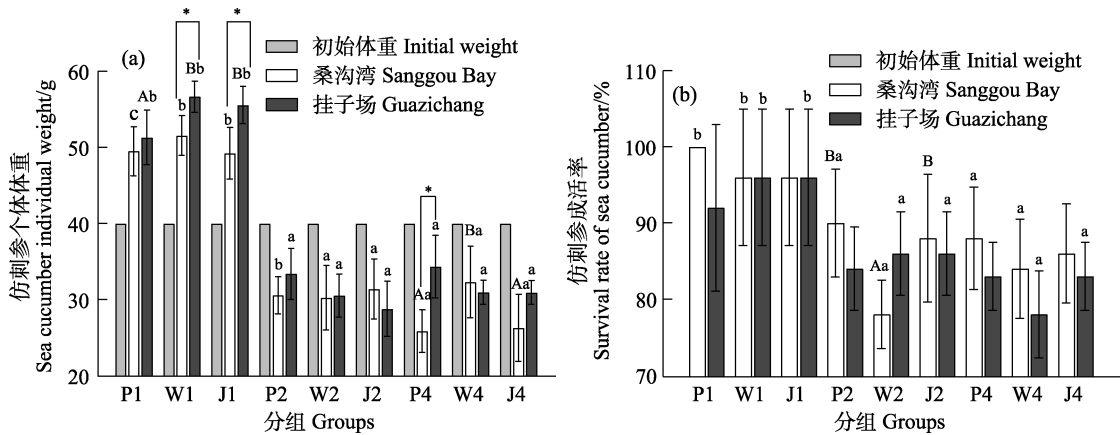


图 5 仿刺参个体体重和成活率差异
Fig.5 Comparison of individual weight and survival rate of *A. japonicus*

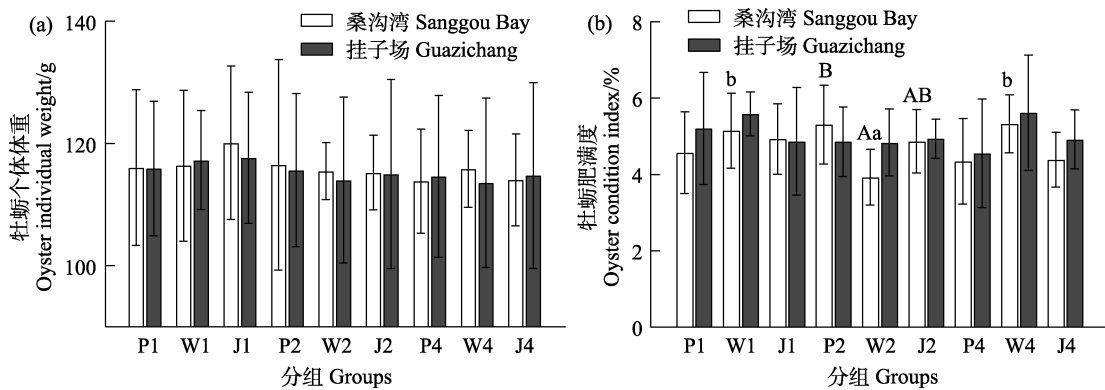


图 6 长牡蛎个体体重和肥满度差异
Fig.6 Comparison of individual weight and condition index of *C. gigas*

等, 2021)。本研究中, 测得桑沟湾海域 Chl-*a* 浓度范围为 0.92~2.11 $\mu\text{g/L}$, 与吴文广等(2016)于 2014 年测得 Chl-*a* 浓度(0.30~1.87 $\mu\text{g/L}$)大致相符; 但测得挂子场海域 Chl-*a* 浓度范围为 0.88~2.41 $\mu\text{g/L}$, 显著低于陈辰等(2013)于 2010 年测得 Chl-*a* 浓度范围(0.76~9.94 $\mu\text{g/L}$); 除 12 月和翌年 5 月以外, 这 2 片海域的 Chl-*a* 浓度和 POM 含量相差较小, 无显著差异($P>0.05$), 这与传统认知中的“乳山水肥”相悖。由此可以推断, 挂子场养殖区可能已经接近甚至超过了该海域的养殖容量。近年来, 已有许多研究证实了这一点。徐雯雯等(2021)研究显示, 乳山市牡蛎养殖面积由 2008 年的 2 900 hm^2 已经发展至 2020 年的 20 000 hm^2 ; 吕旭宁(2017)研究发现, 在牡蛎的摄食压力作用下, 养殖海域中浮游植物的生物量和悬浮颗粒物浓度迅速下降, 难以支撑大规模牡蛎养殖的摄食和营养需求。本研究中, 两海域长牡蛎生长和肥满度均无显著差异($P>0.05$), 这也印证了环境数据的结果。同时, 挂子场海域 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度显著高于桑沟湾海域, 也可能是由于牡蛎的大规模养殖所导致。2021 年市场调研发现, 当年乳山海域

养殖的牡蛎肥满度较差, 相同养殖时间无法达到与往年相同的品质。综上所述, 建议适当降低挂子场海域的牡蛎养殖密度, 降低养殖户的养殖风险, 有利于牡蛎养殖产业的可持续发展。

3.2 牡蛎-海参筏式综合养殖的可行性与优越性

本研究中, 海参密度为 1 头/盘的实验组经过 8 个月养殖后, 个体体重较实验初始体重增重 25% 以上, 同时, 仿刺参的成活率都在 90% 以上, 在较高密度的实验组中, 个体体重均产生了不同程度的下降, 成活率也显著低于密度为 1 头/盘实验组($P<0.05$)。这说明仿刺参在养殖笼有限的空间中, 可通过摄食上层长牡蛎产生的粪便等生物沉积物以及附着在养殖盘上的藻类等附着物满足生长需求(Paltzat *et al*, 2008)。但海参密度增加后, 食物需求也增加, 笼内单位时间内产生的食物不足以满足仿刺参生长需求, 导致个体体重下降、死亡率升高。

在 6 个密度为 1 头/盘的处理组中, 挂子场海域仿刺参个体体重均显著高于桑沟湾海域($P<0.05$), 这

可能与不同海区附着在养殖笼内的藻类不同有关。相同海域和密度为 1 头/盘条件下, W 和 J 处理组的仿刺参个体体重高于 P 处理组, 在挂子场海域有显著差异($P < 0.05$)。推测认为, 无孔养殖盘(W 和 J)相较于带孔养殖盘(P)表面积更大、水流冲刷弱、上层长牡蛎产生的生物沉积物会在养殖盘上积累更多, 同时, 无孔养殖盘上可供底栖硅藻附着的面积更大, 为仿刺参提供了更多食物, 促进其生长。J 处理组相较于 W 处理组的仿刺参个体体重无显著差异($P > 0.05$), 虽然无节网上能附着更多藻类、生物沉积物等有机物, 但考虑到海参活动能力较弱(许慈荣, 1983), 无节网可能会阻碍仿刺参的活动, 从而限制其活动范围, 导致 J 处理组的个体体重未表现出更显著的增长。

本研究中, 各处理组的长牡蛎生长无显著差异, 说明通过该牡蛎-海参筏式综合养殖模式不会影响长牡蛎的生长, 且通过养殖高经济价值的仿刺参, 可以弥补牡蛎养殖密度下降带来的养殖收益下降问题。相较于底播养殖海参, 筏式笼养模式安全性更高, 可有效防止养殖海参被捕食, 提高回捕率和成活率, 且收获时无需潜水捕捞, 降低了人力成本(刘园园等, 2013)。综上所述, 在长牡蛎养殖笼中养殖适当数量的仿刺参可以降低牡蛎养殖密度, 减少环境压力, 同时, 仿刺参可以弥补由于牡蛎密度降低造成的产量和收益下降。因此, 该养殖模式可以作为牡蛎规模化养殖区的有益补充, 从而促进牡蛎养殖产业的健康可持续发展。

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 C, LI Q, MU C M, *et al.* Analysis and evaluation of seasonal variation of water quality in the oyster cultivation regions of Rushan. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2013(1): 38–44 [陈辰, 李琪, 慕翠敏, 等. 乳山牡蛎养殖海域水质状况季节分析与评价. *海洋湖沼通报*, 2013(1): 38–44]
- FANG J G, ZHANG J H, XIAO T, *et al.* Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in Sanggou Bay, China. *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, 8(1): 201–205
- GUI J F, TANG Q S, LI Z J, *et al.* *Aquaculture in China: Success stories and modern trends*. John Wiley and Sons, 2018, 1: 103–104
- HATCHER A, GRANT J, SCHOFIELD B. Effects of suspended mussel culture (*Mytilus* spp.) on sedimentation, benthic respiration and sediment nutrient dynamics in a coastal bay. *Marine Ecology-Progress Series*, 1994, 115(3): 219–235
- LIU Y Y, ZHANG J S, SHI F, *et al.* Contrastive experiment of sea cucumber culture in pond and cage. *Hebei Fisheries*, 2013(11): 46–47 [刘园园, 张劲松, 石峰, 等. 池塘和网箱养殖海参效果的对比试验. *河北渔业*, 2013(11): 46–47]
- LÜ X N. Environmental effects and exploration of sustainable production model of large-scale mariculture of filter-feeding bivalves. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2017 [吕旭宁. 滤食性贝类规模化养殖的环境效应及可持续生产模式探索. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2017]
- NIE M C, HUANG C L, SUI Q, *et al.* Carbon and nitrogen stable isotope analysis and source identification of organic matter in sediments of Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(5): 84–97 [聂梦晨, 黄翠玲, 隋琪, 等. 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. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 84–97]
- PALTZAT D L, PEARCE C M, BARNES P A, *et al.* Growth and production of California sea cucumbers (*Parastichopus californicus* Stimpson) co-cultured with suspended Pacific oysters (*Crassostrea gigas* Thunberg). *Aquaculture*, 2008, 275(1/2/3/4): 124–137
- PAN Y, LI J M, HUANG W D, *et al.* Analysis of current situations, existing problems of oyster industry and its developmental suggestions in Guangxi. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(9): 2608–2618 [潘英, 李坚明, 黄伟德, 等. 广西牡蛎产业现状分析及发展策略. *南方农业学报*, 2021, 52(9): 2608–2618]
- QIN P B, LU J W, ZHAO Z X, *et al.* Change of POC and PN in different experiment ecosystems. *Essays on Shellfish Science (Volume IX)*, 1999, 102–108 [秦培兵, 卢继武, 赵增霞, 等. 扇贝不同养殖模式室内模拟实验中 POC、PN 的变化比较. *贝类学论文集(第IX辑)*, 1999, 102–108]
- SUI X L, SUN J W, WANG F G, *et al.* Reasons of mass death-off in Pacific oyster cultured in Dalian sea shore. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2002, 17(4): 272–278 [隋锡林, 孙景伟, 王富贵, 等. 大连沿海太平洋牡蛎大量死亡原因解析. *大连水产学院学报*, 2002, 17(4): 272–278]
- TAN L T, WANG J G, XU W W, *et al.* Brief talk about the experience of Shandong Rushan oyster industry transform. *China Fisheries*, 2019(4): 50–52 [谭林涛, 王津果, 徐雯雯, 等. 浅谈山东乳山牡蛎产业转型经验. *中国水产*, 2019(4): 50–52]
- WALNE P R. Experiments on the culture in the sea of the butterfish *Venerupis decussata* L. *Aquaculture*, 1976, 8(4): 371–381
- WU W G, ZHANG J H, LIU Y, *et al.* 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 [吴文广, 张继红, 刘毅, 等. 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, WANG W, *et al.* Distribution of chlorophyll-a concentration and its control factors in spring in Sungo Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4855–4863 [吴文广, 张继红, 王巍, 等. 桑沟湾春季叶绿素 a 浓度分布及其影响因素. *生态学报*, 2016, 36(15): 4855–4863]
- XU C R. Morphological structure and living habits of sea cucumber. *Bulletin of Biology*, 1983(6): 22–24 [许慈荣. 海参的形态结构和生活习性. *生物学通报*, 1983(6): 22–24]
- XU W W, ZHENG F Q, YU C S, *et al.* Rushan oyster industry development report. *China Fisheries*, 2021(12): 65–70 [徐雯雯, 郑富强, 于成松, 等. 乳山牡蛎产业发展报告. *中国水产*, 2021(12): 65–70]
- YU X, LU Y B, LIU J Z, *et al.* Ecological farming of oyster. *Journal of Aquaculture*, 2020(4): 1–3, 7 [于潇, 卢钰博, 刘嘉卓, 等. 牡蛎的生态养殖. *水产养殖*, 2020(4): 1–3, 7]
- 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*, 2013, 37(5): 727–734 [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*, 2013, 37(5): 727–734]
- ZHAO J P. Study on three polyculture modes of *Apostichopus japonicus*. Master's Thesis of Yantai University, 2018 [赵聚萍. 三种刺参混养模式的研究. 烟台大学硕士研究生学位论文, 2018]

(编辑 马瑾艳)

Feasibility of Integrated Oyster-Sea Cucumber Raft Culture

HUANG Junhang^{1,2}, FANG Jinghui^①, FANG Jianguang¹, YU Ruihai²,
ZHENG Xiaodong², MAO Yuze¹, JIANG Zengjie¹

(1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences,
Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes,

Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China;

2. Ocean University of China, Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Qingdao 266003, China)

Abstract China is a major aquaculture country, with both the world's largest aquaculture production and area, especially oyster aquaculture which accounts for 80% of the global production. However, its ascent has had numerous negative implications, requiring the development of more environmentally friendly aquaculture methods. The ecological farming model is gradually being acknowledged and encouraged as it is the result of in-depth investigations of marine ecosystems. "Integrated Multi-trophic Aquaculture" is a well-known environmentally friendly aquaculture model. The application effects have been outstanding, as it boosts high output per unit area, improves the marine environment, and improves material utilization. Filter-feeding shellfish are raised at levels that create considerable biodeposition. Particulate matter is transferred from the upper to the lower layers of the water body. Organic matter accumulates on the seafloor in the form of biological sediments, which badly influences the substrate environment, including releasing ammonia nitrogen, increasing dissolved oxygen consumption, and altering seabed biodiversity. Previous research suggests sea cucumbers absorb large amounts of organic matter-rich sediments, reducing the nutrient load caused by coastal shellfish and fish aquaculture. Therefore, a novel sustainable farming model based on the principle of multi-trophic integrated farming could be developed by using sedimentary sea cucumbers to feed on the biological sediments produced by filter-feeding shellfish. The purpose of this study was to investigate the possibility of an oyster-sea cucumber raft integrated culture. Sea cucumbers were stocked in oyster breeding cages. A raft-style integrated oyster-sea cucumber culture

① Corresponding author: FANG Jinghui, E-mail: fangjh@ysfri.ac.cn

was attempted to improve the breeding method. This method allows oyster biological sediments to be utilized in situ, reducing oyster breeding density and maintaining economic benefits. This comparative culture experiment of integrated oyster (*Crassostrea gigas*)-sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) raft culture utilized Sanggou Bay and Guazichang as representative oyster farming locations. We stocked *C. gigas* in the odd-numbered layers and *A. japonicus* in the even-numbered layers of the oyster cages in polyculture. Even-numbered layers had three levels of chassis: common aquaculture plate, holeless aquaculture plate, and holeless aquaculture plate with non-knot nets. The aquaculture plate was the first variable in the experiment. The stocking density of *A. japonicus* in each of the even-numbered layers were separated into three levels, 1, 2, and 4 ind./plate. The second variable in the experiment was stocking density of sea cucumbers. The experiment was simultaneously conducted at both sea locations. Therefore, the experimental design consisted of a three-factor and three-level experiment with a total of 18 treatment groups. During the experiment, we examined to content of: chlorophyll *a*, particulate organic matter, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in both sea locations. The survival rate, growth performance, and condition of *C. gigas* and *A. japonicus* were compared. There was no significant difference in the contents of chlorophyll *a* or particle organic matter between the two marine areas ($P>0.05$). There were significant differences in the four nutrient salt contents between the two locations ($P<0.05$). There were no significant differences in the individual oyster weight or condition between the two locations ($P>0.05$). Only the low-stocking density sea cucumbers grew, with individual weights over 25% higher than that of the high-density individuals. Individual sea cucumber weights and survival rates in the low density treatment groups were considerably higher than those in the high density treatment groups ($P<0.05$). The performance of the holeless aquaculture plate considerably exceeded the common treatment group ($P<0.05$). The holeless aquaculture plates with sea cucumbers at a density of 1 ind./plate achieved the highest results in this study. The chlorophyll in the sea area of Sanggou Bay remained mostly unchanged in this experiment. However, the chlorophyll in the water region of Guazichang reduced when compared with that of previous data. With the recent rapid growth in the oyster industry in Rushan City, the oyster output may have reached or possibly exceeds the area's aquaculture capacity. We advise the oyster breeding density in the Rushan sea area to be reduced to lower the breeding risk for farmers while also promoting the breeding industry's long-term viability. In this experiment, there was no significant difference in oyster growth across the treatment groups, indicating that the integrated oyster-sea cucumber raft culture mode can lower oyster density and reduce environmental impacts. Simultaneously, breeding high-value sea cucumbers compensates for the loss of breeding income induced by the lower oyster breeding density. When compared to bottom-seeded sea cucumbers, this raft cage mode has a higher level of safety and ease of harvest. This method can be used to replenish oyster growing zones with a high density of oysters to boost the aquaculture industry's health and long-term development.

Key words *Apostichopus japonicus*; *Crassostrea gigas*; Integrated multi-trophic aquaculture; Growth; Nutrient; Water environment