

DOI: 10.11964/jfc.20230514002

长牡蛎壳橙快速生长品系生长存活比较及遗传参数评估

杜利杰¹, 徐成勋¹, 李琪^{1,2*}

1. 中国海洋大学, 海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266003; 2. 青岛海洋科学与技术中心, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237

摘要:

【目的】 培育生长性能优良、抗逆性强的牡蛎新品种。

【方法】 本研究以经过连续3代群体选育的长牡蛎壳橙快速生长(简称“橙快”)品系为亲本, 采用巢式设计构建了11个半同胞家系和28个全同胞家系, 同时将未经选育的野生个体建立对照组家系, 评估橙快家系在不同日龄的生长和存活性状。

【结果】 在幼虫阶段, 橙快长牡蛎家系的生长和存活率均高于对照组, 壳高和存活率均值分别提高12.40%~23.70%和1.52%~13.98%; 在稚贝阶段, 橙快家系的壳高和存活率均值相比对照组分别提高5.62%~10.74%和2.34%~2.80%, 在稚贝存活率上的改良还有待提高。生长和存活性状在不同家系间表现出了显著差异, 其中G14和G23家系在生长和存活率上均有较大优势。同时, 分别对橙快长牡蛎幼虫期与稚贝期壳高和壳长的遗传参数进行了评估, 壳高和壳长的遗传力分别为 $0.41\pm 0.07\sim 0.76\pm 0.12$ 、 $0.50\pm 0.10\sim 0.82\pm 0.09$, 均属于中高遗传力; 且不同日龄壳高和壳长的遗传相关和表型相关均为正相关, 相关系数分别为0.95~0.99、0.28~0.75。

【结论】 橙快长牡蛎的生长性状具有良好选育潜力且可以进行间接选育。本研究结果为培育生长性能优良和存活率高的橙快长牡蛎新品系提供了基础资料。

关键词: 长牡蛎; 壳橙; 家系选育; 生长存活; 遗传参数

第一作者: 杜利杰, 从事贝类遗传育种研究, E-mail: 2410079553@qq.com



通信作者: 李琪, 博士, 教授、博士生导师。从事海洋贝类遗传育种学研究, E-mail: qili66@ouc.edu.cn

资助项目: 国家贝类产业技术体系专项(CARS-49); 山东省农业良种工程项目(2021LZGC027, 2022LZGCQY010)

收稿日期: 2023-05-07

修回日期: 2024-12-11

文章编号:

1000-0615(2025)01-019610-11

中图分类号: S 968.3

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)

长牡蛎 (*Crassostrea gigas*) 又称太平洋牡蛎, 自然分布于西北太平洋海域, 是一种广温、广盐性的双壳贝类。由于其环境适应力强、营养价值丰富、生长速率快等优点, 已成为具有重要经济价值的水产养殖品种, 养殖规模日趋扩大, 主养区分布在辽宁、山东、江苏等北方沿海。牡蛎产业在我国海水养殖中占据重要地位, 2021年我国牡蛎产量582万t, 占海水贝类养殖产量的38%^[1]。伴随着牡蛎产量的提高, 养殖海区的水环境逐渐恶化, 养殖牡蛎也出现了生长缓慢、死亡率升高等问题, 严重制约我国牡蛎产业的发展^[2]。因此, 培育生长性能好、抗逆性强、产量高的优良新品种, 对种业的持续健康发展具有重要意义^[3]。



在水产动物的遗传改良中, 选择育种仍然是目前广泛采用的有效方法, 而家系选育是选择育种的重要方式之一。家系选育根据家系表型均值的高低决定留种或淘汰, 不仅适用于高遗传力的表型性状选择, 对较低遗传力的性状也十分有效^[2,4]。当目标性状存在加性效应时, 通过家系选育可以加快品种改良的进程; 当目标性状存在非加性效应时, 通过复合选育能获得较大的遗传进展^[5]。目前国内外对牡蛎家系选育研究已开展了大量工作, 包括生长存活^[6-7]、壳色^[8-9]、肉质成分^[10]、抗病^[11]等多方面指标, 均表明家系选育能够有效改良牡蛎性状。

在遗传改良实践中, 遗传参数的准确评估对遗传进展评定、选择反应预测、育种方案设计以及保种策略制定都有重要的指导意义^[12]。国内外对牡蛎性状的遗传力、性状间表型相关和遗传相关的估计已有相关报道。国外 Dégremont 等^[6-7]、Langdon 等^[13] 和 Evans 等^[14] 分别通过估计牡蛎夏季死亡率、总重和生长存活的遗传力和相关性, 进行了相应的选育策略调整。国内王雪磊等^[15]、王庆志等^[16] 分别通过估计牡蛎成体生长性状、生长与壳色的遗传力和相关性, 为牡蛎新品种的选育提供了依据。

牡蛎的壳色在自然界呈现多态性, 是影响其价值的重要经济性性状^[17]。消费者对于稀有的壳色具有更高的选择意愿^[18], 因此, 对长牡蛎进行壳色选育能够为打造高端牡蛎品种奠定基础。在长牡蛎的选育实践中, 已获得长牡蛎壳橙近交品系^[19], 并通过与快速生长品系杂交, 培育出壳橙快速生长(简称“橙快”)品系^[20-24]。

本研究以长牡蛎橙快品系 F₃ 为亲本, 采用巢式设计建立 28 个全同胞家系, 通过比较各家系生长存活的差异, 筛选性状优良家系, 同时评估生长性状遗传参数, 以期为壳橙快速生长品系的继代选育提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 亲本来源

2022 年 5 月将长牡蛎橙快品系 F₃ 亲贝从山东乳山海区转移至莱州育苗场进行室内人工促熟, 同时采集未经选育的野生长牡蛎作为对照。亲贝促熟期间, 海水温度为 20~23 °C, 盐度为 30, 每日投喂足量等鞭金藻 (*Isochrysis galbana*)。

1.2 家系构建

挑选壳色纯正、性腺饱满、个体较大的亲贝(图 1), 用解剖法鉴别雌雄后镜检精卵质量, 最终筛选出 33 个雌性个体和 11 个雄性个体, 将 1 个雄性个体精子与 3 个雌性个体卵子分别在 15 L 小桶内充分混合, 共建立 33 个全同胞家系。同时以未经选育的野生个体作为亲本, 建立了 3 个家系作为对照组。

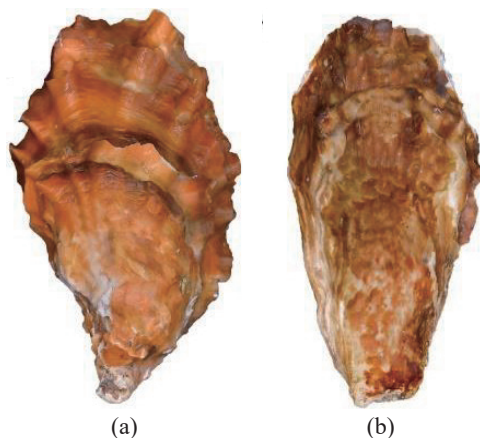


图 1 橙快长牡蛎亲本左壳 (a) 与右壳 (b) 颜色比较

Fig. 1 Comparison of color between left (a) and right shell (b) of shell orange *C. gigas* parents

1.3 幼虫孵化与培育

人工授精完成后, 将各家系转移至 100 L 聚乙烯塑料桶中孵化。孵化 22 h 后, 受精卵发育至 D 形幼虫, 用 300 目筛绢网选优。选优后的幼虫密度约 15 个/mL, 海水温度控制在 23~26 °C, 持续充气。每天换 1 次水, 每次换水量为 1/3, 饵料以等鞭金藻为主, 后期辅助投喂普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*)。各家系充气、投饵、换水等管理操作均保持一致。

1.4 附苗及稚贝养成

当约 30% 的幼虫出现眼点时, 及时投放栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 附着基进行附苗。当附苗密度达到 15 个/片时, 停止采苗, 将每个家系的附着基悬挂于室外沉淀池中暂养保苗。待自然海区无野生牡蛎幼虫时, 把附着稚贝装入扇贝笼内, 转移至荣成桑沟湾海区进行浮筏养殖。其中 33 个橙快长牡蛎家系有 28 个发育至稚贝期, 家系成活率为 85%。

1.5 取样与观测

幼虫期于选优后的 1、6、11、16 和 21 日

龄对各家系随机取样 100 mL, 测定幼虫密度; 各家系随机收集 30 个幼虫, 用卢戈氏液固定, 在显微镜下测量壳高和壳长。稚贝期分别取 90、180 和 270 日龄稚贝样品观测存活率, 各家系随机挑选 30 个个体, 用游标卡尺测量壳高与壳长。幼虫期存活率为取样时密度与第 1 天密度的比值, 稚贝期存活率为取样时单片上存活数与附着总数的比值, 均重复 3 次取平均值。

本研究获得了中国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中国海洋大学伦理规范, 并按照中国海洋大学伦理委员会制定的规章制度执行。

1.6 数据分析

采用 Excel 软件对各家系的生长存活数据进行初步处理, 经过格式修改后导入 SPSS 25.0 软件进行统计分析。使用单因素方差分析 (ANOVA) 和 Tukey 氏多重比较进行显著性分析, 显著性水平设为 0.05, 各家系之间的差异用不同字母表示。

通过 R 软件运行 ASReml 3.0 程序包, 采用约束极大似然法 (REML) 进行遗传参数的评估, 在 pin 函数下计算^[25]。根据软件要求对数据进行整理排列, 建立多性状个体动物模型^[26]:

$$y_{ijk} = \mu + a_{ijk} + f_{ijk} + e_{ijk}$$

式中, i 、 j 、 k 分别为父本编号、母本编号和个体编号。 y_{ijk} 为性状观测值; μ 为性状总体平均值; a_{ijk} 为性状的加性遗传效应; f_{ijk} 为家系效应 (包括共同环境效应); e_{ijk} 为性状的随机残差。经过似然比检验, 家系效应对于所测生长性状不显著, 故将家系效应从随机效应中剔除, 简化模型^[21]:

$$y_{ijk} = \mu + a_{ijk} + e_{ijk}$$

2 结果

2.1 各家系存活率比较

幼虫期, 橙快长牡蛎家系的平均存活率均高于对照组 1.75%~13.49%。在 6 日龄和 11 日龄, 二者没有显著差异, 6 日龄为 84.81% 和 83.25%, 11 日龄为 66.67% 和 65.67%。16 日龄与 21 日龄, 橙快各家系的平均存活率显著高于野生对照组家系, 16 日龄分别为 48.98% 和 35.00%, 21 日龄为 37.57% 和 23.67% ($P < 0.05$)。

且随着幼虫培育时间的增加, 各家系的平均存活率均呈现降低趋势, 部分家系幼虫的存活率在 11 日龄和 16 日龄出现了明显的下降, 其中选优后密度偏高的家系尤为明显。其中, G1、G4、G6、G8、G22、G23 和 G25 家系始终保持着较高的存活率, 在 21 日龄时, 这些家系存活率分别为 47.33%、51.56%、52.34%、48.67%、51.47%、49.36% 和 47.53%, 显著高于野生对照组 (G 野) 23.67% 的存活率 ($P < 0.05$) (图 2)。

稚贝阶段, 橙快长牡蛎家系平均存活率均高于对照组, 高出 2.34%~2.80%; 各家系存活率变化相对稳定且存活率最终都在 75% 以上, 其中 G7、G8、G9、G22 和 G25 家系表现出较高的存活优势, 270 日龄的存活率比所有家系平均值和对照组分别提高 7.01%、7.01%、5.34%、5.34%、7.43% 和 10.86%、10.86%、9.13%、9.13% 和 11.30% ($P < 0.05$) (图 3)。

2.2 各家系生长性状比较

幼虫期和稚贝期所测各家系生长数据的单因素方差分析表明, 不同日龄橙快长牡蛎在父系间和母系间壳高与壳长的 F 检验均达到了极显著水平 ($P < 0.01$), 父系组间和母系组间壳高与壳长的生长均存在显著差异; 父系各组间壳高和壳长的生长相比母系间存在更大的差异, 且随着幼虫的生长, 差异性增大 (表 1)。

幼虫期, 橙快长牡蛎各家系生长性状的平均值均高于对照组, 其中壳高性状提高 12.39%~23.70%, 壳长性状提高 9.96%~23.31%。通过 Tukey 氏多重比较发现, 橙快各家系间的生长在 1、6、11、16 和 21 日龄时也都存在显著差异 ($P < 0.05$)。其中 G1、G3 和 G21 在整个幼虫培育阶段都生长缓慢, 但部分家系在不同日龄始终保持着较快的生长速率, 如 G2、G12、G13、G14、G15、G16、G17 和 G23 都表现出了显著的生长优势。在 21 日龄, 这些家系的壳高均值比野生对照组家系分别高 24.07%、22.50%、27.22%、25.05%、22.93%、23.43%、24.38% 和 22.31%, 比橙快各家系平均值分别高 9.46%、8.08%、12.24%、10.33%、8.46%、8.90%、9.74% 和 7.91% (表 2)。

稚贝期, 橙快长牡蛎各家系壳高、壳长的平均值分别比对照组高出 5.62%~10.74% 和 2.30%~6.12%。Tukey 氏多重比较发现, 各家系在同一

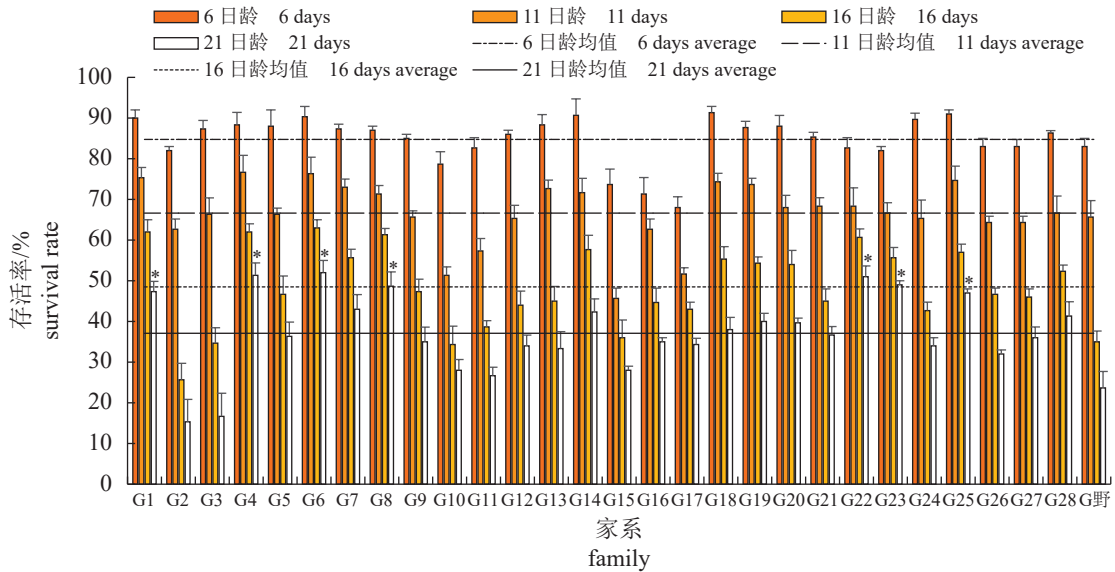


图 2 橙快长牡蛎幼虫时期不同家系存活率的比较

“*” 较野生家系差异显著 (P<0.05), 下同。

Fig. 2 Comparison of survival rate among different families at larval stage of shell orange *C. gigas*

“*” significant differences compared to wild families (P<0.05), the same below.

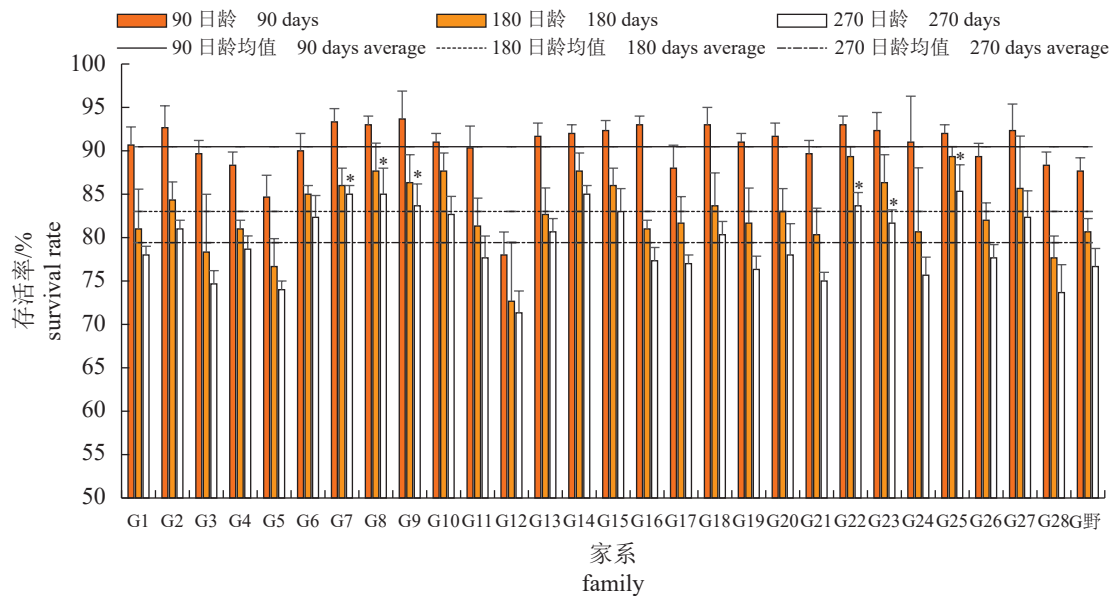


图 3 橙快长牡蛎稚贝时期不同家系存活率的比较

Fig. 3 Comparison of survival rate among different families at juvenile stage of shell orange *C. gigas*

时期的生长差异比较明显, 且在不同时期的数值排序也存在不一致性, 但 G2、G15、G23 和 G27 家系在生长上均保持较高的增长量, 在 270 日龄这 4 个家系的壳高比所有家系平均值分别高出 9.49%、7.80%、6.85%、15.38% (表 3)。

2.3 生长性状的遗传参数

应用多性状个体模型计算橙快各家系不同

时期壳高、壳长的遗传力, 结果显示, 幼虫期壳高的遗传力为 $0.41 \pm 0.07 \sim 0.76 \pm 0.12$, 壳长的遗传力为 $0.50 \pm 0.10 \sim 0.82 \pm 0.09$ (表 4); 稚贝期壳高的遗传力是 $0.48 \pm 0.12 \sim 0.67 \pm 0.14$, 壳长的遗传力是 $0.53 \pm 0.12 \sim 0.65 \pm 0.14$ (表 5)。橙快长牡蛎幼虫期与稚贝期壳高、壳长的遗传力均属于中高遗传力。

应用 R 软件中的 pin 函数对各家系生长性

表 1 橙快长牡蛎家系不同生长时期表型变量的方差组分分析

日龄/d age	性状 trait	方差来源 source of variance								
		父系间 sires			母系间 sams			子代间 progenies		总和 total
		df	MS	F-value	df	MS	F-value	df	MS	
1	SH	10	1609.94	114.51**	27	762.31	86.31**	812	8.83	839
	SL	10	1476.90	110.90**	27	647.51	63.14**	812	10.26	839
6	SH	10	15924.24	92.16**	27	6280.10	38.37**	812	163.69	839
	SL	10	3385.01	45.12**	27	1427.31	20.16**	812	70.82	839
11	SH	10	24374.42	75.54**	27	10164.98	33.82**	812	300.59	839
	SL	10	19008.03	108.00**	27	7721.10	49.17**	812	157.04	839
16	SH	10	31115.70	49.15**	27	14484.64	26.44**	812	547.89	839
	SL	10	43542.69	108.51**	27	20031.61	71.58**	812	279.85	839
21	SH	10	32711.45	45.17**	27	15517.22	24.78**	812	626.26	839
	SL	10	16499.03	40.73**	27	8321.45	24.47**	812	340.08	839
90	SH	10	74.90	8.52**	27	82.33	11.51**	812	7.16	839
	SL	10	47.33	8.03**	27	45.31	8.99**	812	5.09	839
180	SH	10	301.13	10.71**	27	274.30	11.78**	812	23.30	839
	SL	10	188.96	13.78**	27	184.88	18.16**	812	10.18	839
270	SH	10	621.46	7.58**	27	564.09	7.77**	812	72.62	839
	SL	10	348.44	7.84**	27	323.98	8.33**	812	38.88	839

注: SH. 壳高, SL. 壳长; df. 自由度, MS. 均方, F-value. F检验; **. 差异极显著($P<0.01$); 下同。

Notes: SH. shell height, SL. shell length; df. degree of freedom, MS. mean square, F-value. F-test; **. extremely significant difference ($P<0.01$); the same below.

状进行相关性计算, 结果显示, 幼虫期壳高和壳长的遗传相关和表型相关变化范围分别为 0.95~0.99、0.28~0.37 (表 4), 稚贝期为 0.98~0.99、0.28~0.75 (表 5), 均为正相关, 且遗传相关始终是高度正相关。

3 讨论

3.1 橙快长牡蛎的生长与存活性状

选择育种通常能改良选育物种的经济性状。其中, 产量性状如体重、体长等是衡量水产生物经济价值最直接的指标, 抗逆性状如温盐适应性、抗病毒和细菌等能力直接影响到生物在不利或极端环境下的成活率和产量^[4]。在选择育种中, 家系选育与群体选育相比, 能更迅速地利用不同家系间的遗传变异, 更准确地估测家系内部的表型差别, 更合理地制定出目标性状后续的选育策略^[12]。在以往的育种研究中已证明通过家系选育能够提高水产生物的遗传改良效率^[27]。Langdon 等^[13]发现经过一代体重选择的牡蛎家系后代比对照组产量高 9.5%; Dégremont 等^[6-7]建立全同胞家系并进行逐代存活率选择, 最后成功选育出耐高温、存活率高

的长牡蛎。王雪磊等^[28]对金壳色的长牡蛎进行家系选育, 发现幼虫期和稚贝期选择组家系比对照组生长和存活率分别提高了 2.27%~16.67%、10.04%~19.79% 和 1.72%~9.40%、0.20%~4.26%。赵宗武等^[29]对白壳色的长牡蛎进行家系选育, 发现幼虫期 29 个选择组家系比对照组壳高和存活率分别提高了 3.65%~14.58% 和 1.11%~19.26%。本研究结果表明, 幼虫期橙快长牡蛎的壳高与存活率性状得到了较好的改良, 但在稚贝期的存活率改良上有待提高。其中, G14 和 G23 家系在整个幼虫期和稚贝期都表现出了显著的生长和存活优势, 生长水平介于杂交的初代壳白^[29]和壳黑^[20]两个快速生长品系亲本之间, 可以作为橙色良种培育的材料。

3.2 橙快长牡蛎生长与存活性状的关系

本研究发现 D 形幼虫后的选优操作对于幼虫的附着变态有重要影响。Taris 等^[30]通过主动淘汰早期较小个体, 发现长牡蛎选择组生长性状比对照组提高了近 10%, 发育至附着变态的时间减少 12%, 死亡率降低了 14.2%。Boudry 等^[31]研究发现, 在幼虫期淘汰较小个体, 对牡蛎随后的生长存活有促进作用, 上述研究均表

表 2 幼虫期各家系生长性状的比较

Tab. 2 Comparison of growth traits among families at larval stage

μm

家系 family	生长日龄/d age									
	1		6		11		16		21	
	SH	SL	SH	SL	SH	SL	SH	SL	SH	SL
G1	65.06±2.46 ^j	75.31±3.14 ^{gh}	98.65±7.88 ^k	104.62±6.55 ^{kl}	150.63±16.80 ^l	132.89±9.63 ^j	197.65±17.96 ^{gh}	167.31±14.56 ^e	255.37±15.89 ^c	227.89±17.91 ^{lm}
G2	75.26±2.90 ^{-f}	81.24±3.35 ^f	114.33±10.20 ^{gh}	107.63±6.81 ^{g-i}	178.56±19.68 ^{de}	152.37±12.34 ^{de}	249.60±28.97 ^{abc}	223.68±16.66 ^{abc}	315.86±32.45 ^a	278.12±18.85 ^a
G3	64.89±2.55 ^j	73.91±2.91 ⁱ	100.68±12.64 ^{jk}	103.96±8.55 ^{kl}	150.96±17.25 ^{jk}	133.99±10.31 ^{hij}	198.78±15.95 ^{gh}	166.25±17.55 ^e	257.32±17.54 ^c	220.07±16.87 ^m
G4	66.34±2.50 ^j	75.01±2.76 ^{hi}	105.45±11.52 ^{h-k}	104.53±7.61 ^{kl}	152.86±15.86 ^{jk}	134.97±9.97 ^{g-i}	207.66±20.04 ^{e-h}	170.05±14.89 ^{fg}	264.58±25.12 ^{de}	231.08±15.66 ^{klm}
G5	68.37±3.46 ^{hi}	77.86±3.65 ^g	111.24±6.22 ^{g-j}	107.20±7.01 ^{h-i}	163.33±11.23 ^{g-i}	134.58±9.32 ^{g-i}	212.94±16.63 ^{e-h}	173.66±13.35 ^{fg}	266.61±19.23 ^{de}	234.30±15.02 ^{lm}
G6	71.02±2.82 ^g	80.98±3.31 ^f	114.38±11.96 ^{gh}	106.30±9.53 ^{i-l}	167.85±18.66 ^{fi}	140.08±13.58 ^{fg}	217.81±26.68 ^{de}	170.47±17.77 ^{fg}	270.01±31.08 ^{cde}	237.89±20.56 ^{h-l}
G7	73.21±2.98 ^f	81.26±3.10 ^f	113.09±13.07 ^{gh}	105.67±9.25 ^{i-l}	168.82±20.52 ^{gh}	142.39±14.75 ^{g-i}	219.07±23.85 ^{def}	173.60±16.30 ^{fg}	272.58±21.23 ^{cde}	240.25±18.82 ^{h-l}
G8	74.06±2.87 ^{ef}	82.06±3.68 ^{ef}	128.66±20.31 ^{cde}	112.37±10.28 ^{d-i}	176.36±24.81 ^{efg}	147.22±15.52 ^{ef}	243.24±31.56 ^{abc}	217.62±19.69 ^d	302.46±28.74 ^{ab}	250.24±17.52 ^{g-i}
G9	75.84±2.95 ^{bc}	84.13±3.35 ^{bc}	126.35±18.56 ^{cde}	109.36±8.71 ^{fk}	174.38±21.35 ^{ef}	143.28±11.81 ^{e-i}	247.10±28.21 ^{abc}	218.83±16.68 ^d	306.88±33.67 ^{ab}	257.86±19.43 ^g
G10	75.07±3.10 ^{-f}	83.56±3.47 ^{bc-f}	126.88±15.98 ^{cde}	111.32±9.85 ^{g-j}	172.89±21.26 ^{fg}	151.23±13.69 ^{de}	236.52±26.69 ^{bcd}	207.66±12.08 ^{de}	291.72±28.74 ^{bc}	245.09±16.38 ^{gk}
G11	74.68±2.83 ^{def}	83.41±3.03 ^{-c-f}	130.35±14.56 ^{bcd}	116.39±7.28 ^{-a-f}	181.05±16.63 ^{def}	162.57±9.12 ^e	244.53±19.24 ^{abc}	210.66±12.55 ^{cde}	305.75±24.21 ^{ab}	261.24±18.86 ^{-h-f}
G12	76.50±3.40 ^{bc}	84.92±3.16 ^{bc-d}	133.27±17.27 ^{bc-d}	120.32±10.23 ^{abc}	188.34±22.57 ^{cd}	166.68±15.09 ^{bc}	250.21±35.85 ^{abc}	222.42±17.05 ^{abc}	311.87±30.24 ^{ab}	265.29±19.63 ^{bc}
G13	77.12±3.51 ^{-d}	85.20±3.51 ^{-d}	142.37±15.96 ^a	123.68±10.28 ^a	209.36±22.42 ^a	186.92±16.36 ^a	260.15±25.38 ^a	230.57±20.09 ^a	323.87±29.85 ^a	275.58±23.19 ^{ab}
G14	78.21±3.30 ^{ab}	86.94±2.90 ^a	140.85±14.21 ^{ab}	119.63±11.05 ^{bc-d}	204.67±19.88 ^{ab}	175.23±16.50 ^b	257.61±23.56 ^{ab}	225.34±17.24 ^{abc}	318.35±27.19 ^a	266.39±20.06 ^{-d}
G15	77.54±3.18 ^{abc}	86.12±3.22 ^{abc}	136.64±19.33 ^{abc}	121.42±8.54 ^{ab}	192.78±18.73 ^{bcd}	170.24±11.25 ^{bc}	251.78±24.88 ^{abc}	224.45±16.32 ^{abc}	312.95±30.42 ^{ab}	263.58±15.87 ^{-c}
G16	78.35±3.14 ^{ab}	86.88±3.54 ^a	136.07±12.85 ^{abc}	117.66±7.52 ^{bc}	198.63±18.02 ^{abc}	168.37±11.08 ^{bc}	255.85±24.19 ^{ab}	230.01±17.93 ^a	314.23±23.38 ^a	274.32±18.54 ^{ab}
G17	77.63±2.99 ^{abc}	86.31±2.94 ^{ab}	136.56±20.67 ^{abc}	119.68±7.39 ^{bc-d}	201.48±26.39 ^{abc}	175.56±13.05 ^b	254.66±33.25 ^{ab}	226.89±20.48 ^{ab}	316.65±30.55 ^a	268.87±19.24 ^{abc}
G18	66.58±2.45 ^{ij}	74.53±2.59 ⁱ	101.17±6.72 ^{jk}	103.33±7.50 ^{kl}	150.36±11.23 ^{jk}	127.88±12.69 ^{hij}	204.30±16.96 ^{-h}	167.86±17.85 ^{fg}	265.33±18.81 ^{de}	229.89±16.42 ^{klm}
G19	69.66±2.74 ^{gh}	77.87±2.92 ^g	98.56±5.63 ^k	101.35±6.88 ⁱ	154.97±8.64 ^h	132.66±12.66 ^{ij}	209.64±19.82 ^{-h}	172.24±21.30 ^{fg}	270.98±21.23 ^{cde}	237.82±18.67 ^{-h-l}
G20	75.64±3.17 ^{-f}	83.58±3.13 ^{bc-f}	118.69±14.08 ^{efg}	114.60±10.01 ^{bc-g}	173.05±18.53 ^{fg}	144.58±9.67 ^{-h}	232.98±28.41 ^{cd}	202.58±19.92 ^c	291.56±31.22 ^{bc}	251.47±18.75 ^{-d-h}
G21	65.01±2.31 ^{ij}	74.89±2.47 ^{hi}	102.82±7.22 ^{ijk}	104.55±8.63 ^{kl}	151.87±9.67 ^{jk}	133.33±10.35 ^{hij}	196.63±17.24 ^b	171.12±16.02 ^{fg}	261.49±18.61 ^{de}	231.77±17.94 ^{lm}
G22	78.63±2.98 ^a	86.77±3.42 ^a	124.65±17.39 ^{def}	115.67±11.02 ^{bc-f}	180.29±18.45 ^{df}	160.25±14.91 ^{cd}	243.37±24.15 ^{abc}	212.27±20.06 ^{bc}	308.82±28.56 ^{ab}	264.78±25.01 ^{-c}
G23	78.59±3.13 ^a	86.22±3.51 ^{ab}	129.88±16.94 ^{bcd}	121.12±12.65 ^{ab}	188.51±20.08 ^{cd}	159.72±16.39 ^{cd}	250.86±32.85 ^{abc}	222.38±24.28 ^{abc}	311.37±27.28 ^{ab}	267.64±26.63 ^{abc}
G24	66.42±2.13 ^{ij}	76.24±2.59 ^{ghi}	104.75±5.28 ^{h-k}	102.96±6.39 ^{kl}	157.21±7.88 ^{-h-k}	136.25±9.23 ^{fg}	205.66±14.52 ^{-h}	168.93±13.05 ^{fg}	271.69±17.78 ^{cde}	240.11±16.64 ^{-h-l}
G25	67.96±2.90 ^{hi}	77.54±2.72 ^{gh}	103.64±7.21 ^{h-k}	104.82±6.12 ^{kl}	153.42±11.30 ^{ijk}	136.75±9.66 ^{fg}	210.23±13.06 ^{-h}	174.69±11.28 ^{fg}	274.33±17.18 ^{cde}	243.58±15.89 ^{g-i}
G26	74.28±3.34 ^{ef}	82.65±3.77 ^{def}	127.67±12.11 ^{cde}	113.59±8.63 ^{-c-h}	169.61±16.30 ^{gh}	145.58±12.23 ^{efg}	222.56±21.03 ^{de}	182.61±11.28 ^f	280.77±26.98 ^{cd}	247.80±16.72 ^{fi}
G27	66.64±2.56 ^{ij}	73.89±2.88 ⁱ	103.55±5.48 ^{h-k}	105.74±6.62 ^{-i-l}	152.49±10.26 ^{jk}	136.72±13.59 ^{fg}	206.60±18.65 ^{-h}	165.96±15.59 ^g	270.54±17.96 ^{cde}	236.04±15.25 ^{bc-m}
G28	65.84±2.63 ^j	73.77±3.00 ⁱ	104.28±6.35 ^{h-k}	106.08±8.02 ^{-i-l}	156.28±8.97 ^{h-k}	138.64±11.34 ^{fg}	203.36±15.31 ^{-h}	164.57±16.84 ^g	265.36±21.49 ^{de}	235.12±19.67 ^{-bc-m}
mean	72.29±2.91	80.88±3.14	118.41±12.41	110.91±8.53	172.18±16.91	149.18±12.54	228.26±23.03	195.17±16.74	288.55±24.88	249.43±18.57
G野	64.32±2.72	73.22±3.24	95.72±7.64	100.86±6.95	149.88±11.26	128.23±9.63	194.89±15.68	158.27±14.82	254.58±20.18	225.69±17.69

注：“-”标示字母肩标时，首尾字母之间省略的连续字母串，mean. 均值；同列中不同上标字母表示差异显著(P<0.05)，表中数值为测量值±标准差，注释内容同表3。

Notes: "-" continuous strings of letters which omitted between the first and the last letter, mean. mean value; values with different superscripts letters in the same column mean significant differences at P<0.05, values are estimates ± standard deviation, the same as Tab. 3.

明，通过选优适当降低初始幼虫密度能够促进幼虫生长变态，这与本研究结果一致。此外，在幼虫期生长条件基本一致的情况下，各家系不同时期的生长存活性状仍表现出一定的差异，这可以归因于遗传因素，与亲本的遗传背景有

关^[28]。阎喜武等^[32-33]在中国蛤蜊 (*Macra chinensis*) 和菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*) 家系早期生长发育的研究中，也得出生长和存活率差异与亲本效应有关的结论，且更需关注变态率与存活率的关系。同时，本研究还发现幼虫

表 3 稚贝期各家系生长性状的比较
Tab. 3 Comparison of growth traits among families at juvenile stage mm

家系 family	生长日龄/d age					
	90		180		270	
	SH	SL	SH	SL	SH	SL
G1	14.15±2.71 ^{hi}	10.16±1.82 ^{ji}	29.22±4.05 ^{ijk}	18.16±2.03 ^{mm}	43.14±6.82 ^{hij}	28.64±4.42 ^{gh}
G2	19.21±3.65 ^a	14.03±2.81 ^a	36.57±7.64 ^{abc}	24.58±5.42 ^{cd}	54.32±10.24 ^{abc}	36.58±7.35 ^{acd}
G3	16.57±3.01 ^{c-h}	12.29±2.73 ^{a-h}	32.56±5.95 ^{c-i}	20.69±3.86 ^{g-m}	50.28±7.69 ^{a-h}	32.74±5.75 ^{a-d}
G4	15.12±2.67 ^{c-i}	11.26±2.61 ^{d-j}	30.09±4.78 ^{l-k}	18.85±2.56 ^{c-n}	48.12±7.16 ^{c-j}	31.96±5.24 ^{c-h}
G5	19.16±3.12 ^{ab}	13.23±2.72 ^{cd}	36.66±7.88 ^{abc}	25.01±5.86 ^{abc}	55.65±11.17 ^{abc}	37.44±7.76 ^{abc}
G6	15.58±2.41 ^{d-i}	11.74±1.84 ^{b-i}	31.28±5.16 ^{d-k}	21.66±3.66 ^{e-k}	48.99±7.46 ^{b-i}	31.25±5.53 ^{d-h}
G7	14.68±1.74 ^{ghi}	11.41±1.93 ^{d-j}	29.68±4.22 ^{h-k}	18.26±2.21 ^{mm}	44.55±6.88 ^{f-j}	29.02±5.03 ^{fg}
G8	15.91±2.36 ^{c-i}	11.57±2.37 ^{c-j}	31.08±5.03 ^{d-k}	20.58±3.04 ^{h-m}	49.03±7.79 ^{b-i}	32.03±5.68 ^{c-h}
G9	14.69±1.87 ^{ghi}	10.19±1.36 ^{hij}	29.56±4.33 ^{h-k}	19.60±2.75 ⁿ	43.69±6.53 ^{g-j}	28.89±4.78 ^{gh}
G10	16.81±3.55 ^{b-g}	11.87±2.01 ^{b-i}	33.66±6.21 ^{b-i}	21.15±4.24 ^{l-i}	51.24±8.55 ^{a-g}	33.66±6.26 ^{b-g}
G11	14.87±1.87 ^{f-i}	11.06±1.54 ^{c-j}	29.88±4.06 ^{g-k}	18.55±2.27 ^{lmm}	45.33±7.36 ^{d-j}	29.84±4.31 ^{c-h}
G12	17.61±2.41 ^{a-d}	12.24±2.06 ^{a-i}	34.35±6.25 ^{b-f}	23.24±5.09 ^{b-h}	51.78±9.24 ^{a-f}	33.67±6.52 ^{b-g}
G13	14.43±2.37 ^{ghi}	10.24±2.08 ^{g-j}	28.58±3.85 ^{ijk}	17.66±2.04 ⁿ	42.25±6.24 ^{ij}	28.06±4.22 ^{gh}
G14	15.69±2.47 ^{d-i}	10.91±1.58 ^{c-j}	31.14±5.86 ^{d-k}	21.87±4.68 ^{c-j}	48.75±7.29 ^{b-j}	32.44±5.47 ^{c-h}
G15	18.95±3.61 ^{ab}	13.55±3.06 ^{abc}	35.91±7.46 ^{abc}	23.47±5.52 ^{a-g}	53.48±10.85 ^{abc}	36.57±7.25 ^{ad}
G16	17.31±2.52 ^{a-f}	12.04±2.01 ^{a-i}	34.27±6.32 ^{b-g}	22.86±4.46 ^{e-i}	52.86±9.71 ^{a-c}	35.28±7.36 ^{a-c}
G17	16.07±2.19 ^{c-i}	11.11±1.91 ^{c-j}	31.52±4.26 ^{d-j}	21.58±3.61 ^{e-k}	49.69±8.22 ^{a-i}	32.69±6.07 ^{c-h}
G18	17.22±3.15 ^{a-f}	12.32±3.25 ^{a-g}	33.89±5.03 ^{b-h}	22.12±3.37 ^{d-j}	51.98±8.33 ^{a-f}	33.15±6.88 ^{c-h}
G19	15.34±2.09 ^{d-i}	11.21±1.81 ^{d-j}	30.59±4.55 ^{e-k}	20.14±3.05 ⁿ	49.06±7.39 ^{b-i}	32.58±5.64 ^{c-h}
G20	13.66±1.54 ⁱ	9.51±1.35 ^j	26.87±3.86 ^k	17.89±2.42 ^{mm}	41.21±6.02 ^j	27.59±4.11 ^h
G21	14.73±1.57 ^{ghi}	10.74±2.41 ^{f-j}	29.75±3.91 ^{h-k}	18.79±2.44 ^{b-n}	44.98±6.52 ^{c-j}	28.87±4.35 ^{gh}
G22	17.44±2.41 ^{a-c}	12.91±1.91 ^{a-c}	34.62±6.74 ^{a-c}	23.63±4.77 ^{a-f}	53.01±9.66 ^{a-d}	34.73±6.29 ^{a-f}
G23	18.18±2.73 ^{abc}	12.57±2.31 ^{a-f}	37.89±8.08 ^{ab}	25.84±6.56 ^{ab}	56.61±12.28 ^{ab}	38.96±8.78 ^{ab}
G24	16.28±3.43 ^{c-h}	11.67±2.75 ^{b-i}	32.59±5.12 ^{c-j}	21.33±3.62 ^{l-i}	50.88±7.93 ^{a-h}	33.09±6.89 ^{c-h}
G25	15.37±2.71 ^{d-i}	10.67±2.31 ^{f-j}	30.48±4.69 ^{e-k}	20.34±3.78 ⁿ	48.89±8.05 ^{b-i}	31.47±5.94 ^{d-h}
G26	17.62±2.15 ^{a-d}	13.63±2.52 ^{ab}	35.25±7.22 ^{a-d}	24.34±4.96 ^{a-c}	53.66±10.57 ^{abc}	36.05±7.68 ^{a-d}
G27	19.47±3.78 ^a	13.94±2.98 ^a	38.65±8.56 ^a	26.12±6.33 ^a	57.24±13.24 ^a	39.45±8.69 ^a
G28	15.41±2.81 ^{d-i}	10.29±1.52 ^{g-j}	30.47±4.99 ^{e-k}	20.11±4.15 ⁿ	48.33±8.22 ^{c-i}	31.17±5.69 ^{d-h}
mean	16.34±2.61	11.73±2.21	32.39±5.57	21.37±3.88	49.61±8.48	32.78±6.07
G野	15.47±2.88	11.35±2.36	29.25±5.87	20.89±4.68	45.85±8.76	30.89±6.21

期生长和存活排在前列的家系，稚贝期依旧保持着优势。Collet 等^[34]研究了长牡蛎变态前后至 11 月龄生长的关系，发现早期的生长对牡蛎后期生长有显著影响，这与本研究的结果一致。因此，在壳橙快速生长品系的选育过程中，在幼虫期要重视选优操作，选择合适密度；在稚贝期要更加关注长势良好的家系，持续监测其成贝生长情况。

3.3 橙快长牡蛎生长性状的遗传参数

群体的表型和遗传参数是选育中重要的衡

量指标，遗传参数的准确估计是制定目标性状改良计划、节约育种成本以及预测遗传进展的重要因素。遗传力是数量性状最重要的特征值之一，反映了性状遗传能力的大小。在家系选育中是指狭义遗传力，即加性效应值占总表型的比例，数值越接近 1，表示性状的选择潜力越大^[12]。目前对于长牡蛎家系的壳色性状、生长存活性状、肉质性状、抗病性状等都有相关的遗传力估计。Xu 等^[20]评估了长牡蛎黑壳色品系壳高、壳长、壳宽的遗传力为 0.10~0.25，为中低遗传力，黑壳性状的遗传力为 0.69，是中

表 4 橙快长牡蛎幼虫期不同日龄生长性状的遗传参数

Tab. 4 Genetic parameters of growth traits in shell orange *C. gigas* larvae stages at different ages

日龄/d age	性状 trait	1		6		11		16		21	
		SH	SL	SH	SL	SH	SL	SH	SL	SH	SL
1	SH	0.70±0.07	0.99±0.01								
	SL	0.37±0.04	0.58±0.06								
6	SH			0.76±0.12	0.95±0.03						
	SL			0.30±0.06	0.50±0.10						
11	SH					0.52±0.08	0.97±0.02				
	SL					0.28±0.05	0.66±0.09				
16	SH							0.41±0.07	0.99±0.01		
	SL							0.31±0.04	0.82±0.09		
21	SH									0.56±0.09	0.99±0.01
	SL									0.32±0.06	0.71±0.14

注: 遗传力(加粗, 对角线)、遗传相关(对角线上方)和表型相关(对角线下方); 表中数值为测量值±标准差, 下同。

Notes: Heritability (in bold, on the diagonal), genetic (above diagonal) and phenotypic (below diagonal) correlations; values are estimates ± standard deviation, the same below.

表 5 橙快长牡蛎稚贝期不同日龄生长性状的遗传参数

Tab. 5 Genetic parameters of growth traits in shell orange *C. gigas* juvenile stages at different ages

日龄/d age	性状 trait	90		180		270	
		SH	SL	SH	SL	SH	SL
90	SH	0.67±0.14	0.98±0.01				
	SL	0.75±0.03	0.53±0.12				
180	SH			0.51±0.12	0.99±0.01		
	SL			0.30±0.06	0.65±0.14		
270	SH					0.48±0.12	0.98±0.01
	SL					0.28±0.06	0.55±0.13

高遗传力。Chi 等^[35]评估了长牡蛎生长与存活的遗传参数, 发现存活率的遗传力为低到中等范围, 生长性状与幼虫存活率之间的遗传相关性较低且呈负相关, 说明在不影响生长的情况下, 通过遗传选择提高存活率是可行的。Wan 等^[9]评估了长牡蛎壳金品系肉质成分的遗传力范围为 0.40~0.89, 均为中高遗传力。上述研究都表明长牡蛎的生长与存活性状有着良好的选育潜力。本研究评估的幼虫与稚贝期壳高和壳长性状的遗传力均属于中高遗传力, 与之前的研究报道相似, 表明橙快长牡蛎的生长性状具有良好的选育潜力。

生物的数量性状之间存在相互关联的情况, 这可能是基因连锁和基因的多效性引起的, 也可能是相应性状受到环境影响引起的。因此利用性状间的相关性, 可以通过选育遗传力较大

的性状达到间接选育遗传力低但相关性高的性状, 提高育种的效率^[12]。此外, 性状间的表型相关由遗传相关和环境共同影响, 因此不仅要关注性状本身的特征, 也要考虑群体所处环境的特征^[25]。陈雨露等^[8]评估了橙快混养家系壳色与生长的遗传参数, 排除了环境影响, 壳色的遗传力在 0.42~0.56, 为中高遗传力, 且与生长性状的表型和遗传相关较低。Toro 等^[36]对 24 个牡蛎家系的壳高和体重进行了连续 2 个生长季的遗传参数评估, 发现壳高与体重的遗传相关性很高, 表明壳高和体重可以达到间接选育的效果。De Melo 等^[37]评估了美国西海岸 5 代家系选育的牡蛎性状遗传参数, 发现各代间产量、存活率均与个体体重呈现中高遗传相关, 表明选择较高的生长性状或存活率可以实现产量的间接增加。本研究得到的橙快长牡蛎幼虫

与稚贝期在不同日龄壳高和壳长的遗传相关呈高度正相关, 表明壳高与壳长之间可以进行间接选择且主要由遗传控制。二者的表型相关值为 0.28~0.75, 其中 90 日龄表型相关的骤增可能与秋季稚贝养殖海区波动的环境因子有关^[28]。

4 结论

本研究比较分析了橙快长牡蛎和对照组家系幼虫与稚贝时期的生长和存活情况, 发现 G14 和 G23 两个家系在整个培育阶段具有良好的生长和存活优势, 在 21 日龄, 其壳高和存活率均值比对照组分别提高了 22.31%、25.05% 和 18.66%、25.33%; 在 270 日龄, 其壳高和存活率均值比对照组分别提高了 6.32%、23.47% 和 4.33%、8.33%。因此, 可以将 G14 和 G23 家系作为后续橙快良种培育的备选材料, 同时也应持续关注各家系在成贝期的生长存活表现。此外, 对橙快长牡蛎壳高和壳长的遗传力进行了评估, 均为中高遗传力, 二者的遗传相关性很高, 表明橙快长牡蛎的生长性状具有较大的遗传改良潜力且二者可以进行间接选择。本研究结果为橙快长牡蛎的继代选育提供了基础数据。

参考文献 (References):

- [1] 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. 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2022: 23.
- Bureau of Fisheries and Aquaculture Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022: 23 (in Chinese).
- [2] 肖述, 喻子牛. 养殖牡蛎的选择育种研究与实践 [J]. 水产学报, 2008, 32(2): 287-295.
- Xiao S, Yu Z N. Review of selective breeding research and practice in oyster cultivation[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(2): 287-295 (in Chinese).
- [3] 桂建芳, 包振民, 张晓娟. 水产遗传育种与水产种业发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 8-14.
- Gui J F, Bao Z M, Zhang X J. Development strategy for aquaculture genetic breeding and seed industry[J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(3): 8-14 (in Chinese).
- [4] 刘小林, 相建海. 重要经济贝类选择育种及遗传力研究进展 [J]. 海洋科学, 2003, 27(6): 15-20.
- Liu X L, Xiang J H. Review of selective breeding and heritability of commercially important mollusks[J]. Marine Sciences, 2003, 27(6): 15-20 (in Chinese).
- [5] 常亚青, 田毅, 张伟杰. 我国海洋水产生物遗传育种技术进展 [J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(6): 8-15.
- Chang Y Q, Tian Y, Zhang W J. Progress of mariculture biological genetic breeding technology in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(6): 8-15 (in Chinese).
- [6] Dégremont L, Bédier E, Boudry P. Summer mortality of hatchery-produced Pacific oyster spat (*Crassostrea gigas*). II. Response to selection for survival and its influence on growth and yield[J]. Aquaculture, 2010, 299(1-4): 21-29.
- [7] Dégremont L, Ernande B, Bédier E, et al. Summer mortality of hatchery-produced Pacific oyster spat (*Crassostrea gigas*). I. Estimation of genetic parameters for survival and growth[J]. Aquaculture, 2007, 262(1): 41-53.
- [8] 陈雨露, 徐成勋, 刘士凯, 等. 长牡蛎壳橙性状遗传参数评估及与生长性状的关联性 [J]. 水产学报, 2024, 48(1): 121-129.
- Chen Y L, Xu C X, Liu S K, et al. Estimates of genetic parameters for orange shell color and their correlation with growth traits in the improved orange shell line of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(1): 121-129 (in Chinese).
- [9] Wan S, Li Q, Yu H, et al. Estimating heritability for meat composition traits in the golden shell strain of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Aquaculture, 2020, 516: 734532.
- [10] Wan S, Li Q, Liu T, et al. Heritability estimates for shell color-related traits in the golden shell strain of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) using a molecular pedigree[J]. Aquaculture, 2017, 476: 65-71.
- [11] Dégremont L, Nourry M, Maurouard E. Mass selection for survival and resistance to OsHV-1 infection in *Crassostrea gigas* spat in field conditions: response to selection after four generations[J]. Aquaculture, 2015, 446: 111-121.
- [12] 张国范, 刘晓. 关于贝类遗传改良几个问题的讨论 [J]. 水产学报, 2006, 30(1): 130-137.
- Zhang G F, Liu X. Theory and method of genetic improvement in mariculture mollusks: a review[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(1): 130-137 (in Chinese).
- [13] Langdon C, Evans F, Jacobson D, et al. Yields of cultured Pacific oysters *Crassostrea gigas* Thunberg improved after one generation of selection[J]. Aquaculture, 2003, 220(1-4): 227-244.
- [14] Evans S, Langdon C. Effects of genotype×environment interac-

- tions on the selection of broadly adapted Pacific oysters (*Crassostrea gigas*)[J]. *Aquaculture*, 2006, 261(2): 522-534.
- [15] 王雪磊, 李琪, 于红, 等. 长牡蛎壳金色性状遗传参数评估及与生长性状的关联分析[J]. 水产学报, 2016, 40(12): 1889-1896.
Wang X L, Li Q, Yu H, *et al.* Estimates of genetic parameters for golden shell color and correlation with growth traits in the golden shell strain of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(12): 1889-1896 (in Chinese).
- [16] 王庆志, 李琪, 刘世凯, 等. 长牡蛎成体生长性状的遗传参数估计[J]. 中国水产科学, 2012, 19(4): 700-706.
Wang Q Z, Li Q, Liu S K, *et al.* Estimates of genetic parameters for growth-related traits in adult *Crassostrea gigas*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(4): 700-706 (in Chinese).
- [17] 张跃环, 闫喜武, 张澎, 等. 贝类壳色多态的研究概况及展望[J]. 水产科学, 2008, 27(12): 680-683.
Zhang Y H, Yan X W, Zhang P, *et al.* Research advances and prospects on shell color polymorphism of mollusks[J]. *Fisheries Science*, 2008, 27(12): 680-683 (in Chinese).
- [18] Alfnes F, Guttormsen A G, Steine G, *et al.* Consumers' willingness to pay for the color of salmon: a choice experiment with real economic incentives[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2006, 88(4): 1050-1061.
- [19] Han Z Q, Li Q. Different responses between orange variant and cultured population of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* at early life stage to temperature-salinity combinations[J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(6): 2233-2239.
- [20] Xu L, Li Q, Yu H, *et al.* Estimates of heritability for growth and shell color traits and their genetic correlations in the black shell strain of Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. *Marine Biotechnology*, 2017, 19(5): 421-429.
- [21] Xing D, Li Q, Kong L F, *et al.* Heritability estimate for mantle edge pigmentation and correlation with shell pigmentation in the white-shell strain of Pacific oyster, *Crassostrea gigas*[J]. *Aquaculture*, 2018, 482: 73-77.
- [22] Han Z Q, Li Q, Liu S K, *et al.* Crossbreeding of three different shell color lines in the Pacific oyster reveals high heterosis for survival but low heterosis for growth[J]. *Aquaculture*, 2020, 529: 735621.
- [23] Han Z Q, Li Q. Mendelian inheritance of orange shell color in the Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. *Aquaculture*, 2020, 516: 734616.
- [24] Han Z Q, Li Q. Relationship between shell color and growth and survival traits in the Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2021, 20(4): 985-991.
- [25] 方佳峰, 李琪. 长牡蛎壳橙品系幼虫和稚贝的生长性状遗传参数评估[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(11): 38-44.
Fang J F, Li Q. Estimation of genetic parameters for growth traits of larvae and juveniles of the orange-shell strain of Pacific oyster[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(11): 38-44 (in Chinese).
- [26] Falconer D S, MacKay T F C. Introduction to quantitative genetics[M]. 4th ed. Benjamin Cummings, 1996: 68-74.
- [27] Gjedrem T. Genetic improvement for the development of efficient global aquaculture: a personal opinion review[J]. *Aquaculture*, 2012, 344-349: 12-22.
- [28] 王雪磊, 李琪, 孔令锋, 等. 壳金长牡蛎家系的建立及生长和存活性状的比较[J]. 水产学报, 2016, 40(11): 1683-1693.
Wang X L, Li Q, Kong L F, *et al.* Construction and comparison of growth and survival among different golden shell families of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(11): 1683-1693 (in Chinese).
- [29] 赵宗武, 李琪, 张景晓, 等. 壳白长牡蛎家系幼体生长存活比较及生长性状遗传参数评估[J]. 水生生物学报, 2019, 43(2): 315-321.
Zhao Z W, Li Q, Zhang J X, *et al.* Genetic parameters and growth traits in white shell families of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(2): 315-321 (in Chinese).
- [30] Taris N, Ernande B, McCombie H, *et al.* Phenotypic and genetic consequences of size selection at the larval stage in the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 333(1): 147-158.
- [31] Boudry P, Collet B, McCombie H, *et al.* Individual growth variation and its relationship with survival in juvenile Pacific oysters, *Crassostrea gigas* (Thunberg)[J]. *Aquaculture International*, 2003, 11(5): 429-448.
- [32] 闫喜武, 王琦, 张跃环, 等. 中国蛤蜊的家系建立及早期生长发育[J]. 水产学报, 2010, 34(4): 521-530.
Yan X W, Wang Q, Zhang Y H, *et al.* Studies on establishment of families and their early growth and development for surf clam *Macra chinensis* Philippi[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(4): 521-530 (in Chinese).
- [33] 闫喜武, 霍忠明, 张跃环, 等. 菲律宾蛤仔家系的建立及早期生长发育[J]. 水产学报, 2010, 34(1): 32-40.

- Yan X W, Huo Z M, Zhang Y H, *et al.* Preliminary study of establishment of families and their early growth and development for Manila clam (*Ruditapes philippinarum*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(1): 32-40 (in Chinese).
- [34] Collet B, Boudry P, Thebault A, *et al.* Relationship between pre- and post-metamorphic growth in the Pacific oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg)[J]. *Aquaculture*, 1999, 175(3-4): 215-226.
- [35] Chi Y, Li Q, Liu S K, *et al.* Genetic parameters of growth and survival in the Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. *Aquaculture Research*, 2021, 52(1): 282-290.
- [36] Toro J E, Newkirk G F. Divergent selection for growth rate in the European oyster *Ostrea edulis*: response to selection and estimation of genetic parameters[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 62(3): 219-227.
- [37] De Melo C M R, Durland E, Langdon C. Improvements in desirable traits of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, as a result of five generations of selection on the West Coast, USA[J]. *Aquaculture*, 2016, 460: 105-115.

Comparison of growth, survival and evaluation of genetic parameters in the rapid-growth strain of the orange shell *Crassostrea gigas*

DU Lijie¹, XU Chengxun¹, LI Qi^{1,2*}

1. Key Laboratory of Mariculture of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

Abstract: The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, is a globally important aquaculture shellfish species. In recent years, it has faced challenges such as germplasm degradation and high mortality rates. Both China and international communities are actively working to cultivate new oyster varieties with superior growth performance and robust stress resistance. In this study, we constructed 11 half-sib families and 28 full-sib families using a nested design from rapid-growth strain of the orange shell *C. gigas* that had been mass-selected over three consecutive generations. Concurrently, wild individuals were used to establish control families to assess the growth and survival traits of the rapid-growth families of the orange shell *C. gigas* at different ages. The results indicated that during the larval stage, the growth and survival rates of the oyster families were higher than those of the control group, with average shell height and survival rates increasing by 12.40%–23.70% and 1.52%–13.98%, respectively. In the juvenile stage, compared with the control group, the shell height and survival rates of these families increased by 5.62%–10.74% and 2.34%–2.80%, respectively. However, further improvements in the survival rates of juvenile shellfish are needed. Significant differences were observed in growth and survival traits among different families ($P < 0.05$), with families G14 and G23 showing greater advantages in growth and survival. Additionally, we evaluated the genetic parameters of shell height and shell length. The heritability of shell height and shell length ranged from (0.41 ± 0.07) - (0.76 ± 0.12) and (0.50 ± 0.10) - (0.82 ± 0.09) , respectively, indicating medium and high heritability. The genetic and phenotypic correlations of shell height and shell length at different ages were positive, with correlation coefficients ranging from 0.95–0.99 and 0.28–0.75, respectively. This suggests that the growth traits of orange *C. gigas* have good breeding potential and can be selected indirectly. The findings of this study provided fundamental data for the development of the rapid-growth strain of the orange shell *C. gigas*.

Key words: *Crassostrea gigas*; orange shell; family selection; growth survival; genetic parameter

Corresponding author: LI Qi. E-mail: qili66@ouc.edu.cn

Funding projects: China Agriculture Research System (CARS-49); Agricultural Seed Improvement Project of Shandong Province (2021LZGC027, 2022LZGCQY010)