

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18443

深凹壳型香港牡蛎家系生长与存活性状比较

莫日馆^{1,2}, 肖述¹, 秦艳平^{1,2}, 张跃环¹, 马海涛¹, 喻子牛¹

1. 中国科学院南海海洋研究所, 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室, 广东省应用海洋生物重点实验室, 广东 广州 510301;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 为了培育壳型和生长性状优良的深凹壳型香港牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)新品系, 以广东台山镇海湾香港牡蛎野生群体为基础群体, 以壳型和生长为主要选育目标, 依据壳型指数 D 和巢式设计建立了 30 个全同胞家系和 1 个对照组, 评估各家系和对照组在幼虫期和稚贝期的生长和存活性能。结果表明, 整个生长阶段, 各家系生长性状和存活率的平均值均高于对照组。幼虫期, 所有家系壳高、生长速度以及存活率的平均值均高于对照组, 所有家系壳高平均值比对照组提高 3.78%~7.73%, 生长速度提高 7.86%, 存活率提高 2.85%~7.32%。稚贝期, 所有家系壳高、壳长以及生长速度、存活率的平均值均高于对照组平均值, 壳高提高 5.23%~16.32%, 壳长提高 7.94%~10.69%, 生长速度提高 9.55%~20.16%, 存活率提高 3.45%~12.25%。不同家系在不同时期的生长性状和存活性能也表现出较大的差异, G1 在整个稚贝期的生长性状、生长速度以及存活率的平均值均显著高于所有家系和对照组的平均值, 12 月龄 G1 家系的壳高、壳长、壳宽、壳型指数 D 、总重、壳重、软体重、存活率比所有家系平均值提高 9.83%~54.75%, 相比对照组平均值提高 23.34%~80.77%, 同时 G3、G10、G12、G15、G19、G23、G26 在稚贝期也表现出较大的生长优势和存活优势。研究表明, 深凹壳型香港牡蛎家系选育群体在生长性状和存活性能上均具有较大的优势, G1、G3、G10、G12、G15、G19、G23、G26 可作为后期培育生长性能优良的深凹壳型香港牡蛎新品系的育种材料。本研究为中国华南地区培育出深凹壳型、生长性能良好的香港牡蛎优良品种提供了理论基础和数据材料。

关键词: 香港牡蛎; 深凹壳型; 壳型指数 D ; 家系; 生长; 存活

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)05-0869-14

选择育种是遗传育种的最基本方法, 也是目前水产动物遗传改良和获得优良性状的主要途径。牡蛎育种在国内外已经有很多的研究, 其中部分研究成果证明通过人工选择育种可增加牡蛎抗病抗逆性能、提升牡蛎生长速度及其品质性状, 并培育出一批性状优良的牡蛎新品种, 如抗单孢子虫病(MSX disease)和抗帕金虫病(Dermo disease)的美洲牡蛎(*Crassostrea virginica*)双抗品系^[1-2]、抗马尔太虫病(QX disease)和抗冬季致死的悉尼岩牡蛎(*Saccostrea glomerata*)品系^[3-6]、

‘Wilde strain’和‘Milford high-line’美洲牡蛎(*Crassostrea virginica*)速长品系^[7]、‘海大 1 号’和‘海大 2 号’太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)^[8-9]、‘华南 1 号’香港牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)^[10]、‘金蛎 1 号’葡萄牙牡蛎(*Crassostrea angulata*)^[11]等, 牡蛎新品种的成功培育对促进牡蛎产业持续健康发展具有至关重要的意义。

香港牡蛎(*C. hongkongensis*)主要分布和养殖于华南沿海咸淡水水域, 具有明显的地方特色, 已成为中国南部沿海最主要的牡蛎养殖种类,

收稿日期: 2019-01-20; 修订日期: 2019-03-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31702340); 广东省科技厅项目(2016B020233005, 20140208); 广东省自然科学基金项目(2017A030310442).

作者简介: 莫日馆(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事贝类遗传学与育种研究. E-mail: moriguanouc@163.com

通信作者: 喻子牛, 博士, 研究员. E-mail: carlzyu@scsio.ac.cn

2017 年产量约 170 万 t, 约占全国牡蛎产量的 35%^[12], 具有极高的经济价值。近年来, 由于市场需求旺盛, 香港牡蛎的经济价值更受关注, 目前香港牡蛎的养殖全部基于野生自然群体的天然苗种, 总产量和产值虽然还在逐年增长, 但是香港牡蛎大规模死亡现象也更加频繁, 另外市场需求也越来越表现出多样化和高端化的趋势。通过人工繁育特别是牡蛎新品种培育无疑是解决香港牡蛎抗病抗逆和提升品质、迎合市场多样化需求的重要途径。壳型是牡蛎一种重要的表观形态性状, 壳型规则美观、生长性能优越的牡蛎更容易受到养殖人员和消费者的青睐。国内外关于牡蛎壳型选育的研究较少, 美洲牡蛎(*C. virginica*)‘Wilde strain’品系通过生长速度和深杯壳型(壳宽)选育得到, 该品系生长速度快, 最大的特点是牡蛎壳的凹度(壳宽)大, ‘海大 1 号’太平洋牡蛎(*C. gigas*)则以生长速度和壳型作为选育指标, 经连续 6 代选育后, 壳型整齐度明显优于普通商品太平洋牡蛎^[8], 但目前国内外尚没有关于香港牡蛎壳型性状的选育研究报道。早在 1961 年, 日本 Imai 等^[13]便采用壳型指数 D (又称为壳深指数, ISD)研究太平洋牡蛎壳的凹度, ISD 可以很好地体现出牡蛎壳型的凹度情况, 但对凹度的程度并没有明确的规定。本课题组发现香港牡蛎壳型也存在不同程度的凹度, 因此依据 ISD 作为量化壳型凹度的指标, 同时将凹度最大的壳型称为深凹壳型。本研究以广东台山镇海湾香港牡蛎野生群体为基础群体, 以壳型和生长为主要选育目标, 依据 ISD 和平衡巢式设计, 研究深凹壳型香港牡蛎幼虫期和稚贝期的生长性状和存活性能变化, 旨在为中国华南地区培育出深凹壳型、生长性能良好的香港牡蛎优良品种。

1 材料与方法

1.1 亲贝来源

2017 年 4 月, 从广东台山镇海湾随机筛选贝壳无损伤、活力强、无病害的 500 枚 2 龄野生香港牡蛎作为繁殖群体, 亲贝在中国科学院湛江海洋经济动物实验站东海岛试验场进行人工促熟。

1.2 家系建立

亲贝暂养至性腺成熟时, 清除表面杂质, 测量其壳高、壳长和壳宽, 计算壳型指数 D , 其数值等于壳宽除以壳高与壳长之和的百分比, 分为 3 类: 深凹壳型($ISD \geq 30\%$), 中凹型($20\% \leq ISD < 30\%$), 浅凹型($ISD < 20\%$)。选择壳型指数 $D \geq 30\%$ 的个体作为亲本(表 1), 采用平衡巢式设计, 1 个雄性香港牡蛎对应 3 个雌性香港牡蛎的方式共建立 30 个全同胞家系。采用人工解剖法移除亲贝右壳, 显微镜下辨别雌雄后, 收集母本性腺, 用 300 目筛网轻轻揉搓去除组织碎片, 再用 500 目筛网洗卵 2~3 次去除多余的组织和黏液, 将清洗后的卵子放置于 15 L 塑料桶中, 加入干净的海水活化。当卵子大部分变为圆形时, 收集、解剖父本性腺获得精子, 用 300 目筛网轻轻揉搓去除组织碎片, 获得精液后放入 5 L 塑料桶中, 并加入适量海水活化; 镜检精子变得活跃时加入到卵液中受精, 精卵密度(5~10): 1, 共建立 30 个深凹壳型香港牡蛎全同胞家系。同时选择壳型指数 $D < 30\%$ 的个体作为亲本, 通过 3 个单对交配建立对照组。实验过程中, 盐度控制在 15~18, 控制水温为 27~30℃, 各个实验组严格隔离, 避免产生污染。

1.3 幼虫培育

人工授精后, 将 30 个深凹壳型香港牡蛎家系和对照组受精卵分别置于 400 L 聚乙烯塑料桶中孵化, 同时连续微量充气。待受精卵发育至 D 形幼虫时, 用 300 目筛绢网进行选优, 同时幼虫培养密度设置为 3~5 个/mL, 整个幼虫培育期间, 每 3 d 对密度进行调整, 使各个家系密度基本保持一致, 每 2 天全量或半量换水, 盐度控制在 15~18, 控制水温为 27~30℃, 持续微量充气。每天投饵 2 次, 前 7 d 的饵料以等鞭金藻为主, 后期混合投喂云藻和角毛藻, 每天早晚同时投喂等量的饵料。

1.4 采苗及稚贝养成

当 20%~30% 的香港牡蛎幼虫出现眼点时, 投放牡蛎壳附着基进行采苗, 待水中无浮游幼虫时, 停止采苗, 随后移入室内育苗池中暂养。待自然海区环境条件适宜, 无野生牡蛎幼虫时, 转移到北海市竹林盐场海区进行稚贝养成。整个实验阶

表 1 深凹壳型香港牡蛎家系亲本的数量性状
Tab. 1 Quantitative traits of parents of deep-cupped shell shape *Crassostrea hongkongensis*

家系 family	序号 serial number	母本(♀)				序号 serial number	父本(♂)			
		SH/mm	SL/mm	SW/mm	ISD/%		SH/mm	SL/mm	SW/mm	ISD/%
G1	1	103.71	69.34	55.14	31.86	1	99.36	47.07	47.96	32.75
G2	2	90.81	59.24	45.52	30.34					
G3	3	107.07	60.64	54.73	32.63					
G4	4	101.49	67.09	54.41	32.28					
G5	5	102.39	68.79	51.52	30.10					
G6	6	92.92	60.18	46.69	30.50	2	134.37	62.68	63.46	32.21
G7	7	91.38	54.03	45.32	31.17					
G8	8	114.59	62.03	52.98	30.00					
G9	9	92.49	63.22	46.75	30.02					
G10	10	146.34	52.05	63.09	31.80					
G11	11	101.10	51.69	49.48	32.38	3	104.27	45.6	48.52	32.37
G12	12	100.03	63.45	57.03	34.89					
G13	13	111.59	61.03	52.98	30.69					
G14	14	90.09	59.12	44.95	30.13					
G15	15	96.56	64.86	52.61	32.59					
G16	16	94.66	60.60	48.39	31.17	4	101.49	67.09	54.41	32.28
G17	17	103.72	65.62	64.57	38.13					
G18	18	93.25	62.54	58.14	37.32					
G19	19	107.59	66.37	54.03	31.06					
G20	20	101.06	79.11	54.96	30.50					
G21	21	104.74	88.12	63.8	33.08	5	102.39	68.79	52.02	30.39
G22	22	109.62	51.49	53.21	33.03					
G23	23	106.89	67.75	58.06	33.25					
G24	24	115.39	64.04	59.22	33.00					
G25	25	92.16	63.31	54.38	34.98					
G26	26	95.94	65.41	48.51	30.07	6	94.05	63.17	58.76	37.37
G27	27	93.16	60.35	46.09	30.02					
G28	28	101.88	63.25	52.37	31.71					
G29	29	93.77	44.32	49.77	36.04					
G30	30	98.64	68.51	51.27	30.67					
平均值	average	101.83	62.92	53.00	32.18	7	95.02	56.15	48.67	32.20
对照组	control	103.44	50.32	38.69	25.16					

注: SH 表示壳高, SL 表示壳长, SW 表示壳宽, ISD 表示壳型指数 *D*。
Note: SH means shell height. SL means shell length; SW means shell width; ISD means index of shell depth.

段, 每个家系的管理和生长环境保持一致, 同时严防家系之间产生污染, 每个家系使用不同标签加以区分。

1.5 测量指标

幼虫期间, 分别测量各实验组 3 日龄、6 日龄、9 日龄、12 日龄、15 日龄幼虫的壳高。稚贝期间, 分别测量 1 月、2 月、4 月龄的壳高, 测量 6 月、9 月龄子代的壳高和壳长, 12 月龄时, 测量各家系

子代的壳高、壳长、壳宽、总重、壳重、软体重等指标, 同时计算 ISD 和出肉率。幼虫期间的壳高在显微镜下用目微尺(10×)测量, 稚贝期子代的壳高、壳长、壳宽用游标卡尺测量, 精确至 0.02 mm, 稚贝期子代的总重、壳重、软体重用电子天平测量, 精确至 0.01 g, 每个家系和对照组随机测量 30 个个体。幼虫存活率根据初始密度、调整后密度及测量密度推算得出, 稚贝存活率为当次测量

个体数与附着变态稚贝数的百分比。幼虫期生长速度为不同阶段个体壳高的日增长量($\mu\text{m}/\text{d}$), 稚贝期生长速度为不同阶段个体指标的月增长量($\text{mm}/\text{月}$)。

1.6 数据处理和分析

采用 Excel 2007 和 SPSS22.0 软件对各家系的生长性状数据做初步统计处理后, 采用 Excel 2007 作图, 使用 SPSS22.0 软件应用单因素方差分析(ANOVA)和 Tukey 多重比较进行分析和显著性

检验, $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著, 各组实验数据均在相同培育时间下获得。

2 结果与分析

2.1 幼虫期壳高的生长比较

统计深凹壳型香港牡蛎家系幼虫 3 日龄、6 日龄、9 日龄、12 日龄、15 日龄的壳高, 将统计的幼虫期不同日龄壳高数据进行单因素方差分析(ANOVA), 分析结果如表 2 所示。

表 2 幼虫期不同家系壳高生长的比较
Tab. 2 Comparison of shell height among different *Crassostrea hongkongensis* families at larval stage

$n=30; \bar{x}\pm\text{SD}$

组别 group	幼虫日龄/d age of the larvae					生长速度/ $(\mu\text{m}/\text{d})$ growth rate
	3	6	9	12	15	
G1	82.33 $\pm$ 3.65 ^a	96.00 $\pm$ 4.62 ^a	141.17 $\pm$ 5.52 ^a	235.00 $\pm$ 10.17 ^a	287.67 $\pm$ 12.71 ^a	17.11
G2	79.33 $\pm$ 3.65 ^{ab}	103.83 $\pm$ 4.68 ^b	117.67 $\pm$ 7.28 ^b	177.83 $\pm$ 5.03 ^b	258.33 $\pm$ 9.59 ^b	14.92
G3	75.83 $\pm$ 3.24 ^b	102.50 $\pm$ 3.15 ^b	126.33 $\pm$ 4.34 ^c	140.33 $\pm$ 6.81 ^c	267.00 $\pm$ 16.48 ^b	15.93
G4	86.83 $\pm$ 3.34 ^c	123.83 $\pm$ 6.11 ^c	149.17 $\pm$ 5.74 ^d	187.33 $\pm$ 9.80 ^d	288.17 $\pm$ 10.71 ^a	16.78
G5	83.17 $\pm$ 2.45 ^a	111.33 $\pm$ 3.46 ^d	162.00 $\pm$ 9.88 ^c	253.17 $\pm$ 9.69 ^c	328.33 $\pm$ 6.61 ^c	20.43
G6	90.67 $\pm$ 3.14 ^d	101.83 $\pm$ 3.34 ^b	125.83 $\pm$ 5.74 ^c	212.17 $\pm$ 14.12 ^f	306.50 $\pm$ 13.46 ^d	17.99
G7	85.33 $\pm$ 3.70 ^{ac}	131.83 $\pm$ 9.14 ^{cc}	151.67 $\pm$ 8.13 ^{df}	174.50 $\pm$ 5.31 ^b	259.83 $\pm$ 8.15 ^b	14.54
G8	75.83 $\pm$ 3.73 ^b	140.83 $\pm$ 8.00 ^c	173.00 $\pm$ 10.72 ^{eg}	244.83 $\pm$ 11.41 ^e	340.67 $\pm$ 6.66 ^c	22.07
G9	82.83 $\pm$ 3.87 ^{ab}	115.33 $\pm$ 5.71 ^d	155.67 $\pm$ 7.51 ^{de}	219.83 $\pm$ 10.63 ^{fg}	326.50 $\pm$ 7.67 ^c	20.31
G10	75.50 $\pm$ 3.79 ^b	120.83 $\pm$ 6.71 ^{cf}	139.00 $\pm$ 6.21 ^a	184.33 $\pm$ 8.00 ^{bd}	282.00 $\pm$ 7.14 ^a	17.21
G11	84.17 $\pm$ 3.73 ^{ac}	135.67 $\pm$ 8.88 ^{eg}	166.17 $\pm$ 8.27 ^{eh}	218.67 $\pm$ 8.60 ^{fh}	327.67 $\pm$ 11.80 ^c	20.29
G12	86.17 $\pm$ 4.49 ^{ac}	115.00 $\pm$ 6.02 ^{dh}	126.83 $\pm$ 8.15 ^c	245.33 $\pm$ 14.20 ^e	336.00 $\pm$ 9.68 ^{ce}	20.82
G13	76.17 $\pm$ 5.20 ^b	112.07 $\pm$ 7.16 ^d	128.00 $\pm$ 10.31 ^c	180.17 $\pm$ 13.03 ^{bd}	307.83 $\pm$ 10.06 ^d	19.31
G14	84.67 $\pm$ 3.20 ^{ac}	128.50 $\pm$ 7.33 ^{ce}	182.83 $\pm$ 7.51 ^g	251.67 $\pm$ 6.47 ^c	326.17 $\pm$ 11.35 ^c	20.13
G15	85.50 $\pm$ 3.79 ^{ac}	123.50 $\pm$ 5.28 ^c	143.33 $\pm$ 5.77 ^{ad}	208.67 $\pm$ 8.51 ^f	290.83 $\pm$ 12.18 ^a	17.11
G16	81.83 $\pm$ 2.45 ^{ab}	107.00 $\pm$ 4.84 ^{bd}	144.33 $\pm$ 4.50 ^{ad}	240.17 $\pm$ 5.49 ^a	262.00 $\pm$ 7.94 ^b	15.01
G17	82.33 $\pm$ 2.86 ^{ab}	104.33 $\pm$ 5.04 ^b	182.67 $\pm$ 7.28 ^g	222.83 $\pm$ 5.52 ^f	268.17 $\pm$ 14.65 ^b	15.49
G18	81.67 $\pm$ 3.03 ^{ab}	127.00 $\pm$ 5.96 ^{ce}	142.67 $\pm$ 5.98 ^a	242.33 $\pm$ 6.40 ^a	289.67 $\pm$ 10.82 ^a	17.33
G19	84.33 $\pm$ 4.10 ^{ac}	124.67 $\pm$ 5.07 ^{ce}	147.17 $\pm$ 6.91 ^{ad}	235.17 $\pm$ 6.63 ^a	326.33 $\pm$ 7.06 ^c	20.17
G20	83.67 $\pm$ 3.92 ^{ac}	140.17 $\pm$ 5.33 ^g	149.67 $\pm$ 7.18 ^d	238.67 $\pm$ 5.40 ^a	308.17 $\pm$ 11.18 ^d	18.71
G21	104.17 $\pm$ 6.03 ^e	137.67 $\pm$ 7.63 ^c	149.17 $\pm$ 5.88 ^d	218.00 $\pm$ 6.00 ^f	263.50 $\pm$ 7.09 ^b	13.28
G22	97.33 $\pm$ 3.88 ^f	112.67 $\pm$ 4.30 ^d	130.17 $\pm$ 5.33 ^c	191.83 $\pm$ 7.93 ^d	335.67 $\pm$ 6.12 ^c	19.86
G23	83.50 $\pm$ 4.18 ^{abc}	106.50 $\pm$ 4.38 ^{bh}	123.00 $\pm$ 5.02 ^{bc}	188.50 $\pm$ 7.33 ^d	325.00 $\pm$ 6.43 ^c	20.13
G24	82.33 $\pm$ 3.14 ^{ab}	105.50 $\pm$ 3.79 ^b	150.5 $\pm$ 6.34 ^d	225.50 $\pm$ 5.47 ^{agh}	283.83 $\pm$ 8.78 ^a	16.79
G25	88.17 $\pm$ 2.78 ^{cd}	137.83 $\pm$ 7.62 ^c	155.17 $\pm$ 5.33 ^{ef}	239.00 $\pm$ 5.93 ^a	324.50 $\pm$ 8.44 ^c	19.69
G26	85.33 $\pm$ 3.46 ^{ac}	112.33 $\pm$ 4.50 ^d	125.00 $\pm$ 6.43 ^c	228.17 $\pm$ 6.76 ^{ag}	330.33 $\pm$ 8.00 ^c	20.42
G27	83.83 $\pm$ 4.29 ^{ac}	127.83 $\pm$ 6.52 ^{ce}	153.83 $\pm$ 5.03 ^{de}	250.67 $\pm$ 6.91 ^e	310.00 $\pm$ 9.19 ^d	18.85
G28	84.00 $\pm$ 3.81 ^{ac}	139.00 $\pm$ 4.62 ^c	157.50 $\pm$ 5.04 ^{ef}	242.33 $\pm$ 7.63 ^a	328.17 $\pm$ 7.48 ^c	20.35
G29	82.67 $\pm$ 3.14 ^{ab}	132.17 $\pm$ 5.03 ^c	171.33 $\pm$ 5.86 ^{gh}	238.50 $\pm$ 5.11 ^a	328.33 $\pm$ 5.62 ^c	20.47
G30	87.83 $\pm$ 3.13 ^{cd}	115.17 $\pm$ 5.80 ^{df}	164.00 $\pm$ 4.43 ^e	250.17 $\pm$ 6.09 ^c	325.33 $\pm$ 4.90 ^c	19.79
平均值 average	84.24 $\pm$ 5.84 ^{ac}	119.76 $\pm$ 13.39 ^{cf}	149.83 $\pm$ 17.63 ^d	219.52 $\pm$ 28.96 ^{fg}	304.75 $\pm$ 27.00 ^d	18.38
对照组 control	81.17 $\pm$ 3.39 ^{ab}	111.17 $\pm$ 7.15 ^d	141.17 $\pm$ 6.25 ^a	211.33 $\pm$ 8.09 ^f	285.67 $\pm$ 11.94 ^a	17.04

注: 同一列中具有不同字母标记的数值之间差异显著($P<0.05$)。

Note: Values with different superscripts within the same column are significantly different from each other at 0.05 level.

整个幼虫期, 所有家系壳高和生长速度平均值均高于对照组, 壳高平均值比对照组提高 3.78%~7.73%, 生长速度比平均值提高 7.86%, 但 G2、G7、G16、G21 幼虫期生长速度均显著小于对照组和所有家系的平均值($P<0.05$)。采用 Tukey 多重比较进一步分析发现, 不同家系的壳高大小排序存在不一致性, 其中 3 日龄的 G21 和 G22 两个家系的壳高均显著大于其他家系($P<0.05$), 其余家系的壳高差异不显著($P>0.05$)。6 日龄时各家系的壳高增长明显, 其中 G8 壳高最大为(140.83 ± 8.00) μm , G1 生长最慢, 壳高为(96.00 ± 4.62) μm , 显著小于其他家系和对照组($P<0.05$)。9 日龄的 G14 和 G17 壳高最大, 分别达到(182.83 ± 7.51) μm 和 (182.67 ± 7.28) μm , 两者之间差异不明显($P>0.05$), 但显著大于其他家系和对照组($P<0.05$)。G2 壳高最小为(117.67 ± 7.28) μm , 显著低于其他家系、平均值, 以及对照组($P<0.05$)。12 日龄所有家系的平均壳高为 219.52 μm , 高于对照组, 但差异不显著($P>0.05$)。G3 壳高最小为(140.33 ± 6.81) μm , 显著小于其他家系($P<0.05$), G5、G14、G27、G30

壳高均达到 250 μm 以上, 显著高于其他家系、平均值, 以及对照组($P<0.05$), 显示出一定的生长优势。15 日龄时, 开始出现眼点幼虫, 大部分家系幼虫壳高达到 300 μm 以上, 所有家系的平均壳高显著高于对照组($P<0.05$)。

2.2 幼虫期存活率的比较分析

整个幼虫期, 各家系子代平均存活率均高于对照组, 但差异不显著($P>0.05$)。各家系幼虫在前 6 天均表现出较高的存活率, 存活率均处于 80% 以上, 并且各家系之间差异不显著($P>0.05$, 图 1)。随着日龄增长, 幼虫死亡率逐渐增大, 15 日龄时各家系幼虫存活率明显降低, 此时大部分家系幼虫开始进入附着变态阶段, 可能与幼虫摄食方式转变有关, 此时幼虫由原来依靠面盘摄食转变为利用鳃和消化道摄食。6 日龄以后, G2、G7、G16、G21 幼虫存活率下降幅度显著大于其余家系($P<0.05$), 其中 G21 在 15 日龄时存活率最低, 为(30.21 ± 3.84)%。其余 26 个家系存活率下降趋势基本一致, 差异不显著($P>0.05$), 存活率的波动均较小, 整个幼虫期均保持较高的存活率。

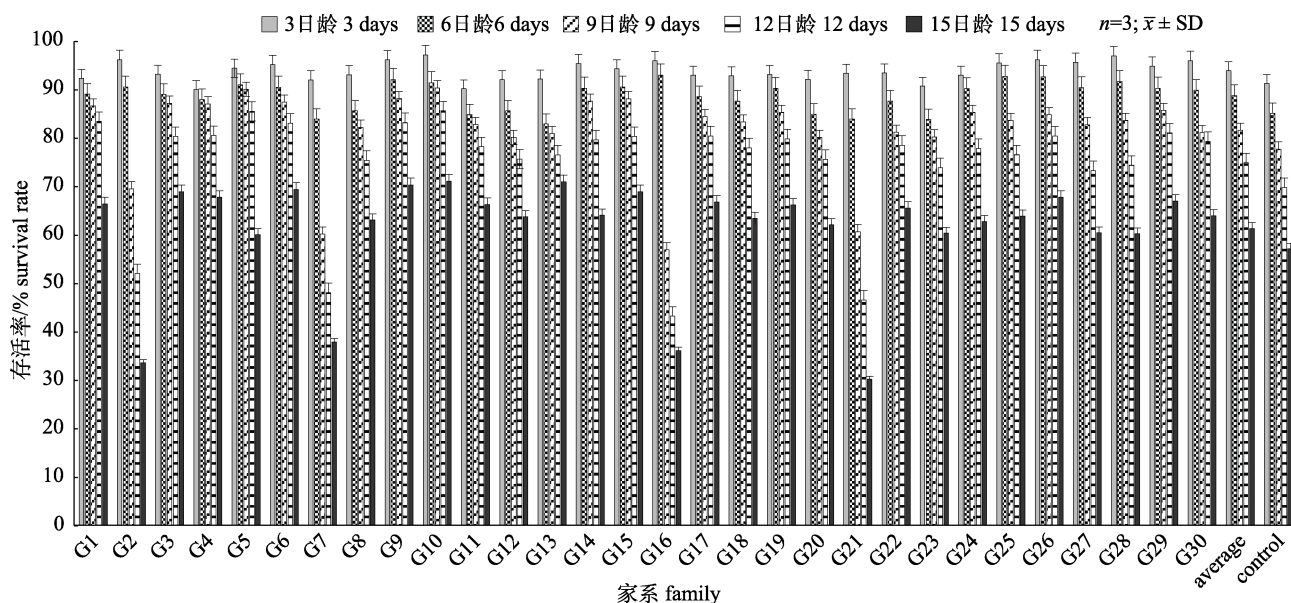


图 1 深凹壳型香港牡蛎幼虫期不同家系存活率的比较

Fig. 1 Comparison of survival rate among different deep-cupped shell shape families of *Crassostrea hongkongensis* at larval stage

2.3 稚贝期生长比较

将深凹壳型香港牡蛎家系在稚贝期 1 月龄、2 月龄、4 月龄的壳高和 6 月龄、9 月龄、12 月龄

的壳高和壳长进行单因素方差分析(ANOVA)和 Tukey 多重比较分析, 结果如表 3 所示。

整个稚贝期, 所有家系壳高、壳长以及生长

速度的平均值均高于对照组,壳高提高 5.23%~16.32%,壳长提高 7.94%~10.69%,壳高生长速度提高 9.55%,壳长生长速度提高 20.16%。其中 1 月龄的 G1 壳高最大为(7.98±0.68) μm,显著高于其他家系和对照组($P<0.05$)。2 月龄各个家系的壳高增长明显,所有家系的壳高平均值相对于 1 月

表 3 深凹壳型香港牡蛎稚贝期不同家系壳高、壳长的生长比较
Tab. 3 Comparison of shell height, shell length of different deep-cupped shell shape *Crassostrea hongkongensis* families at juvenile stage

组别 group	1 个月 1 month	2 个月 2 months	4 个月 4 months	6 个月 6 months		9 个月 9 months		12 个月 12 months		生长速度/ (mm/month) growth rate	
	壳高/mm shell height	壳高/mm shell height	壳高/mm shell height	壳高/mm shell height	壳长/mm shell length	壳高/mm shell height	壳长/mm shell length	壳高/mm shell height	壳长/mm shell length	壳高 shell height	壳长 shell length
G1	7.98±0.68 ^a	14.51±1.24 ^a	33.32±4.46 ^a	44.95±7.62 ^a	35.60±6.34 ^a	55.21±5.74 ^a	42.44±5.97 ^a	72.48±8.35 ^a	60.87±9.01 ^a	5.86	4.21
G2	4.06±0.35 ^b	7.12±0.59 ^b	22.05±3.94 ^b	33.60±4.90 ^b	27.44±5.94 ^b	47.00±6.79 ^b	36.68±4.92 ^b	51.75±6.10 ^b	37.69±3.82 ^b	4.34	1.71
G3	3.95±0.33 ^b	6.48±0.79 ^{bc}	27.73±3.62 ^c	43.70±6.59 ^a	34.17±4.71 ^{ac}	51.07±6.23 ^c	39.83±4.29 ^c	55.69±5.87 ^c	40.76±4.18 ^c	4.70	1.10
G4	3.83±0.24 ^b	5.10±0.43 ^d	26.31±5.10 ^c	43.86±6.61 ^a	35.28±9.52 ^a	47.32±6.72 ^b	37.73±4.17 ^b	53.39±6.84 ^{bc}	41.41±5.12 ^c	4.51	1.02
G5	5.83±0.29 ^c	9.32±1.38 ^c	26.82±5.21 ^c	41.21±7.74 ^c	35.13±4.89 ^a	52.36±4.82 ^c	42.74±5.64 ^a	54.20±7.25 ^c	44.19±8.74 ^c	4.40	1.51
G6	4.44±0.36 ^{bd}	7.83±1.07 ^{bcc}	24.03±2.49 ^b	40.39±3.94 ^{cd}	32.38±4.77 ^d	42.67±5.91 ^d	35.01±3.59 ^b	52.55±6.28 ^b	40.27±6.53 ^c	4.37	1.32
G7	3.91±0.30 ^b	5.55±0.70 ^{cd}	26.70±2.03 ^c	43.67±7.24 ^a	33.78±5.41 ^{cd}	45.26±6.56 ^b	34.45±4.50 ^b	51.20±7.27 ^b	35.61±3.29 ^b	4.30	0.31
G8	4.99±0.27 ^c	7.42±0.80 ^{bcc}	24.98±3.07 ^b	40.80±7.40 ^c	33.68±7.11 ^{cd}	46.16±4.54 ^b	37.44±3.74 ^b	51.99±9.56 ^b	38.93±7.45 ^{bc}	4.27	0.88
G9	5.21±0.25 ^c	9.23±0.84 ^e	28.53±3.91 ^{cd}	39.80±7.36 ^d	33.25±7.17 ^{cd}	47.98±6.58 ^b	38.67±4.41 ^{bc}	54.45±4.77 ^c	40.96±3.83 ^c	4.48	1.29
G10	4.61±0.30 ^{de}	7.33±0.61 ^{bc}	22.63±3.33 ^b	38.62±8.09 ^{de}	31.57±4.62 ^{cd}	47.46±5.91 ^b	37.85±4.85 ^{bc}	55.51±8.36 ^c	39.38±7.89 ^{bc}	4.63	1.30
G11	5.21±0.28 ^c	8.28±1.09 ^{bc}	25.54±3.77 ^c	43.68±9.07 ^a	36.55±8.94 ^a	46.82±6.20 ^b	40.52±6.51 ^{ac}	51.54±6.37 ^b	41.62±5.60 ^c	4.21	0.85
G12	5.26±0.29 ^c	9.84±0.97 ^{ef}	30.58±3.28 ^{ad}	41.89±7.24 ^{cd}	33.54±7.66 ^{cd}	55.49±7.29 ^a	45.92±5.72 ^d	59.14±6.48 ^d	47.14±7.62 ^d	4.90	2.27
G13	4.94±0.21 ^c	7.51±0.63 ^{bcc}	26.62±2.86 ^c	41.14±6.67 ^{cd}	33.39±6.97 ^{cd}	45.26±5.40 ^b	35.59±4.90 ^b	50.97±6.44 ^{bc}	37.47±5.75 ^b	4.18	0.68
G14	7.01±0.21 ^f	12.07±0.69 ^g	30.63±3.77 ^{ad}	43.86±6.67 ^a	36.60±5.90 ^a	45.57±5.13 ^b	37.25±3.84 ^b	48.43±6.47 ^{ef}	38.60±5.99 ^{bc}	3.77	0.33
G15	5.82±0.25 ^c	10.95±1.60 ^{eg}	29.36±2.63 ^c	36.62±8.09 ^{ef}	28.79±5.82 ^b	56.17±6.72 ^a	46.05±6.12 ^d	58.43±7.25 ^d	48.19±6.89 ^d	4.78	3.23
G16	6.06±0.24 ^{eg}	10.47±0.52 ^e	25.90±3.70 ^c	39.26±6.69 ^d	33.21±6.27 ^{cd}	41.33±4.44 ^d	36.08±3.97 ^b	48.79±4.52 ^e	37.25±4.06 ^b	3.88	0.67
G17	7.07±0.27 ^f	12.29±1.39 ^g	24.66±4.13 ^b	35.05±7.39 ^{bf}	27.59±6.04 ^b	48.86±7.56 ^b	37.08±4.70 ^b	51.92±6.98 ^b	37.73±4.42 ^b	4.08	1.69
G18	6.42±0.37 ^{gh}	11.16±0.71 ^{eg}	25.66±4.13 ^c	42.46±6.15 ^c	33.14±4.38 ^{cd}	45.02±4.36 ^b	35.20±4.41 ^b	49.71±7.94 ^{bf}	37.91±6.09 ^b	3.94	0.79
G19	5.48±0.37 ^c	9.48±0.81 ^e	29.24±4.21 ^d	40.53±7.53 ^{cd}	28.44±6.02 ^b	48.06±5.44 ^b	38.90±4.92 ^{bc}	56.83±5.60 ^{cd}	40.95±4.07 ^c	4.67	2.09
G20	4.90±0.25 ^c	8.82±0.53 ^c	28.42±3.76 ^c	38.85±6.11 ^{df}	31.69±3.74 ^d	49.31±4.87 ^{bc}	37.90±3.45 ^{bc}	51.84±4.37 ^b	42.34±4.18 ^c	4.27	1.78
G21	5.33±0.35 ^c	8.04±0.80 ^{bc}	25.49±3.29 ^c	34.24±5.56 ^b	26.64±6.81 ^b	49.44±5.63 ^{bc}	38.72±4.05 ^{bc}	52.96±6.06 ^{bc}	39.77±6.68 ^{bc}	4.33	2.19
G22	3.99±0.25 ^b	6.06±0.63 ^c	26.74±2.00 ^c	35.53±4.28 ^b	29.71±3.95 ^b	42.44±6.04 ^d	33.55±5.42	49.19±6.10 ^e	37.96±3.91 ^b	4.11	1.38
G23	3.91±0.27 ^b	5.90±0.74 ^{cd}	33.72±7.84 ^a	37.57±7.88 ^c	31.03±6.78 ^{cd}	51.81±10.54 ^c	42.50±10.86 ^a	55.38±9.89 ^c	46.95±9.91 ^d	4.68	2.65
G24	4.92±0.22 ^c	8.01±0.64 ^{bc}	25.79±3.78 ^c	41.18±5.19 ^c	33.57±5.89 ^{cd}	44.04±5.62 ^{de}	37.62±4.67 ^b	51.46±5.59 ^b	42.06±4.96 ^c	4.23	1.42
G25	6.58±0.34 ^h	11.65±1.31 ^{fg}	25.42±2.42 ^c	40.79±6.17 ^{cd}	32.86±5.42 ^{cd}	41.75±3.31 ^d	36.21±4.40 ^b	50.07±5.21 ^b	38.65±4.84 ^{bc}	3.95	0.97
G26	5.99±0.25 ^{ch}	9.15±0.94 ^e	29.77±3.02 ^d	38.94±4.83 ^d	32.30±5.78 ^{cd}	42.46±3.62 ^d	35.28±3.91 ^b	55.96±6.85 ^c	42.14±5.82 ^c	4.54	1.64
G27	4.98±0.25 ^c	7.91±0.47 ^{bc}	24.27±2.91 ^b	37.68±4.33 ^c	32.01±3.41 ^{cd}	42.58±6.11 ^d	36.94±4.50 ^b	45.74±6.34 ^g	38.80±6.56 ^{bc}	3.71	1.13
G28	5.42±0.33 ^c	9.93±2.15 ^{eg}	33.65±2.43 ^a	44.34±8.56 ^a	31.61±7.18 ^{cd}	42.79±6.01 ^d	35.24±4.06 ^b	47.17±6.33 ^{fg}	38.68±5.24 ^{bc}	3.80	1.18
G29	5.98±0.25 ^{ch}	9.66±0.75 ^e	28.08±3.56 ^c	42.86±4.66 ^c	34.24±5.00 ^{ac}	46.37±4.94 ^{bc}	38.26±6.76 ^{bc}	52.11±7.20 ^b	40.02±5.05 ^c	4.19	0.96
G30	6.09±0.21 ^{ch}	10.03±0.57 ^e	25.74±2.25 ^c	37.09±7.32 ^c	28.80±6.95 ^b	51.22±4.79 ^c	42.00±4.72 ^a	57.10±7.16 ^{cd}	41.60±4.48 ^c	4.64	2.13
平均值 average	5.34±1.05 ^c	8.91±2.19 ^c	27.28±3.00 ^c	40.14±3.17 ^{cd}	32.27±2.69 ^d	47.31±4.17 ^b	38.32±3.20 ^{bc}	53.27±4.86 ^{bc}	41.20±4.78 ^c	4.36	1.49
对照组 control	4.89±0.47 ^c	7.66±1.11 ^{bcc}	24.95±2.06 ^b	37.55±4.45 ^c	29.88±3.94 ^b	44.96±3.49 ^{de}	35.50±3.16 ^b	48.67±4.35 ^{ef}	37.22±3.63 ^b	3.98	1.24

注: 同一列中具有不同字母标记的数值之间差异显著($P<0.05$).
Note: values with different superscripts within the same column are significantly different from each other at 0.05 level.

龄所有家系的平均值提高了大约 66.85%, 相比对照组提高 16.32%, 各家系生长趋势基本一致。G1 的壳高最大为 $(14.51 \pm 1.24) \mu\text{m}$, 显著高于其他家系($P < 0.05$)。4 月龄, 所有家系的壳高增长量达到整个稚贝期的最大值, 所有家系的壳高平均值相对于 2 月龄的壳高平均值增长了约 206.17%, 增长十分明显。G1、G12、G14、G23、G28 壳高最大, 彼此差异不明显($P > 0.05$), 但显著高于其他家系($P < 0.05$)。6 月龄同一家系内的壳高与壳长差异均显著($P < 0.05$), 不同家系间的壳高和壳长也有差异。其中, G1 壳高最大, 为 $(44.95 \pm 7.62) \mu\text{m}$, G2 的壳高最小, 为 $(33.60 \pm 4.90) \mu\text{m}$ 。壳长差异表现与壳高差异表现存在不一致性, 6 月龄大部分家系壳长差异不明显($P > 0.05$), 波动较小。9 月龄同一家系内的壳高与壳长差异显著($P < 0.05$), G1、G12、G15 壳高最大, 与其他家系差异显著($P < 0.05$), G12、

G15 壳长最大, 与其他家系差异显著($P < 0.05$)。G16 壳长最小, 为 $(32.83 \pm 3.11) \mu\text{m}$, 与 G22、G25 差异不显著($P > 0.05$), 与其他家系差异显著($P < 0.05$)。12 月龄, G1 壳高和壳长均最大, 分别为 $(72.48 \pm 8.35) \mu\text{m}$ 和 $(60.18 \pm 8.87) \mu\text{m}$, 均显著高于其他家系($P < 0.05$), 其余家系壳高和壳长生长较缓慢, 多数家系的壳高和壳长差异不显著($P > 0.05$)。G1 在整个稚贝阶段均保持很高的生长量, 壳高和壳长以及生长速度均显著高于其他家系和对照组($P < 0.05$), 显示出明显的生长优势。

各家系子代养殖至 1 周年时, 统计子代壳高、壳长、壳宽、ISD、总重、壳重、软体重、出肉率等指标, 将统计数据进行单因素方差分析(ANOVA)和 Tukey 多重比较分析, 壳高、壳长统计结果如表 3 所示, 其余指标结果如表 4 所示。12 月龄时, 所有家系生长性状的平均值均大于对照组, 壳重

表 4 12 月龄不同香港牡蛎家系生长性状比较

Tab. 4 Comparison of growth traits of different *Crassostrea hongkongensis* families at 12 monthsn=30; $\bar{x} \pm \text{SD}$

组别 group	壳宽/mm shell width	ISD/% index of shell depth	总重/g total weight	壳重/g shell weight	软体重/g meat weight	出肉率/% meat ratio
G1	41.03±6.98 ^a	30.59±1.87 ^a	62.63±6.63 ^a	45.01±3.84 ^a	17.62±2.84 ^a	27.98±1.64 ^a
G2	24.68±3.75 ^b	27.49±2.16 ^b	42.76±8.36 ^b	32.50±5.32 ^b	10.26±3.11 ^b	23.51±3.01 ^b
G3	27.59±3.82 ^c	28.50±1.68 ^{bc}	50.44±7.73 ^c	37.28±5.16 ^c	13.16±2.71 ^c	25.83±2.31 ^c
G4	27.11±4.81 ^c	28.44±1.99 ^b	47.40±6.45 ^{cd}	35.40±3.94 ^{cd}	11.99±2.71 ^{bc}	25.03±2.62 ^{cd}
G5	28.05±5.53 ^c	28.35±1.51 ^b	50.72±7.98 ^c	37.84±5.37 ^c	12.88±2.82 ^c	25.18±2.18 ^c
G6	25.80±4.13 ^{bc}	27.70±1.27 ^b	45.26±5.56 ^{de}	34.49±3.74 ^{bde}	10.78±2.04 ^{bd}	23.67±2.08 ^{bd}
G7	24.23±4.01 ^b	27.79±1.66 ^b	47.78±7.71 ^{ef}	36.33±4.92 ^{ce}	11.45±2.99 ^{bc}	23.62±2.79 ^{bd}
G8	25.35±7.02 ^{bc}	27.58±2.20 ^b	46.44±8.79 ^{df}	35.07±5.57 ^{ce}	11.36±3.39 ^{bc}	24.13±2.54 ^{bd}
G9	26.69±2.87 ^c	27.93±1.48 ^b	43.38±6.55 ^{bc}	33.09±4.20 ^{bd}	10.30±2.57 ^b	23.47±2.50 ^b
G10	27.17±6.11 ^c	28.34±2.54 ^b	48.49±7.42 ^{cf}	36.18±4.44 ^{ce}	12.32±3.16 ^{cd}	25.01±3.27 ^{bc}
G11	26.04±4.04 ^{bc}	27.85±1.28 ^b	47.85±7.80 ^{cef}	36.13±5.47 ^{ce}	11.73±2.55 ^{bc}	24.33±2.19 ^{bc}
G12	30.98±4.74 ^d	29.04±1.53 ^d	51.75±6.71 ^c	38.21±4.14 ^c	13.54±2.76 ^c	25.93±2.40 ^c
G13	24.72±3.38 ^b	27.90±1.17 ^b	44.33±6.51 ^{bc}	33.74±4.32 ^{bd}	10.59±2.39 ^b	23.68±2.25 ^{bd}
G14	23.53±4.70 ^{bc}	26.83±2.45 ^{bc}	44.86±9.47 ^{bc}	34.38±6.19 ^{bd}	10.48±3.43 ^b	22.91±2.87 ^{bc}
G15	30.66±4.91 ^d	28.63±1.62 ^{cd}	51.68±8.93 ^c	38.52±5.99 ^c	13.15±3.13 ^c	25.17±2.30 ^c
G16	23.56±2.68 ^b	27.32±1.37 ^{bf}	41.33±6.07 ^b	31.64±4.45 ^b	9.69±1.78 ^b	23.36±1.64 ^b
G17	24.93±4.61 ^b	27.63±2.32 ^b	42.54±8.52 ^b	32.32±5.54 ^b	10.22±3.09 ^b	23.58±2.77 ^b
G18	23.92±4.78 ^b	27.09±2.10 ^b	44.27±6.30 ^{bc}	33.94±3.98 ^{bd}	10.33±2.53 ^b	23.07±2.49 ^b
G19	28.07±3.78 ^{cd}	28.62±1.64 ^{cd}	49.92±5.31 ^c	37.08±3.23 ^c	12.83±2.25 ^{cd}	25.55±2.09 ^c
G20	25.81±3.00 ^{bc}	27.36±1.26 ^b	44.74±6.76 ^{bc}	34.26±4.71 ^{bd}	10.48±2.20 ^b	23.25±1.93 ^b
G21	25.93±4.35 ^{bc}	27.82±1.62 ^b	44.75±6.85 ^{bc}	33.99±4.79 ^{bd}	10.76±2.38 ^b	23.87±2.54 ^{bd}
G22	23.44±3.77 ^b	26.74±2.32 ^{bf}	40.03±4.79 ^b	31.08±3.37 ^b	8.96±1.74 ^b	22.23±2.58 ^b

(待续 to be continued)

(续表 4 Tab. 4 continued)

组别 group	壳宽/mm shell width	ISD/% index of shell depth	总重/g total weight	壳重/g shell weight	软体重/g meat weight	出肉率/% meat ratio
G23	29.17±7.76 ^{cd}	28.17±2.04 ^{bd}	47.83±10.81 ^{cef}	35.90±7.04 ^{ce}	11.93±3.92 ^{bc}	24.43±2.98 ^{bc}
G24	25.82±3.64 ^{bc}	27.52±1.30 ^b	43.87±5.07 ^{bc}	33.48±3.67 ^{bd}	10.39±1.64 ^b	23.62±1.86 ^{bd}
G25	24.18±3.18 ^b	27.19±1.53 ^{bf}	42.81±5.66 ^b	32.73±3.85 ^b	10.09±2.04 ^b	23.40±2.20 ^b
G26	28.00±4.02 ^c	28.46±1.51 ^{bd}	45.66±7.81 ^{df}	34.20±4.92 ^{bd}	11.46±2.97 ^{bc}	24.75±2.39 ^{bc}
G27	21.99±4.06 ^c	25.90±1.51 ^c	40.39±5.67 ^b	31.54±3.94 ^b	8.85±1.92 ^b	21.73±2.12 ^c
G28	22.67±4.44 ^{bc}	26.22±2.16 ^{ef}	43.33±6.41 ^{bc}	33.63±4.13 ^{bd}	9.70±2.47 ^b	22.13±2.49 ^b
G29	25.77±4.09 ^{bc}	27.86±1.67 ^b	46.86±6.20 ^{df}	35.49±3.79 ^{ce}	11.37±2.57 ^{bc}	24.02±2.45 ^{bd}
G30	28.52±4.45 ^{cd}	28.26±1.82 ^{bd}	50.47±7.45 ^c	37.49±4.76 ^c	12.98±2.99 ^{cd}	25.46±2.85 ^c
average	26.51±5.67 ^c	27.85±1.96 ^b	46.49±8.30 ^{df}	35.10±5.34 ^{ce}	11.39±3.13 ^{bc}	24.13±2.70 ^{bd}
control	20.39±1.62 ^f	23.69±0.95 ^g	43.17±5.47 ^{bc}	33.84±4.20 ^{bd}	9.33±1.46 ^b	21.58±1.46 ^c

注：同一列中具有不同字母标记的数值之间差异显著($P<0.05$)。
Note: Values with different superscripts within the same column are significantly different from each other at 0.05 level.

差异不显著($P>0.05$), 其他性状差异显著($P<0.05$), 各生长性状平均值相比对照组提高 3.72%~30.01%, 其中壳宽提高率最大。所有家系的壳宽、ISD、出肉率均高于对照组, 其中壳宽、ISD 均显著高于对照组($P<0.05$)。G1 各项生长性状均显著大于其他家系和平均值以及对照组($P<0.05$), 生长优势明显, 其他家系各性状间差异性波动较小, 多数家系差异不显著($P>0.05$)。G3、G10、G12、G15、G19、G23、G26 的各项生长指标差异不显著($P>0.05$), 生长性能仅次于 G1, 但高于其他大部分家系和对照组, 表明也具有一定的生长优势。

2.4 12 月龄各性状的相关性分析

对深凹壳型香港牡蛎家系在 12 月龄的生长

性状进行相关性分析, 结果如表 5 所示。各性状之间均为正相关, 相关性均达到极显著程度($P<0.01$), 但大小存在差异。壳高、壳长与壳宽的相关性均最大, 分别为 0.956 和 0.841, 壳长与 ISD、总重、壳重、软体重、出肉率相关性均比较小。总重、壳重、软体重之间的相关性极大, 相关性分别为 0.988、0.965、0.912。ISD 与壳高、壳宽、出肉率相关性较大, 与出肉率相关性最大, 为 0.894。出肉率与 ISD、软体重相关性最大, 分别为 0.894 和 0.897。

2.5 稚贝期存活率的比较

整个稚贝期, 各家系子代平均存活率均高于对照组, 但差异不显著($P>0.05$, 图 2 和图 3)。所

表 5 12 月龄深凹壳型香港牡蛎家系生长性状的相关性分析
Tab. 5 Correlation analysis of growth traits of the deep-cupped shell shape *Crassostrea hongkongensis* families at 12 months
n=600

性状 trait	壳高 shell height	壳长 shell length	壳宽 shell width	ISD index of shell depth	总重 total weight	壳重 shell weight	软体重 meat weight	出肉率 meat ratio
壳高 shell height	1	0.701**	0.956**	0.826**	0.638**	0.547**	0.759**	0.790**
壳长 shell length		1	0.841**	0.482**	0.470**	0.423**	0.526**	0.482**
壳宽 shell width			1	0.842**	0.666**	0.577**	0.781**	0.798**
ISD index of shell depth				1	0.647**	0.545**	0.785**	0.894**
总重 total weight					1	0.988**	0.965**	0.760**
壳重 shell weight						1	0.912**	0.655**
软体重 meat weight							1	0.897**
出肉率 meat ratio								1

注: * 表示相关性显著($P<0.05$); **表示相关性极显著($P<0.01$)。
Note: * means significant correlation ($P<0.05$); ** means extremely significant correlation ($P<0.01$).

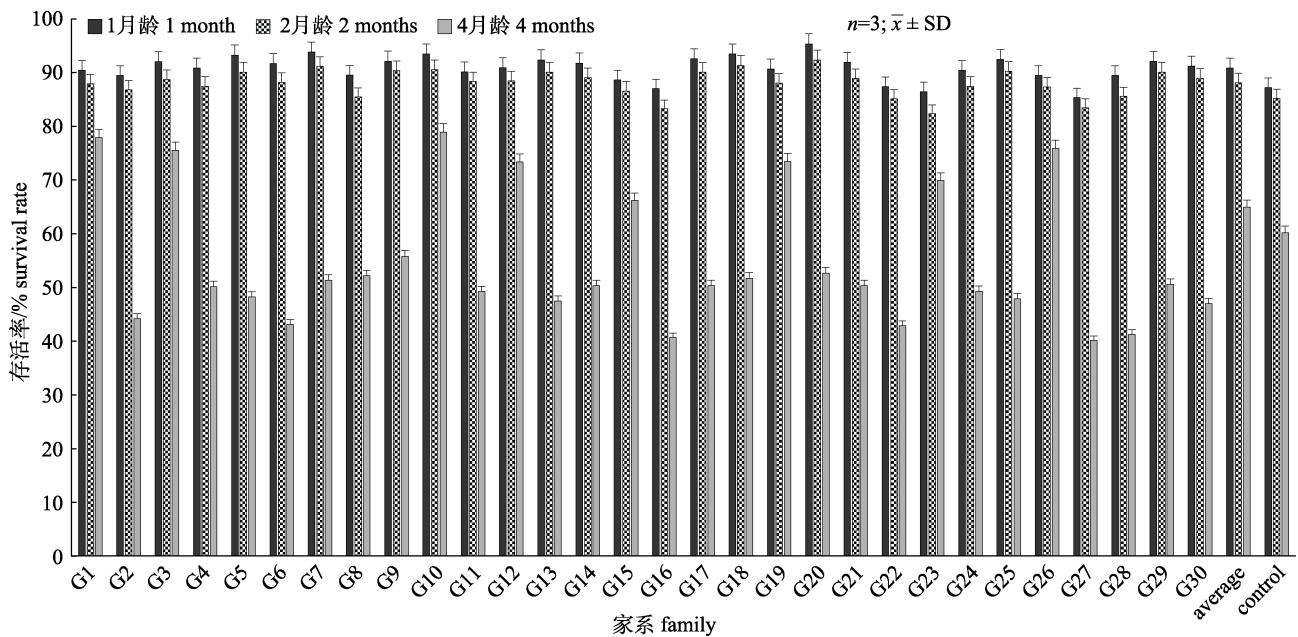


图 2 深凹壳型香港牡蛎 1 月龄到 4 月龄不同家系存活率的比较

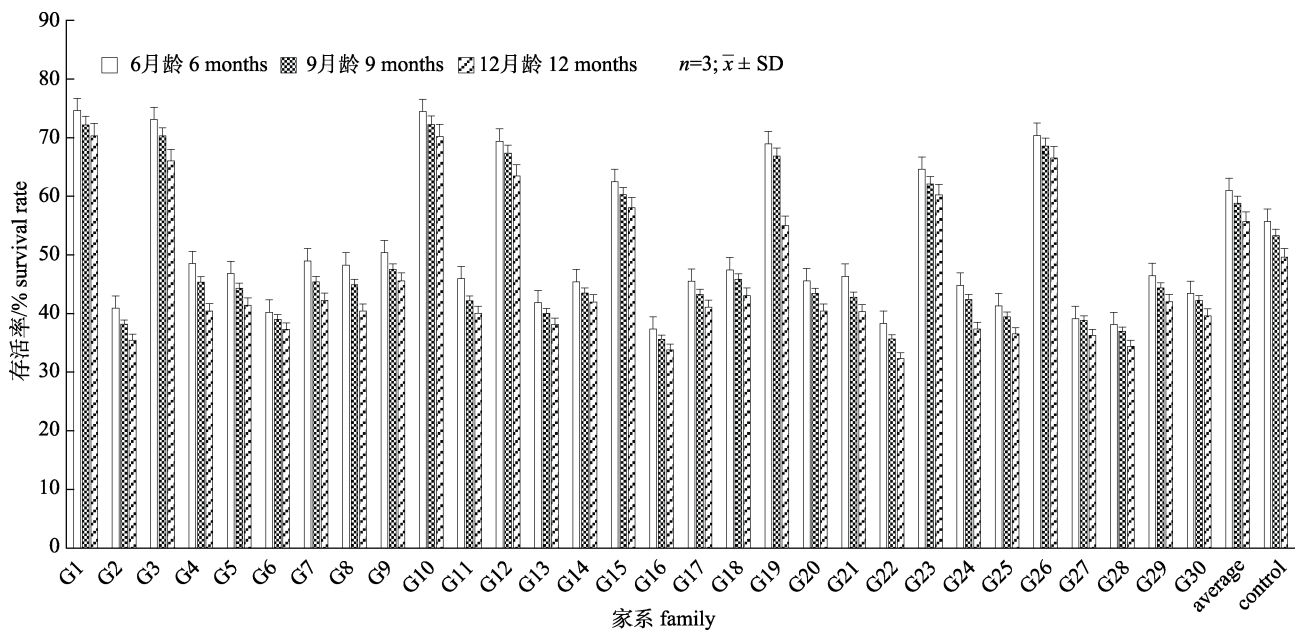
Fig. 2 Comparison of survival rate among different deep-cupped shell shape *Crassostrea hongkongensis* families from 1 to 4 months

图 3 深凹壳型香港牡蛎 6 月龄到 12 月龄不同家系存活率的比较

Fig. 3 Comparison of survival rate among different deep-cupped shell shape *Crassostrea hongkongensis* families from 6 to 12 months

有家系在 1 月龄和 2 月龄均保持较高的存活率, 波动较小, 差异不显著($P>0.05$)。4 月龄时, 所有家系的存活率均出现了明显的下降, 所有家系存活率的平均值相对于 1 月龄所有家系的存活率平均值下降幅度约为 28.53%, 原因可能与海区的盐

度增大和附着物增多有关。G1、G3、G10、G12、G15、G19、G23、G26 存活率差异不显著($P>0.05$), 其存活率也出现明显的下降, 但下降幅度明显小于其他家系, 保持较高的存活率, 与其他家系差异显著($P<0.05$)。4 月龄后, 各家系存活率逐渐下

降,下降幅度较小,存活率波动较小,存活率下降幅度差异不明显,可能与稚贝适应海区环境和生长环境趋于适宜和稳定有关。12 月龄所有家系存活率平均值相比对照组提高 12.25%。整个稚贝生长阶段, G1、G3、G10、G12、G15、G19、G23、G26 均保持较高的存活率,4 月龄至 12 月龄的存活率均显著大于其他家系和对照组($P<0.05$),显示出较明显的存活优势。

3 讨论

3.1 深凹壳型香港牡蛎家系生长性状比较

牡蛎怀卵量大,性成熟较快,繁殖周期相对较短,人工授精操作简便,能相对快速地进行多代选育;同时牡蛎也具备多个可供选育的性状,如壳高、壳长、壳宽、总重、软体重等,是良好的育种材料^[14-15]。本研究以广东省台山镇海湾香港牡蛎野生群体为基础群体,采用壳型指数 D 作为亲本选择指标,利用家系选育技术构建了第一代深凹壳型香港牡蛎家系,比较了深凹壳型香港牡蛎家系在幼虫期和稚贝期的生长状况,结果显示深凹壳型香港牡蛎家系在幼虫期的不同日龄,不同家系壳高增长量在不同日龄表现出不一致性,生长速度也存在不一致性;在稚贝期,不同家系的生长情况也存在着较大的差异,同时与对照组相比生长性状均获得了较大的遗传改良效果。

Nilsson-Ehle 多基因假说指出:决定数量性状的是一系列微效基因,没有显隐性区别,这些微效基因对某种性状的作用是相同的,数量性状在遗传与环境的内外因素综合作用下,表现为连续变异^[16]。牡蛎家系子代生长的表型值是个体的基因型与其生长、发育所处的环境共同作用的结果。在环境方面,主要受到水环境因子和密度影响,在本实验中如饵料、水温、盐度、光照、培育密度等。实验发现,不同家系子代在不同时期生长性状仍然表现出一定的差异,如幼虫期 G17 和 G20,两个家系在 6~9 d 和 9~12 d 的平均壳高增长量差异显著,其他家系的不同时期的生长速率也存在类似的差异,同时在本实验中各家系的培育环境基本一致,并且通过定期调整密度,使密度基本保持一致,已最大限度地减少环境的影响,

表明这种差异主要由于遗传因素引起,控制生长性状的微效基因的差异使遗传基因在子代不同时期表现不同,研究结果与其他学者在虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*)^[17-18]、缢蛏 (*Sinonovacula constricta*)^[19]、太平洋牡蛎 (*Crassostrea gigas*)^[20] 等贝类研究结果相似。本研究发现,整个生长阶段,所有家系的平均壳高、平均壳长以及生长速度均高于对照组。特别是在 12 月龄时,所有家系壳高、壳长、壳宽、总重、软体重、出肉率、壳型指数 D 的平均值均显著大于对照组,各生长性状平均值相比对照组提高 3.72%~30.01%,其中 ISD 提高了 17.56%,壳宽提高了 30.01%。同时所有家系的壳宽、ISD、出肉率均高于对照组,其中壳宽、ISD 均显著高于对照组($P<0.05$),显示出良好的生长优势和遗传改良潜力,通过进行连续多代的家系选育,可望逐渐筛选出生长性状优良的深凹壳型香港牡蛎新品系。深凹壳型香港牡蛎家系子代养殖于自然海区时,海区环境因素也可能影响子代的生长,但在不同时期始终存在生长优势比较明显的家系,如 G8 家系在幼虫期的生长速度显著大于其他家系, G1 家系在整个稚贝期都表现出明显的生长优势。不同家系子代在不同时期生长性状存在较大的差异,说明在深凹壳型香港牡蛎不同家系中存在较大的遗传变异,蕴含着丰富的基因型,可以进一步进行家系内交配,进一步纯化生长的数量性状基因,稳定其优良的基因型,同时适时筛选并保留生长性状优良的家系,淘汰生长劣势个体,以培育出生长性状优良的新品种。

3.2 家系子代相关性分析

选择合适的目标性状进行选育十分重要, Evans 等^[21]的 12 个太平洋牡蛎同胞家系实验表明,单独以软体重为选择指标导致了选育后代低产,也就是说软体重对于太平洋牡蛎高产选育或许不是理想选择指标,有时甚至因为不同性状之间不一定呈完全正相关关系,容易导致其他生长性状的负选择效应。相对于牡蛎的其他性状,凹壳性状可以视为一种综合选育性状,因为根据 ISD 计算方法,凹壳性状与牡蛎壳高、壳长、壳宽都有密切的关系,一定程度上由这 3 个指数的值大小决

定, 而壳高、壳长、壳宽等性状是衡量牡蛎生长的重要性状指标。本研究中, 无论是幼虫期和稚贝期, 各家系的生长相关指标相比于对照组均有较大的提高, 如稚贝期各家系平均壳高相比对照组提高 5.23%~16.32%, 壳长提高 7.94%~10.69%, 12 月龄各家系生长性状平均值相比对照组提高 3.72%~30.01%, 这说明凹壳性状的选育与生长速度在遗传机制上具有一定共性, 在表型上可体现出良好的协同进化性能。通过生长速度和壳型选育获得的太平洋牡蛎‘海大 1 号’^[8]和美洲牡蛎(*C. virginica*) ‘Wilde strain’品系^[7], 也证实了牡蛎的壳型和生长速度这两组不同性状存在内在的紧密联系。本研究对 12 月龄的家系子代进行遗传相关性分析后发现, 各性状之间均达到极显著正相关, 相关性大小存在差异, 说明对某一性状的直接选择可间接影响其他某一个或几个性状的选择。其中, 壳高与壳宽、ISD 的相关性均最大, 表明对壳高进行直接选育, 最有利于对壳宽、ISD 的间接选育。壳宽与壳高、壳长、ISD、出肉率相关性较大, 表明对壳宽进行直接选育, 可显著影响壳高、壳 SD、出肉率等性状的间接选育。ISD 与壳高、壳宽、出肉率相关性较大, 与出肉率相关性最大, 表明在所有生长性状中 ISD 与出肉率相关密切程度最高, ISD 对出肉率的贡献最大, 对 ISD 进行直接选育, 最有利于出肉率的间接选育, 可带来巨大的经济价值。这说明通过可量化的壳型指数进行壳凹性状的选育, 在众多产业经济性能指标上, 出肉率改良效果有望最显著, 其次是壳高和壳宽, 这结果也与华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis*)^[22]和太平洋牡蛎^[23-24]的数量性状遗传相关性研究结果一致。综合 1 年的选育结果分析, 凹壳性状是一个具有选育价值的综合选育性状, 与其他传统的数量选育性状类似, 具有可持续选育潜力、通过优秀基因的聚合获得选育效应累积育种特征。因此, 通过壳型指数的选择不仅能获得壳型好看(深凹壳型)的牡蛎, 而且能获得生长优良、出肉率高的香港牡蛎新品系。

3.3 深凹壳型香港牡蛎家系存活性能比较

子代的存活性状也是生物遗传育种的一个重要指标, 反映了对生存环境的适应能力。子代的

存活性状主要体现在抗病能力和抗逆能力上, 存活率高的个体说明其具有优良的抗病能力和抗逆能力, 可作为进一步选育的材料。国内外学者对牡蛎子代的存活性能也有较深入的研究, Dégremont 等^[25]在夏季高温时期建立了 43 个太平洋牡蛎全同胞家系, 以研究高温对子代存活率的影响, 结果表明不同家系抗高温性状遗传差异较大, 各家系在高温季节存活率不一致, 经过家系逐代筛选, 太平洋牡蛎在高温季节存活率可以得到改良。王雪磊等^[26]比较了壳金太平洋牡蛎自交家系和杂交家系子代幼虫期和稚贝期的存活性能, 发现大多数杂交组表现出较明显的杂交优势, 其不同生长时期均表现出较高的存活性能, 可利用杂种优势提高牡蛎的存活率。本研究发现深凹壳型香港牡蛎家系在幼虫期和稚贝期的存活率随着日龄增长而逐渐下降, 最后趋于稳定, 绝大多数家系在整个幼虫阶段均维持较高的存活率, 差异不明显, 说明各家系在幼虫期存活性能的遗传差异较小, 可能与幼虫期间养殖环境相对稳定有关。幼虫培育期间水质和饵料均能维持在一个适宜生长的状态, 家系幼虫受到外界环境影响较小。但在稚贝期时, 不同家系间存活率在同一时期存在较大差异, 此时各家系养殖于野外海区, 外界环境影响较大, 不同家系抗病能力和抗逆能力便表现出明显的差异。在稚贝期, G1、G3、G10、G12、G15、G19、G23、G26 始终保持着很高的存活率, 高于其他家系和对照组, 显示出较高的存活优势, 后期可作为进一步选育的材料。本研究发现, 深凹壳型香港牡蛎不同家系间的存活性状具有较明显的遗传差异, 具有进一步选育的潜力, 经过家系的逐代选育有望获得抗逆性强、存活率高的新品系。深凹壳型香港牡蛎家系在幼虫期和稚贝期的存活率的不一致性, 可能与亲本遗传基因在子代不同时期的表达不同有关, 也可能是幼虫期和稚贝期不同的养殖环境所致, 后期可加强子代在不同养殖环境下存活率的选育工作。

综上所述, 本研究建立了 30 个深凹壳型香港牡蛎家系, 经过 1 周年的养殖并比较家系子代的生长和存活性能。在生长性状方面, 幼虫期和稚贝期的家系生长性状的平均值均高于对照组, 其

中生长速度相比对照组提高 7.86%~20.16%, 12 月龄各家系生长性状平均值相比对照组提高 3.72%~30.01%, ISD 也有 17.56% 的增长量, 其中 G1 各项性状均显著高于其他家系和对照组, G3、G10、G12、G15、G19、G23、G26 各项性状也高于其他大部分家系和对照组。在存活性能方面, 幼虫期和稚贝期各家系的平均存活率均高于对照组, 幼虫期大多数家系均维持较高的存活率且差异不明显, 稚贝期 G1、G3、G10、G12、G15、G19、G23、G26 始终保持着较高的存活率。因此 G1、G3、G10、G12、G15、G19、G23、G26 可作为后期培育生长性能优良的深凹壳型香港牡蛎新品系的育种材料。本研究为我国华南地区培育出深凹壳型、生长性能良好的香港牡蛎优良品种提供了理论基础和数据材料。

参考文献:

- [1] Bureson E M, Andrews J D. Unusual intensification of Chesapeake Bay oyster diseases during recent drought conditions[C]//Proceedings of the Conference on a Partnership of Marine Interests. IEEE, 1988: 799-802.
- [2] Ragone Calvo L M, Calvo G W, Bureson E M. Dual disease resistance in a selectively bred eastern oyster, *Crassostrea virginica*, strain tested in Chesapeake Bay[J]. Aquaculture, 2003, 220(1-4): 69-87.
- [3] Nell J A, Hand R E. Evaluation of the progeny of second-generation Sydney rock oyster *Saccostrea glomerata* (Gould, 1850) breeding lines for resistance to QX disease *Marteilia sydneyi*[J]. Aquaculture, 2003, 228(1-4): 27-35.
- [4] Nell J A, Perkins B. Evaluation of the progeny of third-generation Sydney rock oyster *Saccostrea glomerata* (Gould, 1850) breeding lines for resistance to QX disease *Marteilia sydneyi* and winter mortality *Bonamia roughleyi*[J]. Aquaculture Research, 2006, 37(7): 693-700.
- [5] Dove M C, Nell J A, Mcorrie S, et al. Assessment of QX and winter mortality disease resistance of mass selected Sydney rock oysters *Saccostrea glomerata* (Gould, 1850), in the Hawkesbury River and Merimbula Lake, NSW Australia[J]. Journal of Shellfish Research, 2013, 32(3): 681-687.
- [6] Dove M C, Nell J A, O'Connor W A. Evaluation of the progeny of the fourth-generation Sydney rock oyster *Saccostrea glomerata* (Gould, 1850) breeding lines for resistance to QX disease (*Marteilia sydneyi*) and winter mortality (*Bonamia roughleyi*)[J]. Aquaculture Research, 2013, 44(11): 1791-1800.
- [7] Allen S K, Gaffney P M, Ewart J W. Genetic improvement of the Eastern oyster for growth and disease resistance in the Northeast NRAC fact sheet No.210[R]. College Park: Northeastern Regional Aquaculture Center, 1993: 2.
- [8] Li Q, Yu R H, Kong L F, et al. "Ocean University of China No. 1" of *Crassostrea gigas*[J]. China Fisheries, 2014(9): 35-41. [李琪, 于瑞海, 孔令峰, 等. 长牡蛎“海大 1 号”[J]. 中国水产, 2014(9): 35-41.]
- [9] Li Q, Yu R H, Kong L F, et al. "Ocean University of China No. 2" of *Crassostrea gigas*[J]. China Fisheries, 2018(6): 84-92. [李琪, 于瑞海, 孔令峰, 等. 长牡蛎“海大 2 号”[J]. 中国水产, 2018(6): 84-92.]
- [10] Yu Z N, Zhang Y H, Zhang Y, et al. A new aquaculture variety of oyster "South China No. 1"[J]. China Fisheries, 2017(2): 86-89. [喻子牛, 张跃环, 张杨, 等. 水产养殖新品种牡蛎“华南 1 号”[J]. 中国水产, 2017(2): 86-89.]
- [11] Zeng Z N, Ning Y, Qi J F, et al. "Golden oyster No. 1" of *Crassostrea angulata*[J]. China Fisheries, 2018(3): 67-71. [曾志南, 宁岳, 祁剑飞, 等. 葡萄牙牡蛎“金蛎 1 号”[J]. 中国水产, 2018(3): 67-71.]
- [12] Bureau of Fisheries and Fisheries 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, 2018. [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, 2018.]
- [13] Imai T, Seiichi S. Study of breeding of Japanese oyster, *Crassostrea gigas*[J]. Tohoku Journal of Agricultural Research, 1961, 12(2): 125-171.
- [14] Wang R C, Wang Z P, Zhang J Z. Science in Marine Shellfish Culture[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1998. [王如才, 王昭萍, 张建中. 海水贝类养殖学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1998.]
- [15] Newkirk G F, Haley L E. Progress in selection for growth rate in the European oyster *Ostrea edulis*[J]. Marine Ecology Progress Series, 1982, 10: 77-79.
- [16] Sheng Z L, Chen Y S. Quantitative Genetics[M]. Beijing: Science Press, 2001. [盛志廉, 陈瑶生. 数量遗传学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [17] Zhang C S, Yang X G, Song J, et al. Establishment of families and their early growth of Japanese scallop (*Patinopecten yessoensis*)[J]. South China Fisheries Science, 2008, 4(5): 1791-1800.

- 45-50. [张存善, 杨小刚, 宋坚, 等. 虾夷扇贝家系的建立及不同家系的早期生长研究[J]. 南方水产科学, 2008, 4(5): 45-50.]
- [18] Liang J, Zhang G F, Zheng H P. Divergent selection and realized heritability for growth in the Japanese scallop, *Patinopecten yessoensis* Jay[J]. Aquaculture Research, 2010, 41(9): 1315-1321.
- [19] Du W J, Wang C D, Wang J, et al. Comparison of early growth in *Sinonovacula constricta* selection group and family[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(4): 603-611. [杜文俊, 王成东, 王杰, 等. 缢蛏选优群体和全同胞家系早期生长性能的比较[J]. 水产学报, 2016, 40(4): 603-611.]
- [20] 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. [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.]
- [21] Evans S, Langdon C. Direct and indirect responses to selection on individual body weight in the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Aquaculture, 2006, 261(2): 546-555.
- [22] Zheng H P, Sun Z W, Zhang T, et al. Correlation and path analysis to quantitative traits of noble scallop *Chlamys nobilis* reeve at one-year old[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(20): 322-326. [郑怀平, 孙泽伟, 张涛, 等. 华贵栉孔扇贝 1 龄贝数量性状的相关性及通径分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 322-326.]
- [23] 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. [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.]
- [24] Xing D, Li Q, Zhang J X. Estimates of genetic parameters for growth and shell color traits in the white-shell strain of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(1): 26-33. [邢德, 李琪, 张景晓. 壳白长牡蛎品系生长和壳色性状遗传参数估计[J]. 中国水产科学, 2018, 25(1): 26-33.]
- [25] 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.
- [26] Wang X L, Li Q, Kong L F, et al. Comparison of growth and survival of the hybrid and inbred families in the golden shell color strain of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(6): 1358-1367. [王雪磊, 李琪, 孔令锋, 等. 壳金长牡蛎自交和杂交家系生长与存活比较[J]. 中国水产科学, 2016, 23(6): 1358-1367.]

Comparison of growth and survival traits among different deep-cupped shell shape families of *Crassostrea hongkongensis*

MO Riguan^{1,2}, XIAO Shu¹, QIN Yanping^{1,2}, ZHANG Yuehuan¹, MA Haitao¹, YU Ziniu¹

1. Key Laboratory of Tropical Marine Biological Resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences; Guangdong Key Laboratory of Applied Marine Biology, Guangzhou 510301, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: *Crassostrea hongkongensis* is mainly distributed and cultured in the brackish waters of the south China coast. *Crassostrea hongkongensis* retains obvious local characteristics and is the most important oyster culture species on the southern coast of China. The color of the soft body is milky white, and has the advantages of individual hypertrophy, rapid growth, high yield, excellent taste, and high market value. As an important morphological trait of oyster, shell type is one of the targets of oyster breeding; the shell shape is more attractive to consumers, and if it is related to meat yield, it can increase the oyster's commodity value and present a greater economic benefit. At present, no studies have reported the breeding of oyster shell traits in *C. hongkongensis*. The aim of this study was to cultivate varieties with fast growth, high quality, and strong resistance, and to promote the stable, healthy, efficient, and sustainable development of the oyster farming industry of *C. hongkongensis*. In order to create a new strain of *C. hongkongensis* with a deep-cupped shell shape and improved growth traits, a breeding program of family selection was initiated based on the wild population of this species in Taishan Town, Guangdong Province. The shell depth index was used as an indicator, and 30 full-sib families and one control group were established using a nested design method with shell type and growth being the major breeding objectives. The growth and survival performance of each family and control group were evaluated in the larval and juvenile stages. The results showed that the average growth traits and survival rates of each family were higher than those of the control group during the whole growth period. In the larval stage, the average shell height, growth rate, and survival rate of all families were higher than those of the control group. The average shell height of all families was higher than that of the control group by 3.78%–7.73%, the growth rate increased by 7.86%, and the survival rate increased by 2.85%–7.32%. In the juvenile stage, the average values of shell height, shell length, growth rate, and survival rate of all families were higher than that of the control group, shell height increased by 5.23%–16.32%, shell length increased by 7.94%–10.69%, growth rate increased by 9.55%–20.16%, and the survival rate increased by 3.45%–12.25%. The growth traits and survival performance of different families also differed markedly in different stages. The average growth traits, growth rate, and survival rate of G1 were significantly higher than those of all family and control groups in the whole juvenile stage. The shell height, shell length, shell width, index of shell depth, total weight, shell weight, meat weight, and survival rate of the G1 family compared with the average of all families increased by 9.83%–54.75%, which was higher than the average of the control group, with 23.34%–80.77% at 12 months. At the same time, G3, G10, G12, G15, G19, G23, and G26 also presented greater growth and survival advantages during the juvenile stage. Studies have shown that breeding populations of *C. hongkongensis* families with a deep-cupped shell shape have great advantages in terms of growth traits and survival performance. G1, G3, G10, G12, G15, G19, and G23 can be used as breeding materials for the late development of deep-cupped shells of *C. hongkongensis* with excellent growth performance. This study provides a theoretical basis and useful practical materials for the cultivation of a new strain of *C. hongkongensis* with a deep-cupped shell shape and excellent growth traits.

Key words: *Crassostrea hongkongensis*; deep-cupped shell shape; index of shell depth; family; growth; survival

Corresponding author: YU Ziniu. E-mail: carlzyu@scsio.ac.cn