

文章编号: 1674-5566(2024)03-0670-12

DOI: 10.12024/jsou.20230904309

三倍体福建牡蛎生长、育肥与海洋环境因子的关系

许翠娅, 杨芳, 郑盛华, 祁剑飞, 陈小红, 魏姗姗, 林永青, 席英玉

(福建省水产研究所 福建省海洋生物增殖与高值化利用重点实验室, 福建 厦门 361013)

摘要: 为探究影响三倍体福建牡蛎生长、育肥的关键海洋环境因子, 对黄岐湾三倍体福建牡蛎养殖区开展为期10个月的调查, 获得湾外和湾内养殖区牡蛎生长指标和海洋环境因子数据, 并采用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)等方法进行数据分析。结果表明: 牡蛎壳长、壳宽、全重、软组织湿重、出肉率等生长指标湾内外组间差异显著, 均为湾外显著大于湾内, 壳高则湾内外差异不显著; 湾外海水中硝酸氮、叶绿素a质量浓度、浮游植物细胞密度显著高于湾内, 其余指标湾内外无显著差异。RDA分析结果显示, 影响牡蛎生长指标的主要因子是水温、硝酸氮、浮游植物细胞密度和化学需氧量, 浮游植物细胞密度和叶绿素a质量浓度对牡蛎出肉率影响作用最大。综合分析认为, 水温、浮游植物生物量、营养盐是影响三倍体牡蛎生长、育肥的关键海洋环境因子, 春季至初夏至少有1个月时间海区平均叶绿素a质量浓度在6 $\mu\text{g/L}$ 有利于牡蛎育肥。本研究可为三倍体牡蛎健康养殖、品质提升和养殖海区的选择提供科学依据。

关键词: 三倍体福建牡蛎; 生长; 育肥; 环境因子; 冗余分析(RDA)

中图分类号: S 968.3 **文献标志码:** A

福建牡蛎(*Crassostrea angulata*)又称葡萄牙牡蛎, 在我国主要分布于长江口以南海域, 也是闽台海域的主要养殖品种^[1]。而三倍体牡蛎由于具有生长快、产量高、肉质好等优势性状^[2-3], 近年来广受养殖业者青睐。福建省作为我国牡蛎养殖大省, 近年来三倍体牡蛎养殖发展迅猛, 2022年三倍体牡蛎养殖面积和产量分别为17 028.56 hm^2 和104.02万t, 分别占全省牡蛎养殖面积和产量的43.56%和41.17%^[4]。目前三倍体牡蛎养殖主要集中在湾内和湾口附近海域, 部分海湾超负荷养殖, 已出现牡蛎生长缓慢、软体部消瘦等状况, 推进三倍体牡蛎养殖向湾外深水海域发展已迫在眉睫。

目前国内外对三倍体福建牡蛎的研究已有一些报道, 主要集中在育种技术^[5-6]、基因组学和倍性生长特性^[7-9]等方面。关于环境因子对三倍体福建牡蛎的影响仅见展建强等^[10]的研究报道, 且仅限于温度、盐度等单因子对牡蛎稚贝生长和存活的影响。自然海域中, 水温、盐度、溶解氧、营养盐、饵料等各种因素对牡蛎生长产生着错综

复杂的影响, 在自然海域开展三倍体福建牡蛎生长、育肥与海洋环境因子关系的研究, 对养殖生产具有重要参考价值和指导意义。

冗余分析(Redundancy analysis, RDA)可用于解析宏观大尺度生物群落结构(如水生动物、鸟类、植被、土地利用类型、微生物等)与环境因子之间的关系, 在分析不同的生态系统和生态毒理学等领域运用广泛^[11-13], 但是未见用于解析海水养殖生物生长与环境因子的关系。本研究在黄岐湾三倍体福建牡蛎养殖区开展为期10个月的调查, 获得湾外和湾内养殖区牡蛎生长指标和海洋环境因子数据, 并采用RDA等方法进行数据分析, 探究自然海域复杂环境下影响三倍体福建牡蛎生长、育肥的关键海洋环境因子, 为三倍体牡蛎健康养殖、品质提升和养殖海区的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域和站位布设

调查海域位于福建连江黄岐湾。黄岐湾位

收稿日期: 2023-09-11 修回日期: 2023-12-11

基金项目: 福建省海洋服务与渔业高质量发展专项(FJHY-YYBH-2022-3)

作者简介: 许翠娅(1973—), 女, 副研究员, 研究方向为渔业生态环境与水产品质量安全。E-mail: 1050150353@qq.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

于连江黄岐半岛畚箕山与定海角之间,海湾三面环山,湾口向东南敞开,水域面积约 200 km²,湾口西面约 12 km 为鳌江口,西南面约 15 km 为闽江口。湾内主要养殖品种有福建牡蛎、海带和鲍,

湾外海域分布有三倍体福建牡蛎养殖区。本研究在黄岐湾三倍体福建牡蛎养殖区布设 6 个调查站位,其中在湾外(L1~L3 站)和湾内(L4~L6 站)分别布设 3 个调查站位,如图 1。

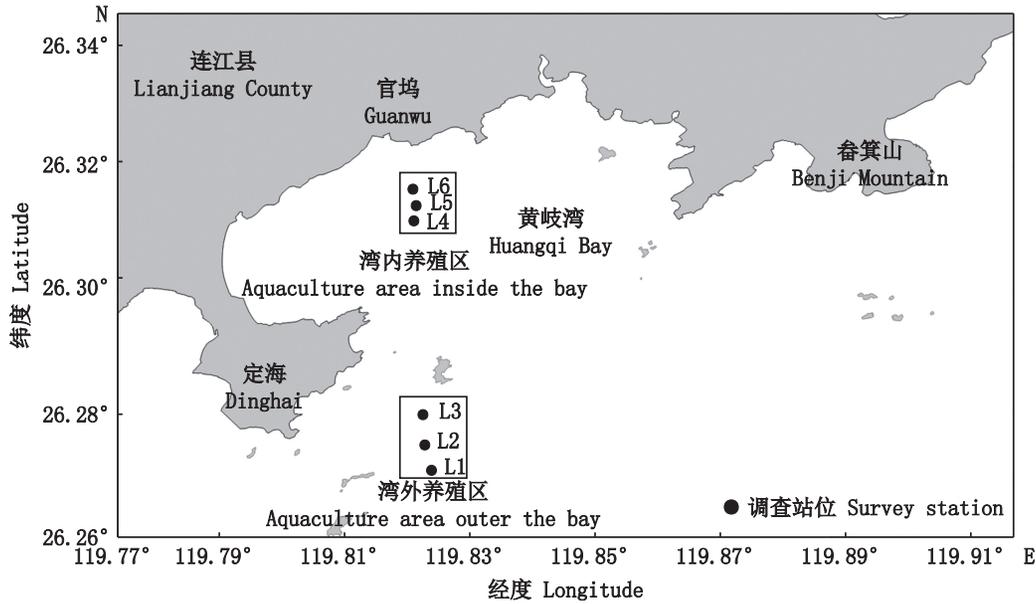


图 1 黄岐湾三倍体牡蛎养殖区环境调查站位图

Fig. 1 Environmental survey station maps of triploid oyster breeding area in Huangqi Bay

1.2 样品采集与分析

调查时间为 2021 年 12 月—2022 年 9 月,每月初对三倍体牡蛎养殖区开展 1 次调查。牡蛎养殖方式为延绳式平挂串养,牡蛎主要集中在水面下 0~2 m 之间,养殖海域水交换条件较好,海水混合较均匀,因此海水样品采样层次为水面下 0.5 m 层。用有机玻璃采水器采集海水样品,水温、盐度、pH 和溶解氧采用 WTW Multi 3630 多参数分析仪现场测定,营养盐、悬浮物、化学需氧量、叶绿素 a、浮游植物等数据待样品运回实验室分析,各项目分析方法按 GB 17378—2007《海洋监测规范》^[14]或 HJ 442—2020《近岸海域环境监测技术规范》^[15]等规定的方法执行。

牡蛎样品与海水样品同时同地随机采集,样品带回实验室后清除外壳污损生物并洗刷干净,吸干表面水分,用电子分析天平(精密度 0.01 g)测定牡蛎全重和软组织湿重,用游标卡尺(精密度 0.01 mm)测定其壳长、壳宽、壳高。试验用的牡蛎苗种为同一批三倍体福建牡蛎附壳苗。

1.3 评价方法和评价标准

1.3.1 海水营养状态评价

参照 HY/T 069—2005《赤潮监测技术规范》^[16]中营养状态质量指数(Nutritive quality index, NQI)对海水营养状态进行评价。

$$I_{NQI} = \frac{C_{COD} + C_{T-N} + C_{T-P} + C_{Chl.a}}{C'_{COD} + C'_{T-N} + C'_{T-P} + C'_{Chl.a}} \quad (1)$$

式中: I_{NQI} 为营养状态质量指数 NQI 值; C_{COD} 、 C_{T-N} 、 C_{T-P} 和 $C_{Chl.a}$ 分别为海水中化学需氧量、总氮、总磷和叶绿素 a 的实测质量浓度, mg/L; C'_{COD} 、 C'_{T-N} 、 C'_{T-P} 和 $C'_{Chl.a}$ 分别为海水中上述各项指标的评价标准,其中: $C'_{COD}=3.0$ mg/L, $C'_{T-N}=0.6$ mg/L, $C'_{T-P}=0.03$ mg/L, $C'_{Chl.a}=10$ μg/L。

根据 NQI 值将海域营养水平分为 3 级: NQI 值 < 2, 海水为贫营养水平; NQI 值在 2~3, 海水为中营养水平; NQI 值 > 3, 海水为富营养水平。

1.3.2 浮游植物群落结构评价

采用 GB 17378—2007《海洋监测规范》^[14]第 7 部分附录 B 的污染生态评价和孙军等^[17]方法进行评价。

多样性指数(Shannon-Wiener):

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

均匀度(Pielou):

$$J = H' / \log_2 S \quad (3)$$

物种优势度(Y):

$$Y = (n_i/N) \times f_i \quad (4)$$

式中: S 为样品中物种总数; n_i 为第*i*种的个体数; N 为总个体数; P_i 为第*i*种的个体数(n_i)与总个体数(N)的比值; f_i 为出现率,当物种优势度 $Y \geq 0.02$ 时,该种即为优势种。

1.3.3 牡蛎生长指标

包括:壳长、壳宽、壳高、全重、软组织湿重、出肉率、壳长日增长率、壳宽日增长率、壳高日增长率、全重日增长率、软组织湿重日增长率等,计算公式如下:

$$y = M_s / M_t \times 100\% \quad (5)$$

$$R_{sl} / R_{sw} / R_{sh} = (S_1 - S_0) / t \quad (6)$$

$$R_{TM} / R_{SM} = (M_1 - M_0) / t \quad (7)$$

式中: y 为出肉率; M_s 为软组织湿重, g ; M_t 为全重, g ; R_{sl} 为壳长日增长率,mm/d; R_{sw} 为壳宽日增长率,mm/d; R_{sh} 为壳高日增长率,mm/d; R_{TM} 为全重日增长率,g/d; R_{SM} 为软组织湿重日增长率,g/d; S_1 和 S_0 分别为实验某时间段结束和开始时牡蛎的平均壳长、壳宽或壳高,mm; M_1 和 M_0 分别为实验某时间段结束和开始时牡蛎的全重或软组织湿重, g ; t 为实验天数,d。

1.4 数据分析

应用SPSS 25.0对调查数据进行单因素方差分析(Duncan's多重比较法)和回归分析,湾内和湾外组间差异分析采用独立样本 T 检验($\alpha = 0.05$)。采用Canoco for Windows 4.5软件对牡蛎生长指标与水质因子进行冗余分析(RDA),在进行RDA和相关性分析时对浮游植物细胞密度进行 $\lg(X+1)$ 转换。RDA分析结果用Canodraw软件制作双序图应用。

2 结果

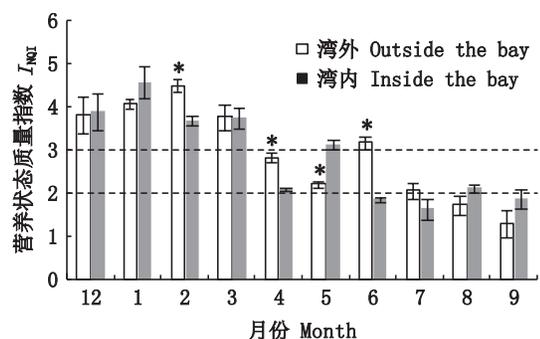
2.1 海洋理化环境因子的变化

2021年12月—2022年9月黄岐湾三倍体牡蛎养殖区主要海洋环境因子变化见表1。调查期间养殖区各站位水温为10.9~28.9℃,平均水温

19.4℃;12—2月水温呈逐渐下降之势,2月水温最低,之后水温逐渐上升,8月水温最高。盐度为24.4~33.3,平均29.7,其中6月受连续降雨影响,海水盐度较低。无机氮含量为0.037~0.560 mg/L,平均0.294 mg/L;12—3月海水中无机氮含量较高,之后基本呈下降趋势。活性磷酸盐含量为0.004~0.047 mg/L,平均0.024 mg/L;活性硅酸盐含量为0.342~1.54 mg/L,平均0.801 mg/L;12—3月活性磷酸盐、活性硅酸盐含量较高,4月显著下降,之后呈上下波动趋势。总氮含量为0.130~0.964 mg/L,平均0.458 mg/L,1—9月总氮含量基本呈下降的变化趋势。总磷含量为0.013~0.102 mg/L,平均0.051 mg/L,12—3月总磷含量较高,4月显著下降,之后呈上下波动趋势。调查数据表明,养殖区水质状况总体较好,营养盐较丰富,硝酸氮含量湾外显著高于湾内($P < 0.05$),其余指标湾内外无显著差异($P > 0.05$)。

2.2 海水营养状态质量指数变化

调查期间养殖区海水营养状态指数(NQI)为0.92~4.99,平均值为2.90。12—3月养殖区各站位海水均为富营养水平,4月处于中营养水平,5月湾外、湾内养殖区分别为中营养、富营养水平,6月湾外养殖区基本处于富营养水平,湾内养殖区为贫营养水平。7—9月湾外养殖区基本处于贫营养水平,湾内养殖区处于贫营养或中营养水平。2月、4—6月湾外和湾内养殖区NQI值存在显著差异($P < 0.05$),但是整个调查期间湾外与湾内无显著差异($P > 0.05$),NQI值分别为2.95和2.86,均为中营养水平(图2)。



湾外养殖区与同一时间湾内养殖区相比,*表示 $P < 0.05$ 。Aquaculture area outside the bay comparing with aquaculture area inside the bay at the same period, * represented that $P < 0.05$.

图2 2021年12月—2022年9月三倍体牡蛎养殖区海水营养状态质量指数(NQI)

Fig. 2 Nutritive quality index (NQI) of triploid oyster breeding areas from December 2021 to September 2022

2.3 叶绿素 a 和浮游植物的分布特征

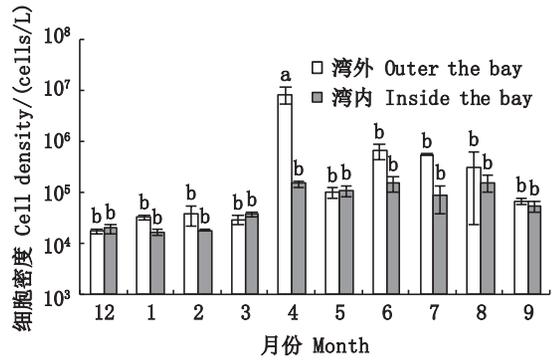
调查期间养殖区各站位叶绿素 a 含量波动范围为 0.56~13.0 μg/L,平均值为 2.60 μg/L。叶绿素 a 含量季节变化显著,12—3 月海水中叶绿素 a 含量较低(0.87~1.76 μg/L),高值出现在 4 月(平均值 7.08 μg/L),次高峰出现在 6 月(平均值 5.35 μg/L)。湾外和湾内养殖区叶绿素 a 含量平均值分别 3.63 和 1.58 μg/L,湾外显著高于湾内($P<0.05$)。调查期间湾外、湾内养殖区叶绿素 a 含量分别为 0.87~12.5 μg/L、0.78~2.72 μg/L,湾外波动范围大于湾内(表 1)。

养殖区浮游植物种类较丰富,共鉴定 6 门 65 属 133 种(包括变种和变型等),其中硅藻门种类占绝对优势,共 46 属 101 种,占总种类数的 75.9%;甲藻门共 15 属 28 种,占总种类数的 21.1%;蓝藻门、金藻门、裸藻门和原生动物门各 1 属 1 种,分别占总种类数的 0.75%。浮游植物的优势种为中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)和柔弱拟菱形藻(*Pseudo-nitzschia delicatissima*),物种优势度分别为 0.798 和 0.027。各站位浮游植物细胞密度为 $1.31 \times 10^4 \sim 1.20 \times 10^7$ cells/L,平均值为 5.33×10^5 cells/L。12—3 月浮游植物细胞密度较低($1.80 \times 10^4 \sim 3.21 \times 10^4$ cells/L),最低值出现在 12 月;4—8 月浮游植物细胞密度显著升高,其中 4 月湾外海域发生赤潮,浮游植物细胞密度平均值高达 8.13×10^6 cells/L,湾内平均值为 1.43×10^5 cells/L,湾外显著高于湾内($P<0.05$);9 月浮游植物细胞密度略有下降(图 3)。湾外和湾内养殖区浮游植物细胞密度的平均值分别为 9.89×10^5 和 7.75×10^4 cells/L,湾外显著高于湾内($P<0.05$)。浮游植物多样性指数(H')为 0.147~4.316,平均值为 2.685;均匀度(J)为 0.036~0.863,平均值为 0.536。除 4 月发生赤潮,浮游植物 H' 和 J 值较低外,其余调查时间浮游植物 H' 和 J 值在正常范围内,其中 12、1、3、8 和 9 月 $H'>3$,表明浮游植物多样性水平良好,群落结构较稳定(图 4)。

2.4 三倍体福建牡蛎生长情况

2021 年 12 月—2022 年 9 月黄岐湾养殖区三倍体福建牡蛎生长情况见表 2。由表 2 可知,4 月牡蛎壳长、壳宽、壳高湾外均显著大于湾内($P<0.05$),牡蛎全重在 7 月湾外显著大于湾内($P<$

0.05),7—9 月牡蛎软组织湿重和出肉率均为湾外显著大于湾内($P<0.05$),其余调查时间牡蛎各生长指标湾外和湾内无显著差异($P>0.05$)。调查期间湾外养殖区牡蛎出肉率平均值为 16.0%~26.4%,其中 4—9 月牡蛎出肉率 $>20\%$,7 月最高;湾内养殖区牡蛎出肉率平均值为 14.7%~23.5%,其中 4—7 月牡蛎出肉率 $>20\%$,6 月最高。调查期间牡蛎壳长、壳宽、全重、软组织湿重、出肉率等生长指标湾内与湾外组间差异显著,均为湾外显著大于湾内($P<0.05$),壳高则组间差异不显著($P>0.05$)。调查数据表明,湾外牡蛎的外形规格、重量、出肉率均显著大于湾内($P<0.05$),且牡蛎外形更饱满,湾内牡蛎则更加瘦长。



图中不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。 Different letters in the figure indicate significant differences ($P<0.05$)。

图 3 2021 年 12 月—2022 年 9 月三倍体牡蛎养殖区浮游植物细胞密度的变化

Fig. 3 Changes in cell density of phytoplankton in triploid oyster culture area from December 2021 to September 2022

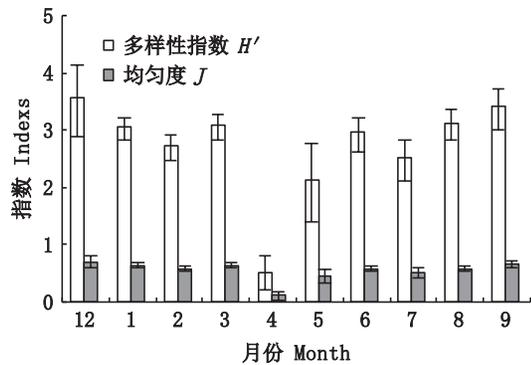


图 4 2021 年 12 月—2022 年 9 月三倍体牡蛎养殖区浮游植物多样性指数和均匀度的变化

Fig. 4 Changes of diversity index and evenness of phytoplankton in triploid oyster culture area from December 2021 to September 2022

表1 2021年12月—2022年9月三倍体牡蛎养殖区海洋环境因子变化

Tab. 1 Changes in marine environmental factors in triploid oyster breeding areas from December 2021 to September 2022

环境因子 Environmental factors	养殖区 Aquaculture area	月份 Month									
		12月 December	1月 January	2月 February	3月 March	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September
水深 D/m	湾外	15.2±0.3	16.3±0.7	15.4±0.6	17.9±0.4	17.0±0.2	16.2±0.1	17.2±1.0	17.0±0.1	14.6±0.4	15.9±0.5
	湾内	6.5±0.5	6.1±0.1	5.8±0.2	8.0±0.6	6.6±0.2	6.4±0.1	6.8±0.1	5.5±0.9	5.6±0.4	5.5±0.2
水温 T/°C	湾外	16.9±0.1	13.4±0.2	11.3±0.1	11.8±0.1	14.0±0.1	19.4±0.1	23.1±0.1	27.6±0.1	27.7±0.1	27.9±0.1
	湾内	16.3±0.1	13.2±0.1	10.9±0.1	12.1±0.1	14.2±0.1	20.1±0.1	23.3±0.2	28.3±0.1	28.8±0.1	28.3±0.1
盐度 S	湾外	28.1±0.1	28.6±0.1	28.4±0.1	29.0±0.1	28.4±0.4	29.8±0.2	24.6±0.2	31.2±0.2	32.8±0.2	33.3±0.1
	湾内	28.5±0	28.4±0.1	28.4±0	28.7±0.1	29.6±0	30.1±0.1	27.6±0.1	32.1±0.1	32.8±0.1	33.3±0
pH	湾外	8.05±0.01	8.11±0	8.13±0.01	8.18±0.01	8.05±0	8.13±0.01	8.21±0.04	8.09±0.01	8.10±0.01	8.01±0.01
	湾内	8.03±0.01	8.12±0.01	8.19±0.01	8.30±0.01	8.04±0	7.99±0.01	8.09±0	8.00±0.01	8.01±0.01	7.93±0
溶解氧 DO/(mg/L)	湾外	8.14±0.07	8.62±0.01	9.33±0.01	9.24±0.08	8.37±0.02	7.59±0.03	8.65±0.03	6.54±0.05	7.19±0.24	5.88±0.09
	湾内	8.05±0.03	8.75±0.05	9.68±0.05	9.91±0.17	8.28±0.03	7.24±0.05	8.44±0.06	6.50±0.05	6.91±0.09	5.01±0.21
化学需氧量 COD/(mg/L)	湾外	0.53±0.06	0.38±0.04	0.33±0.03	0.44±0.07	0.85±0.02	0.59±0.04	1.05±0.02	0.44±0.03	0.72±0.13	0.36±0.07
	湾内	0.53±0.08	0.44±0.03	0.30±0.01	0.50±0.06	0.58±0.02	0.58±0.02	0.65±0.03	0.60±0.21	1.00±0.31	0.27±0.02
悬浮物 SS/(mg/L)	湾外	19.7±4.6	15.1±0.2	24.5±5.7	19.1±0.8	6.7±0.7	4.9±0.7	5.9±0.2	4.8±0.8	5.8±0.2	6.7±1.6
	湾内	22.7±4.0	28.1±0.7	23.1±3.8	28.2±2.9	8.4±1.9	10.0±1.7	2.5±0.3	2.4±0.3	6.4±1.0	6.6±0.6
硝酸氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	湾外	0.482±	0.505±	0.516±	0.496±	0.271±	0.202±	0.168±	0.047±	0.024±	0.049±
	湾内	0.011	0.001	0.018	0.019	0.032	0.014	0.025	0.011	0.002	0.004
亚硝酸氮 NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	湾外	0.414±	0.481±	0.475±	0.441±	0.195±	0.197±	0.059±	0.029±	0.024±	0.075±
	湾内	0.075	0.027	0.006	0.018	0.012	0.004	0.012	0.001	0.001	0.001
氨氮 TAN/(mg/L)	湾外	0.010±0	0.007±	0.003±	0.008±0	0.009±0	0.028±	0.027±	0.005±	0.003±	0.021±
	湾内	0.003	0.003	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001
活性磷酸盐 AP/(mg/L)	湾外	0.015±	0.013±	0.017±	0.016±	0.016±	0.042±	0.017±	0.043±	0.012±	0.023±
	湾内	0.003	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	0.005	0.008	0.001	0.002
活性硅酸盐 ASi/(mg/L)	湾外	0.017±	0.015±	0.017±	0.017±	0.028±	0.078±	0.016±	0.019±	0.011±	0.062±
	湾内	0.001	0.005	0.002	0.001	0.003	0.002	0.004	0.002	0.002	0.007
总氮 TN/(mg/L)	湾外	0.039±	0.039±	0.040±	0.035±	0.007±	0.017±	0.031±	0.008±	0.011±0	0.006±
	湾内	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002
总磷 TP/(mg/L)	湾外	0.043±	0.040±	0.033±0	0.024±	0.020±	0.031±	0.019±0	0.004±	0.013±	0.024±
	湾内	0.003	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
叶绿素 a Chl.a/(μg/L)	湾外	1.050±	1.080±	1.150±	1.020±	0.606±	0.704±	1.450±	0.582±	0.360±	0.592±
	湾内	0.180	0.030	0.010	0.020	0.073	0.029	0.070	0.069	0.013	0.029
总氮 TN/(mg/L)	湾外	0.864±	1.050±	1.170±	1.000±	0.367±	0.816±	0.765±	0.367±	0.373±	0.662±
	湾内	0.027	0.030	0.020	0.010	0.006	0.019	0.030	0.017	0.031	0.006
总磷 TP/(mg/L)	湾外	0.581±	0.713±	0.587±	0.588±	0.456±	0.445±	0.451±	0.401±	0.181±	0.153±
	湾内	0.033	0.051	0.010	0.013	0.029	0.032	0.019	0.018	0.007	0.020
叶绿素 a Chl.a/(μg/L)	湾外	0.560±	0.857±	0.619±	0.579±	0.402±	0.553±	0.307±	0.302±	0.208±	0.222±
	湾内	0.007	0.078	0.026	0.024	0.008	0.030	0.017	0.042	0.012	0.035
总磷 TP/(mg/L)	湾外	0.075±	0.080±	0.098±	0.077±	0.016±0	0.034±	0.038±	0.021±	0.026±	0.024±
	湾内	0.013	0.004	0.003	0.008	0.001	0.003	0.003	0.003	0.005	0.009
叶绿素 a Chl.a/(μg/L)	湾外	0.078±	0.088±	0.074±	0.076±	0.032±	0.057±	0.026±	0.021±	0.035±	0.040±
	湾内	0.012	0.009	0.004	0.008	0.001	0.001	0.002	0.005	0.001	0.006
叶绿素 a Chl.a/(μg/L)	湾外	1.71±0.10	0.87±0.06	1.36±0.57	0.87±0.05	12.5±0.60	1.28±0.06	8.14±0.90	5.31±0.75	3.15±1.48	1.13±0.01
	湾内	1.82±0.06	0.87±0.28	0.78±0.09	0.87±0.20	1.66±0.23	1.35±0.32	2.55±0.22	2.31±0.14	2.72±0.25	0.85±0.05

从牡蛎生长速率的月变化来看,12月初—1月初牡蛎壳长、壳宽、壳高的日增长率最高,平均值分别为0.50、0.30、0.79 mm/d;生长的次高峰出现在4月初—5月初,壳长、壳宽、壳高的日增长率平均值分别为0.42、0.21、0.66 mm/d;2月初—3月初牡蛎外壳几乎无生长(图5a)。牡蛎全重的增长高峰出现在8月初—9月初,平均日增长率为1.39 g/d,6月初—8月初牡蛎全重增长也较快,

平均日增长率为0.82 g/d,2月初—3月初牡蛎全重的日增长率仅为0.008 g/d。牡蛎软组织湿重的增长高峰出现在6月初—7月初和8月初—9月初,平均日增长率分别为0.21和0.19 g/d,12月初—3月初牡蛎平均软组织湿重增长率仅为0.006 g/d(图5b)。总体而言,12月牡蛎外壳生长较快,1—3月牡蛎生长缓慢,4月开始生长速率明显提高,6—9月牡蛎全重和软组织湿重增长较快。

调查期间三倍体牡蛎生长情况总体良好,但是在5月底—6月中旬湾外养殖区牡蛎大面积死亡,6月中旬的应急监测数据表明:水质参数未见明显异常,湾外养殖区(L1~L3站)牡蛎死亡率在

50%~90%之间,湾内养殖区牡蛎存活情况良好,牡蛎疱疹病毒检测结果为阴性。牡蛎大面积死亡原因在讨论部分具体分析。

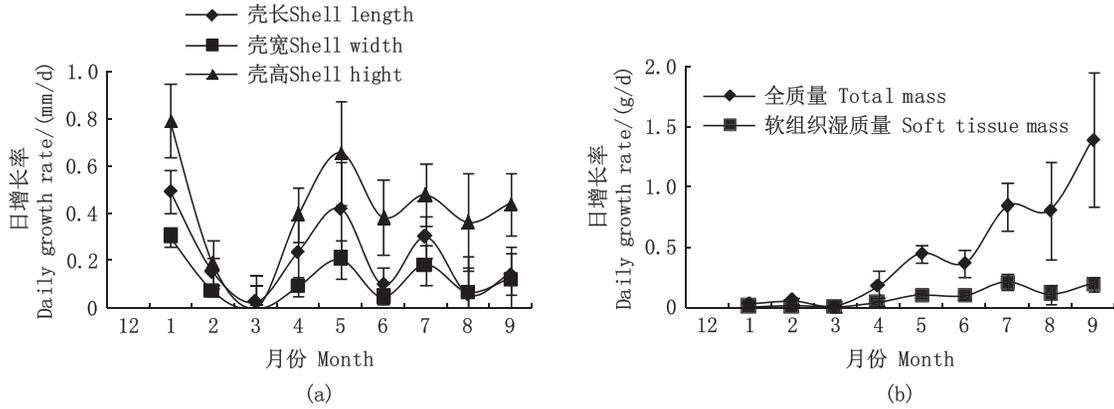


图5 三倍体牡蛎的生长速率
Fig. 5 Growth rate of triploid oysters

表2 2021年12月—2022年9月三倍体牡蛎生长情况
Tab. 2 Growth of triploid oysters from December 2021 to September 2022

生长指标 Growth indexes	养殖区 Aquaculture area	月份 Month									
		12月 December	1月 January	2月 February	3月 March	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September
壳长 Shell length/mm	湾外	1.68±0.43 ^j	20.35±3.30 ^{hi}	25.09±2.12 ^h	26.08±3.72 ^h	36.83±6.71 ^g	44.02±3.85 ^{ef}	48.23±3.82 ^{de}	58.05±3.78 ^{abc}	59.13±1.21 ^{abc}	64.03±5.02 ^a
	湾内	1.29±0.25 ^j	16.30±2.48 ⁱ	20.22±4.27 ^{hi}	20.70±2.12 ^{hi}	25.22±2.80 ^h	41.67±3.19 ^{fg}	43.82±4.06 ^{ef}	52.85±3.52 ^{cd}	55.08±5.04 ^{bc}	59.84±3.17 ^{ab}
壳宽 Shell width/mm	湾外	0.95±0.19 ^g	12.09±1.17 ^{ef}	14.63±1.63 ^c	14.83±2.16 ^c	18.32±3.27 ^d	22.62±1.84 ^c	23.92±1.74 ^c	29.30±3.82 ^b	30.69±2.13 ^b	34.76±3.12 ^a
	湾内	0.74±0.17 ^g	10.14±1.58 ^f	11.88±1.54 ^{ef}	11.13±1.93 ^{ef}	13.76±1.29 ^{cd}	21.15±1.07 ^{cd}	22.81±1.44 ^c	28.90±1.55 ^b	31.22±3.14 ^b	35.44±2.65 ^a
壳高 Shell height/mm	湾外	2.54±0.66 ^j	32.67±5.15 ^{hi}	38.23±2.61 ^h	38.29±6.06 ^h	54.16±5.64 ^g	67.35±6.84 ^f	76.24±2.65 ^e	94.12±1.68 ^{cd}	100.02±4.23 ^{bc}	113.51±3.72 ^a
	湾内	1.98±0.45 ^j	25.74±4.67 ⁱ	30.71±7.82 ⁱ	30.48±4.34 ⁱ	39.99±4.95 ^h	63.65±3.41 ^f	78.54±2.49 ^e	90.33±3.22 ^d	104.14±1.29 ^b	119.75±1.27 ^a
全质量 Total mass/g	湾外	2.21±1.51 ⁱ	3.62±1.49 ⁱ	5.52±1.29 ^{hi}	6.20±2.50 ^{hi}	14.72±6.40 ^{ghi}	27.06±4.88 ^{efg}	37.32±6.09 ^e	66.79±8.60 ^c	85.84±3.83 ^b	129.20±20.71 ^a
	湾内	1.09±0.62 ⁱ	1.88±0.88 ⁱ	3.02±1.54 ⁱ	2.76±1.07 ⁱ	5.66±1.63 ^{hi}	18.41±3.57 ^{gh}	30.88±6.28 ^{ef}	53.51±4.39 ^d	78.04±14.31 ^{bc}	126.59±14.00 ^a
软组织湿质量 Soft tissue mass/g	湾外	0.43±0.31 ⁱ	0.60±0.27 ⁱ	0.88±0.18 ⁱ	1.14±0.48 ⁱ	3.39±1.43 ^{hi}	6.32±1.20 ^{fg}	9.41±1.39 ^e	17.58±1.52 ^c	21.32±1.28 ^b	27.52±1.55 ^a
	湾内	0.21±0.13 ⁱ	0.29±0.12 ⁱ	0.45±0.23 ⁱ	0.51±0.14 ⁱ	1.28±0.43 ⁱ	4.18±0.81 ^{gh}	7.28±1.65 ^{ef}	12.25±2.49 ^d	14.53±4.07 ^d	21.19±4.09 ^b
出肉率 Fillet yield/%	湾外	19.2±0.8 ^{de}	16.4±0.9 ^{efg}	16.0±0.5 ^{fg}	18.3±0.4 ^{ef}	23.1±0.3 ^{bc}	23.3±0.6 ^{bc}	25.3±1.4 ^{ab}	26.4±1.1 ^a	24.8±0.5 ^{ab}	21.6±2.7 ^{cd}
	湾内	18.4±1.8 ^{ef}	15.5±0.7 ^{fg}	14.7±0.4 ^g	19.3±3.3 ^{de}	22.5±1.4 ^{bc}	22.7±1.0 ^{bc}	23.5±0.9 ^{abc}	22.8±3.5 ^{bc}	18.4±2.1 ^{ef}	16.7±2.7 ^{efg}

注:同一指标数据上标不同表示组间存在显著差异(P<0.05)。

Notes: Different superscripts of the same index indicate there are significant differences between groups (P<0.05).

2.5 冗余分析(RDA)结果

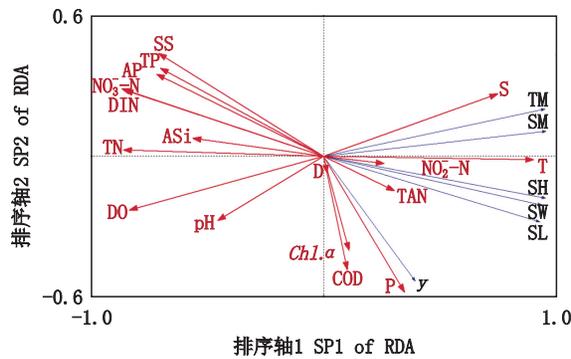
将2021年12月—2022年9月湾外和湾内养

殖区牡蛎的生长指标(壳长、壳宽、壳高、全重、软组织湿重、出肉率)与海洋环境因子进行RDA分

析。结果显示,第1排序轴和第2排序轴中,牡蛎生长指标和环境因子的相关性分别为0.981和0.869,在前2个排序轴中,生长指标和环境因子的变化累计分别为95.2%和99.7%。Monte Carlo随机置换检验表明,所有典范特征轴与牡蛎生长指标都极显著相关($P < 0.01$),表明排序结果是可信的,能够较好地反映湾外和湾内养殖区牡蛎的生长指标与环境因子之间的关系。

从图6可以看出,T(水温)、 NO_3^- -N(硝酸氮)、TN(总氮)和DIN(无机氮)是第一轴的主要影响因子,相关系数分别为0.885 3、-0.849 5、-0.842 6和

-0.836 7,第二轴的主要影响因子为P(浮游植物细胞密度)、COD(化学需氧量)、SS(悬浮物)和 Chl. a (叶绿素a),相关系数分别为-0.503 0、-0.420 3、0.381 2和-0.348 9。分析结果显示,影响三倍体牡蛎生长指标的主要因子是水温、 NO_3^- -N、P和COD。牡蛎各生长指标与S(盐度)、T、 NO_2^- -N(亚硝酸氮)、TAN(氨氮)、P、 Chl. a 、COD、D(水深)呈正相关,与SS、TP(总磷)、AP(活性磷酸盐)、 NO_3^- -N、DIN、ASi(活性硅酸盐)、TN、DO(溶解氧)、pH呈负相关。此外,P、 Chl. a 与 γ 的夹角最小,说明这两个环境因子对牡蛎出肉率的影响作用最大。



D. 水深; T. 水温; S. 盐度; SS. 悬浮物; DO. 溶解氧; COD. 化学需氧量; NO_3^- -N. 硝酸氮; NO_2^- -N. 亚硝酸氮; TAN. 氨氮; DIN. 无机氮; AP. 活性磷酸盐; ASi. 活性硅酸盐; TN. 总氮; TP. 总磷; Chl. a . 叶绿素a; P. 浮游植物细胞密度; SL. 壳长; SW. 壳宽; SH. 壳高; TM. 全重; SM. 软组织湿重; γ . 出肉率。

D. Depth of water; T. Water temperature; S. Salinity; SS. Suspended solids; DO. Dissolved oxygen; COD. Chemical oxygen demand; NO_3^- -N. Nitrate nitrogen; NO_2^- -N. Nitrite nitrogen; TAN. Total Ammonia-nitrogen; DIN. Dissolved inorganic nitrogen; AP. Active phosphate; ASi. Active silicate; TN. Total nitrogen; TP. Total phosphorus; Chl. a . Chlorophyll-a; P. Cell density of Phytoplankton; SL. Shell length; SW. Shell width; SH. Shell height; TM. Total mass; SM. Soft tissue mass; γ . Fillet yield.

图6 三倍体牡蛎生长指标与环境因子的RDA排序图

Fig. 6 Two-dimensional RDA ordination for growth indicators in triploid oysters and environmental factors

3 讨论

3.1 牡蛎生长、育肥与海洋理化环境因子的关系

水温对牡蛎的摄食、代谢等生理活动均有显著影响,在适宜的水温范围内,牡蛎滤水率、摄食率均随着水温的升高而增大,达到“阈值”后,随着水温的升高其滤水率、摄食率反而下降^[18],耗氧率等代谢指标也有相似的变化趋势^[19]。不适或剧烈的温度变化会降低牡蛎血细胞和酶的活性,减弱机体免疫防御能力,对呼吸、摄食、生长发育产生不利影响^[20-21]。展建强等^[10]研究表明,三倍体福建牡蛎稚贝适宜生长温度为12.00~33.35℃,最适宜生长温度为26.00~28.00℃。调查期间黄岐湾养殖区各站位水温为10.9~28.9℃,平均19.4℃。除2月外(平均水温11.1℃),其余月份水温均在三倍体福建牡蛎的适宜生长范围

内。从生长速率来看,水温对牡蛎生长影响显著。水温最低的2月初—3月初,牡蛎壳长、壳宽、壳高的日增长率也最低,当水温低于12℃时牡蛎外壳几乎无生长。春季水温明显升高,牡蛎壳长、壳宽、壳高的日增长率也随之提高,4—9月日增长率总体呈波浪状变化趋势。牡蛎全重、软组织湿重同样在冬季增长缓慢,春季日增长率明显提高,水温较高的6—9月牡蛎全重和软组织湿重增长最快。RDA分析结果表明,影响牡蛎生长指标的主要因子是水温、硝酸氮、浮游植物细胞密度和化学需氧量,且水温与牡蛎各生长指标呈正相关关系。相关性分析显示,水温与牡蛎全重日增长率、软组织湿重日增长率均呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。上述结果表明水温是影响三倍体牡蛎生长、育肥的关键海洋环境因子。

三倍体福建牡蛎稚贝适宜生长盐度为

11.76~45.39,最适生长盐度为23.40~26.00^[10]。黄岐湾养殖区海水盐度为24.4~33.3,平均29.7,波动范围在三倍体福建牡蛎适宜生长盐度范围内。在一定盐度范围内,盐度变化不会导致牡蛎死亡,但是如果海水盐度的剧烈变化超出牡蛎自身调节能力范围,就会严重影响牡蛎摄食、能量代谢和抗氧化酶活性^[21-23],超过牡蛎承受能力范围的急性低盐胁迫,会导致牡蛎体内的渗透压无法迅速调节平衡,进而影响牡蛎的正常生理活动甚至导致死亡^[24-25]。5月底—6月中旬湾外养殖区牡蛎大面积死亡的原因,应该与5月中旬—6月初海水盐度的剧烈变化密切相关。该时间段持续强降雨,湾外养殖区受闽江、鳌江等径流影响较大,盐度波动范围较大,牡蛎死亡率高的区域明显有江水带来的漂浮物,远离江水的区域牡蛎死亡率则明显下降。湾内养殖区受淡水径流影响小,牡蛎存活情况良好。因此推测牡蛎大面积死亡的原因为牡蛎肥满度高时抗性差,连续强降雨,江水冲击以及盐度等环境因子急剧变化,导致牡蛎应激死亡。

RDA分析结果显示,氮营养盐对牡蛎生长有重要影响。营养盐对牡蛎生长的影响主要是通过浮游植物间接产生的。黄岐湾养殖区营养盐含量季节变化明显,冬季营养盐含量较高,春、夏季浮游植物(主要是硅藻)生长繁殖旺盛,海水中氮、磷、硅含量显著下降。冬季也是牡蛎生长缓慢的季节,春、夏季牡蛎生长较快,因此牡蛎生长速率与海水中营养盐含量呈负相关关系,其中与无机氮和活性磷酸盐呈极显著负相关关系($P < 0.01$)。

RDA分析结果显示,化学需氧量也是影响三倍体牡蛎生长的主要因子之一。化学需氧量可大致反映水体中有机物的水平,黄岐湾养殖区海水质量总体情况良好,水体中有机物主要包括浮游植物、有机碎屑等贝类饵料,因此化学需氧量与牡蛎各生长指标呈正相关关系,RDA分析结果从根本上体现的是浮游植物生物量对牡蛎生长、育肥的影响。

3.2 牡蛎生长、育肥与浮游植物种类、生物量的关系

浮游植物是滤食性贝类的主要食物来源,因此浮游植物的种类组成和生物量对贝类生长、育肥至关重要。已有研究^[26-28]表明,滤食性贝类对

不同浮游植物种类的截留率和吸收利用率存在差异,而影响截留率的因素包括浮游植物的粒径大小、形状和柔韧性等。滤食性贝类对饵料大小具有一定的选择性,浮游植物粒径过小不利于贝类摄食^[26, 29-30]。研究表明,美洲牡蛎(*Crassostrea virginica*)可以完全过滤粒径大于5 μm 的颗粒,而对粒径2 μm 的颗粒截留率降至50%^[26]。有学者认为,硅藻多为链状、针状和椭圆形且具有不易变形的硅酸盐外壳,因此更容易被滤食性贝类的鳃保留^[27]。但也有不同观点,认为贝类更倾向于摄食甲藻,对硅藻的选择性较低^[31-32]。黄岐湾三倍体牡蛎养殖区浮游植物种类较丰富(133种),硅藻门和甲藻门种类分别占总种类数的75.9%和21.1%,优势种为中肋骨条藻和柔弱拟菱形藻,浮游植物多样性水平良好,群落结构较稳定。总体而言,浮游植物种类组成及优势种粒径大小较适合牡蛎摄食。

由于不同浮游植物种类细胞大小存在差异,因此与细胞密度相比,以叶绿素a含量来衡量浮游植物的生物量更为准确,也更具有养殖生产指导意义。调查期间湾外和湾内养殖区叶绿素a含量的平均值分别为3.63和1.58 $\mu\text{g/L}$,浮游植物细胞密度的平均值分别为 9.89×10^5 和 7.75×10^4 cells/L,二者均为湾外显著高于湾内。而牡蛎生长情况显示,湾外牡蛎外形规格、重量和出肉率均显著大于湾内,这与湾内外浮游植物生物量的差异密切相关。相关性分析表明,牡蛎出肉率与叶绿素a含量、浮游植物细胞密度对数值均呈显著正相关关系($P < 0.05$)。RDA分析也表明,浮游植物细胞密度是影响三倍体牡蛎生长指标的主要因子之一,浮游植物细胞密度、叶绿素a含量与牡蛎各生长指标呈正相关关系,且对牡蛎出肉率的影响作用最大。因此浮游植物生物量是影响三倍体牡蛎生长、育肥的关键海洋环境因子。

为解决湾内饵料不足、牡蛎肥满度低的问题,一些养殖户会将半成品牡蛎运到湾外育肥,经过1~1.5个月的育肥,牡蛎出肉率可以显著提高。本项目组2021年12月—2022年9月对福建漳浦半成品三倍体牡蛎养殖区开展调查,数据分析显示,牡蛎出肉率与叶绿素a含量回归方程: $y = 0.227x^2 - 0.5145x + 14.502$ ($R^2 = 0.793$),由回归方程得出,当叶绿素a含量 $> 6.2 \mu\text{g/L}$ 时,牡蛎出肉率在20%以上(未发表数据)。而春季叶绿素a含量高

更为有利,牡蛎尽早达到上市规格采收可规避夏季多发的台风,降低养殖风险。

3.3 三倍体牡蛎养殖区的选择

综上,水温、浮游植物生物量、营养盐是影响三倍体牡蛎生长、育肥的关键海洋环境因子。目前福建海域养殖的三倍体牡蛎主要为福建牡蛎,福建沿海水温在其适宜生长范围内,不会成为制约因素,因此从海洋生态环境角度考虑,海区浮游植物生物量(叶绿素 a 含量)和营养盐含量成为三倍体福建牡蛎养殖区选择的重要指标。

在沿海地区,陆源输入是营养盐的主要来源。一般而言,湾内海域由于陆源输入较多而营养盐较丰富,湾外海域营养盐含量受沿岸水系和外海水系影响较大。福建沿海主要受闽浙沿岸流、南海暖流和粤东沿岸流等水系影响,夏季在平潭岛和东山附近海域还出现上升流区^[33-34]。受各水系影响,福建沿岸不同海区、不同季节营养盐含量变化很大。在湾外海域养殖三倍体牡蛎,应尽量选择有丰富营养盐补给的区域,譬如河口区、上升流区附近海域,而合适的氮、磷、硅比例有利于浮游植物生长繁殖及群落结构稳定。

盐度也是影响牡蛎生长、存活的重要环境因素。三倍体福建牡蛎适盐范围较广,但是即使在适宜生长盐度范围内,急剧的盐度变化也会严重影响牡蛎的生长代谢,甚至导致牡蛎大面积死亡。因此应尽量选择盐度相对稳定的海区作为养殖区,如果在河口区附近海域养殖牡蛎,应注意与河口保持一定距离,避免因盐度过低或剧烈变化而导致牡蛎大面积死亡。

选择无污染源、水交换条件好、饵料丰富、有丰富营养盐补给、盐度较稳定、风浪较小的湾外海域养殖三倍体牡蛎,有助于牡蛎产量和品质的提升。海水中浮游植物生物量(叶绿素 a 含量)是影响牡蛎生长、育肥的重要指标,综合调查数据与生产实践经验,本研究认为,春季至初夏至少有 1 个月时间海区平均叶绿素 a 含量在 6 $\mu\text{g/L}$ 有利于牡蛎育肥,但也要注意防范赤潮带来的贝类毒素污染、赤潮消亡阶段水质恶化等风险。养殖业者要合理规划养殖空间,控制牡蛎养殖密度,避免因饵料不足而影响牡蛎生长和育肥。

福建省水产研究所罗冬莲、郑惠东、杨妙峰、颜聪毅、朱雨晨、林娇等参与了项目工作,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 张国范,李莉,阙华勇. 中国牡蛎产业的嬗变——新认知、新品种和新产品[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 740-749.
ZHANG G F, LI L, QUE H Y. An evolution of oyster mariculture industry in China: new knowledge, variety and product [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(4): 740-749.
- [2] 曾志南,林琪,吴建绍,等. 太平洋牡蛎二倍体和三倍体的生长比较[J]. 上海水产大学学报, 1999, 8(2): 119-123.
ZENG Z N, LIN Q, WU J S, et al. Comparison of growth between diploids and triploids oyster *Crassostrea gigas* [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 1999, 8(2): 119-123.
- [3] 武祥伟,张跃环,肖述,等. 熊本牡蛎中国群体与美国群体杂交效应及杂交三倍体优势分析[J]. 中国水产科学, 2019, 26(3): 465-472.
WU X W, ZHANG Y H, XIAO S, et al. Heterosis and triploid advantage between Chinese and American populations of kumamoto oysters (*Crassostrea sikamea*) [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(3): 465-472.
- [4] 林国清,林位琅,林楠,等. 福建三倍体牡蛎养殖业发展现状分析与对策建议[J]. 中国水产, 2023(4): 91-95.
LIN G Q, LIN W L, LIN N, et al. Development status analysis and countermeasures of triploid oyster culturing industry in Fujian Province [J]. China Fisheries, 2023(4): 91-95.
- [5] 崔玉婷,王昭萍,李阳春,等. 不同介质对低渗透诱导葡萄牙牡蛎三倍体的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(S1): 56-63.
CUI Y T, WANG Z P, LI Y C, et al. Effects of different media on triploid induction in *Crassostrea angulata* through hypotonic treatment [J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(S1): 56-63.
- [6] 贾圆圆. 牡蛎三倍体育种技术研究进展[J]. 渔业研究, 2021, 43(3): 330-338.
JIA Y Y. Research progress of breeding technology of oyster polyploid [J]. Journal of Fisheries Research, 2021, 43(3): 330-338.
- [7] ZENG Z, TAN Q L, HUANG Z X, et al. Differential Gene expression related to morphological variation in the adductor muscle tissues of diploid and triploid Fujian oysters, *Crassostrea angulata* [J]. Aquaculture Research, 2019, 50(12): 3567-3578.
- [8] ZHANG Y H, QIN Y P, YU Z N. Comparative study of tetraploid-based reciprocal triploid Portuguese oysters, *Crassostrea angulata*, from seed to market size [J]. Aquaculture, 2022, 547: 737523.

- [9] TAN K, DENG L H, ZHENG H P. Effects of stocking density on the aquaculture performance of diploid and triploid, Pacific oyster *Crassostrea gigas* and Portuguese oyster *C. angulata* in warm water aquaculture [J]. *Aquaculture Research*, 2021, 52(12): 6268-6279.
- [10] 展建强, 蔡廷柱, 郭希瑞, 等. 温度和盐度对三倍体葡萄牙牡蛎(*Crassostrea angulata*)稚贝生长和存活的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2023, 54(4): 1158-1164.
- ZHAN J Q, CAI T Z, GUO X R, et al. Effects of temperature and salinity on growth and survival of triploid *Crassostrea angulata* juveniles [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2023, 54(4): 1158-1164.
- [11] 侯朝伟, 孙西艳, 刘永亮, 等. 烟台近海浮游动物优势种空间生态位研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5822-5833.
- HOU C W, SUN X Y, LIU Y L, et al. Spatial niches of dominant zooplankton species in the Yantai offshore waters [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5822-5833.
- [12] 高若允, 杨柳生, 田雪, 等. 干热河谷阴、阳坡失稳性坡面植被与环境因子关系的冗余分析[J]. *山地学报*, 2022, 40(6): 835-846.
- GAO R Y, YANG L S, TIAN X, et al. Redundancy analysis of the relationship between plant and environmental factors on shady and sunny unstable slope in dry-hot valley [J]. *Mountain Research*, 2022, 40(6): 835-846.
- [13] 任玉连, 董醇波, 邵秋雨, 等. 冗余分析在微生物生态学中的应用[J]. *山地农业生物学报*, 2022, 41(1): 41-48.
- REN Y L, DONG C B, SHAO Q Y, et al. Application of redundancy analysis in microbial ecology [J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2022, 41(1): 41-48.
- [14] 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. GB 17378-2007 海洋监测规范[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. GB 17378-2007 The specification for marine monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [15] 中华人民共和国生态环境部. HJ 442-2020 近岸海域环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. HJ 442-2020 Technical specification for offshore environmental monitoring [S]. Beijing: China Environmental Press, 2020.
- [16] 中华人民共和国国家海洋局. HY/T 069-2005 赤潮监测技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- State Oceanic Administration. HY/T 069-2005 Technical specification for red tide monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [17] 孙军, 刘东艳, 徐俊, 等. 1999年春季渤海中部及其邻近海域的网采浮游植物群落[J]. *生态学报*, 2004, 24(9): 2003-2016.
- SUN J, LIU D Y, XU J, et al. The netz-phytoplankton community of the central Bohai Sea and its adjacent waters in spring 1999 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2003-2016.
- [18] 廖文崇, 朱长波, 张汉华, 等. 水温对香港巨牡蛎摄食和代谢的影响[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(1): 7-11.
- LIAO W C, ZHU C B, ZHANG H H, et al. Effect of water temperature on the feeding and metabolic physiology of *Crassostrea hongkongensis* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(1): 7-11.
- [19] 周一兵, 黄璞祎, 李晓艳, 等. 温度对不同规格长牡蛎三倍体和二倍体代谢影响的比较[J]. *大连水产学院学报*, 2006, 21(3): 226-230.
- ZHOU Y B, HUANG P Y, LI X Y, et al. Effects of water temperature on metabolism of triploid and diploid oyster *Crassostrea gigas* [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2006, 21(3): 226-230.
- [20] GAGNAIRE B, FROUIN H, MOREAU K, et al. Effects of temperature and salinity on haemocyte activities of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas* (Thunberg) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2006, 20(4): 536-547.
- [21] 胡益鸣, 李琪, 刘士凯, 等. 温度和盐度急性胁迫对岩牡蛎存活及免疫指标的影响[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(3): 286-294.
- HU Y M, LI Q, LIU S K, et al. Effects of acute temperature and salinity stress on the survival and immune indexes of iwagaki oysters, *Crassostrea nippona* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(3): 286-294.
- [22] 霍恩泽, 张雯雯, 李加琦, 等. 盐度骤降对近江牡蛎和长牡蛎能量收支的影响[J]. *渔业科学进展*, 2021, 42(2): 132-138.
- HUO E Z, ZHANG W W, LI J Q, et al. Effects of acute salinity changes on energy budgets of oysters *Crassostrea ariakensis* and *Crassostrea gigas* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(2): 132-138.
- [23] BUTT D, SHADDICK K, RAFTOS D. The effect of low salinity on phenoloxidase activity in the Sydney rock oyster, *Saccostrea glomerata* [J]. *Aquaculture*, 2006, 251(2/4): 159-166.
- [24] 刘海涛, 董占武, 徐志明. 盐度对大连湾牡蛎胚胎发育及幼虫生长的影响[J]. *水产学报*, 1992, 16(1): 32-39.
- LIU H T, DONG Z W, XU Z M. The effects of salinity on embryonic development and growth of veliger of oyster *Ostrea talienwhanensis* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 1992, 16(1): 32-39.
- [25] WANG T, LI Q. Effects of salinity and temperature on

- growth and survival of juvenile iwagaki oyster *Crassostrea nippona* [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17(4): 941-946.
- [26] RIISGÅRD H U. Efficiency of particle retention and filtration rate in 6 species of northeast American bivalves [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 45(3): 217-223.
- [27] BOUGRIER S, HAWKINS A J S, HÉRAL M. Preingestive selection of different microalgal mixtures in *Crassostrea gigas* and *Mytilus edulis*, analysed by flow cytometry [J]. *Aquaculture*, 1997, 150(1/2): 123-134.
- [28] ROSA M, WARD J E, HOLOHAN B A, et al. Physicochemical surface properties of microalgae and their combined effects on particle selection by suspension-feeding bivalve molluscs [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2017, 486: 59-68.
- [29] YUKIHIRA H, KLUMPP D W, LUCAS J S. Feeding adaptations of the pearl oysters *Pinctada margaritifera* and *P. maxima* to variations in natural particulates [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 182: 161-173.
- [30] JIANG T, WANG L H, ZHANG F C, et al. Selective feeding of bay scallop *Argopecten irradians* on phytoplankton community revealed by HPLC analysis of phytopigments in Bohai Sea, China [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(5): 1746-1755.
- [31] SHUMWAY S E, CUCCI T L, NEWELL R C, et al. Particle selection, ingestion, and absorption in filter-feeding bivalves [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1985, 91(1/2): 77-92.
- [32] 潘绘竹. 黄渤海海域几种典型双壳贝类对浮游植物的摄食规律研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2020.
- PAN H Z. Study on feeding selectivity of different phytoplankton assemblages by several typical bivalve species in the Yellow Sea and Bohai Sea [D]. Guangzhou: Jinan University, 2020.
- [33] 肖晖, 郭小钢, 吴日升. 台湾海峡水文特征研究概述 [J]. *台湾海峡*, 2002, 21(1): 126-138.
- XIAO H, GUO X G, WU R S. Summarization of studies on hydrographic characteristics in Taiwan Strait [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2002, 21(1): 126-138.
- [34] 万小芳, 潘爱军, 郭小钢, 等. 台湾海峡西侧水动力环境的季节变化特征 [J]. *应用海洋学学报*, 2013, 32(2): 156-163.
- WAN X F, PAN A J, GUO X G, et al. Seasonal variation features of the hydrodynamic environment in the western Taiwan Strait [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32(2): 156-163.

Growth and fattening of triploid *Crassostrea angulata* and their relations with marine environmental factors

XU Cuiya, YANG Fang, ZHENG Shenghua, QI Jianfei, CHEN Xiaohong, WEI Shanshan, LIN Yongqing, XI Yingyu

(Key Laboratory of Cultivation and High-value Utilization of Marine Organisms in Fujian Province, Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, Fujian, China)

Abstract: In order to explore the key marine environmental factors affecting the growth and fattening of triploid *Crassostrea angulata* and promote the development of triploid oyster culture to the deep waters in the outside bay, a 10-month survey was conducted on the triploid *C. angulata* culture area in Huangqi Bay from December 2021 to September 2022. The growth indexes of oysters and marine environmental factors of the culture areas both outside and inside the bay were obtained, and the data were analyzed by Redundancy analysis (RDA) and other methods. The results showed that there were significant differences in growth indexes of oysters such as shell length, shell width, total mass, soft tissue mass, and fillet yields between the inner and outside bay groups, with all those indexes being significantly higher in the outside bay than those in the inner bay, while the difference of shell heights inside and outside bay was not significant. The contents of nitrate nitrogen, chlorophyll-a and phytoplankton cell density in the seawater in the outside bay were significantly higher than those in the inner bay, and there was no significant difference between other indexes inside and outside the bay. The results of RDA analysis showed that the main factors affecting the growth indexes of oysters were water temperature, nitrate nitrogen, phytoplankton cell density and chemical oxygen demand. What's more, phytoplankton cell density and chlorophyll-a content had the greatest effect on oyster fillet yield. Comprehensive analysis showed that water temperature, phytoplankton biomass and nutrients were the key marine environmental factors affecting the growth and fattening of triploid oysters. The average chlorophyll-a content in the sea area was above 6 $\mu\text{g/L}$ for at least one month from spring to early summer, which was beneficial to the fattening of oysters. The selection of non-pollution source, good water exchange conditions, abundant food, rich nutrient supply, stable salinity and low wind waves in the outside bay to cultivate triploid oysters may be helpful to improve the yield and quality of oysters.

Key words: triploid *Crassostrea angulata*; growth; fattening; environmental factors; Redundancy analysis (RDA)