

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16297

中间球海胆与马粪海胆杂交家系早期生长比较和亲本配合力估计

张伟杰, 韩奋杰, 陈顺, 刘奎, 周秘, 王宝锋, 王中, 刘明泰, 湛珏珏, 经晨晨,
常亚青

大连海洋大学, 农业部北方海水增养殖重点实验室, 辽宁 大连 116023

摘要: 为比较中间球海胆(*Strongylocentrotus intermedius*)与马粪海胆(*Hemicentrotus pulcherrimus*)杂交家系间的生长差异, 评估杂交家系亲本在体重上的配合力, 构建了种间杂交家系共 42 个。采用动物模型、约束性最大似然法(REML)和最佳线性无偏预测(BLUP)等方法估计了杂交海胆 250、295 和 340 日龄体重的育种值, 以及各亲本的一般配合力(GCA)和各亲本组合的特殊配合力(SCA)。采用方差分析方法, 比较了体重表型值和育种值在杂交家系间的差异。结果表明, 3 个生长阶段杂交家系间体重的表型值和育种值差异均达到极显著水平($P < 0.01$), 体重育种值在家系间的差异大于表型值, 在 50%家系留种率下, 育种值选择和表型值选择的家系相同率介于 88.89%~94.44%, 育种值选择具有 0.93%~4.83%的选择效率优势; 250、295 和 340 日龄各父本的一般配合力分别介于-0.22~0.33, -0.31~0.41 和-0.29~0.31, 各母本的一般配合力分别介于-0.24~0.33, -0.31~0.41 和-0.28~0.28, 各父母本组合的特殊配合力分别介于-0.07~0.09, -0.10~0.13 和-0.32~0.32, M5、M6 和 M17 等父本的一般配合力始终较高, F9、F11 和 F19 等母本的一般配合力始终较高, M5F9 和 M6F11 等杂交组合的特殊配合力始终较高。

关键词: 中间球海胆; 马粪海胆; 杂交; 家系; 生长; 配合力

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)05-1035-10

家系选择是水产动物中常用的选择育种方法, 其显著特点是育种群体由一定数量的全同胞或半同胞家系构成。为了提高育种群体的遗传变异水平, 在许多水产动物如大西洋鲑(*Salmon salar*)^[1]、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[1]、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[2]、凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[3]等育种基础群家系的构建往往采用地理群体杂交的方法, 而少数水产种类如紫扇贝(*Argopecten purpuratus*)和海湾扇贝(*A. irradians irradians*)^[4]、香港巨牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)与长牡蛎(*C. gigas*)^[5]等则采用种间杂交的方法建立杂交家系。种间杂交有利于促进种间及以上亲缘关系的基因交流, 通过有利基因的引入创造出前所未有的新变异种类^[6]。在海胆中, 家系选育群体的家系构建均采用种内自繁方式^[7-10], 虽

然海胆远缘杂交的可行性已在多个经济种类两两之间得到证实^[11-14], 但目前尚无研究报道以远缘杂交的方式构建杂交家系育种群体。

目标性状的表型值测定以及家系间比较作为家系选择工作的又一重要环节, 在许多水产动物中得到广泛研究^[15-19], 表型值的家系间比较结果可作为家系选择的依据。而近年来, 有较多水产动物育种研究表明, 育种值选择的准确性明显高于表型值选择^[20-24], 因此, 目标性状育种值的家系间比较结果可能更适于作为家系选择的依据。在海胆研究中, 常亚青等^[25]、王海峰等^[26]、Zhang 等^[27]、Chang 等^[28]对中间球海胆(*Strongylocentrotus intermedius*)家系间的生长、性腺品质和耐热等性状的表型差异进行了比较, 而关于性状育种值在海胆家系间比较的研究尚未见报道。

收稿日期: 2016-10-08; 修订日期: 2016-11-29.

基金项目: 农业部农业科研杰出人才及创新团队项目; 辽宁省农业攻关及成果产业化项目(2015203003).

作者简介: 张伟杰(1984-), 男, 实验师, 从事棘皮动物遗传育种研究. E-mail: zhangweijie@dlou.edu.cn

通信作者: 常亚青(1967-), 男, 教授. E-mail: yqchang@dlou.edu.cn

本研究以中间球海胆和马粪海胆(*Hemicentrotus pulcherrimus*)为亲本,采用种间杂交的方法构建杂交家系育种群体,对杂交家系间体重的表型值差异和育种值差异进行比较,并进一步估计了杂交亲本的一般配合力和各亲本组合的特殊配合力,以期为中间球海胆和马粪海胆种间杂交群体的家系选择和杂种优势利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 亲本来源与家系构建

中间球海胆亲胆来自于大连海洋大学农业部北方海水增养殖重点实验室人工繁育群体,其中雄性亲本 19 个,雌性亲本 4 个。马粪海胆亲本采捕于大连塔河湾海域,其中雄性亲本 4 个,雌性亲本 38 个。采用注射氯化钾溶液的方式进行催产,获得精卵,家系构建类型及数量见表 1。其中马粪海胆♀×中间球海胆♂类型家系按照 1:2 的雄雌比例构建,中间球海胆♀×马粪海胆♂类型家系按照 1:1 的雄雌比例构建。将各家系受精卵分别置于 0.4 m×0.5 m×0.3 m 的长方形孵化槽内进行孵化,水温 15.0~16.0℃。

表 1 杂交家系种类、数量及家系存活数量
Tab. 1 Hybrid species, family number and survival family number

家系数量 family number	杂交家系种类 hybrid family	
	马粪海胆(<i>H. pulcherrimus</i> , ♀)×中间球海胆(<i>S. intermedius</i> , ♂)	中间球海胆(<i>S. intermedius</i> , ♀)×马粪海胆(<i>H. pulcherrimus</i> , ♂)
构建家系 family produced	38	4
250 天存活家系 surviving at 250 d	34	4
295 天存活家系 surviving at 295 d	33	3
340 天存活家系 surviving at 340 d	33	3

1.2 家系培育与养殖

幼体孵出后,捞取幼体至 0.5 m×0.7 m×0.6 m 的长方形培育槽内进行培育。浮游幼体培育期间,水温 15.0~18.9℃,盐度 30.1~32.8,光照强度低于 500 lx,培育密度为 0.2~0.5 ind/mL。每日换水 1 次,每次换水量为培育水体的 1/2。投喂饵料为鲜活的牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*),日投喂量

为 $1.0\times10^4\sim3.0\times10^4$ cell/mL。至八腕幼体后期,投放附有底栖硅藻的聚乙烯波纹板附着基,使浮游幼体变态为稚海胆。稚海胆培育期间水温 19.0~26.5℃,光照强度低于 5000 lx,其他培育条件与浮游期一致。稚海胆壳径生长至 3 mm 的幼海胆后,随机选取每一家系幼海胆各 30 枚至 0.15 m×0.15 m×0.3 m 塑料网箱内,各家系网箱均设置在一个养殖池内,足量投喂海带(*Laminaria japonica*),每隔 2~3 天全量换水 1 次,各家系培育及养殖条件严格保持一致。

1.3 数据测量

分别在 250、295 和 340 日龄,对各家系海胆进行取样,利用电子天平(精确到 0.01 g)测量海胆个体的体重,家系样本含量介于 11~30。在 295 日龄和 340 日龄间,测量各家系的总投喂量,计算饵料系数:

$$FCR = F / (X_{340} - X_{295})$$

式中,FCR 为饵料系数, F 为总投喂量, X_{340} 为各家系 340 日龄体重总和, X_{295} 为各家系 295 日龄体重总和。

1.4 数据分析

根据系谱信息和实际养殖条件构建动物模型如下:

$$y_{ijk} = \mu + a_k + SD_{ij} + e_{ijk}$$

式中, y_{ijk} 为第 i 个父本与第 j 个母本杂交后代的第 k 个记录, μ 为总体平均值, a_k 为第 k 个个体的加性效应(育种值), SD_{ij} 为第 i 个父本与第 j 个母本的特殊配合力效应, e_{ijk} 为随机误差效应。

利用 ASReml 软件^[29],采用约束性最大似然法(REML)^[30]估计各阶段海胆体重模型中各随机效应的方差组分,根据文献[31, 32, 33]的方法,采用 BLUP 方法预测各父母本、各父母组合和每一后代个体的育种值,得到各父母的一般配合力、各父母组合的特殊配合力和各后代个体的育种值。

利用 SPSS 16.0 软件和单因素方差分析方法(one-way ANOVA)分析个体表型值和育种值(加性效应)在全同胞家系间的差异显著性,之后采用 S-N-K 方法对家系间表型值和育种值进行多重比较。采用相关分析方法分析家系平均表型值和平均育种值间的相关系数。所有因变量均符合正态

分布和方差齐性。显著性水平设置为 0.05, 极显著水平设置为 0.01。

2 结果与分析

2.1 杂交海胆体重的表型统计量

在养殖过程中, 存在海胆死亡和养殖笼损坏导致的逃逸现象, 因此无法统计死亡率。自 250 日龄至 340 日龄, 杂交家系群体体重由 0.37 g 生长至 1.38 g。250 日龄体重的变异系数最大, 340 日龄则最小, 随着海胆日龄增加, 体重的变异系数呈现下降趋势(表 2)。

2.2 杂交海胆体重表型值和育种值的方差分析

方差分析结果显示, 3 个生长阶段杂交家系间体重的表型值和育种值均达到极显著水平($P<$

0.01)。

295 日龄测量时, 因遗漏一个家系导致用于分析的家系数量为 35, 家系间自由度为 34 (表 3)。

2.3 杂交海胆体重表型值、育种值及饵料系数

为简便起见, 本研究仅对 340 日龄杂交家系海胆的体重表型值、育种值及饵料系数进行比较。340 日龄的杂交家系海胆的体重表型平均值介于 $(0.52\pm0.25)\sim(2.11\pm0.51)$ g, 平均育种值介于 $-(0.29\pm0.02)\sim(0.29\pm0.03)$ g, 表型值最优和最差家系分别为 SH105.1 和 HS108.1, 育种值亦是如此(表 4)。总体来看, 表型值在家系间的差异较小, 具有显著性差异的家系数较少; 而育种值在家系间的差异较大, 具有显著性差异的家系数较多。杂交家系的饵料系数介于 4.39~17.29, 家系间差异较大, 最优家系为 HS108.1, 最差家

表 2 中间球海胆与马粪海胆杂交家系 3 个生长阶段的体重描述性统计量
Tab. 2 Descriptive statistics for body weight of hybrid families between *Strongylocentrotus intermedius* and *Hemacentrotus pulcherrimus* in three growth stages

日龄/d age	个体数量 number	最小值/g minimum	最大值/g maximum	平均值/g mean	标准差 SD	变异系数/% CV
250	1084	0.01	5.30	0.37	0.50	135.33
295	999	0.01	6.00	0.58	0.63	107.98
340	911	0.10	7.00	1.38	1.03	74.58

表 3 杂交家系 3 个生长阶段体重表型值和育种值的方差分析
Tab. 3 Variance analyses for phenotypic values and breeding values of body weight of hybrid families in three growth stages

因变量 dependent variable	日龄/d age	变异来源 variation resource	平方和 sum of squares	自由度 df	均方 mean square	F	P
体重表型值 phenotypic value of body weight	250	家系间 between families	42.15	37	1.14	5.31	0.00
		家系内 within family	224.43	1046	0.22		
		总和 total	266.57	1083			
	295	家系间 between families	72.08	34	2.12	6.31	0.00
		家系内 within family	323.81	964	0.34		
		总和 total	395.89	998			
	340	家系间 between families	141.16	35	4.03	4.27	0.00
		家系内 within family	825.83	875	0.94		
		总和 total	966.99	910			
体重育种值 breeding value of body weight	250	家系间 between families	18.94	37	0.51	159.92	0.00
		家系内 within family	3.35	1046	0.00		
		总和 total	22.29	1083			
	295	家系间 between families	32.51	34	0.96	125.61	0.00
		家系内 within family	7.34	964	0.01		
		总和 total	39.84	998			
	340	家系间 between families	20.36	35	0.58	146.87	0.00
		家系内 within family	3.47	875	0.00		
		总和 total	23.83	910			

表 4 杂交家系的饵料系数及 340 日龄体重
表型值与育种值的多重比较

Tab. 4 Feed conversion ratio and multiple comparisons for
phenotypic values and breeding values of body weight of
hybrid families at 340 days

家系 family	表型值/g phenotypic value	育种值/g breeding value	饵料系数 (295~340 日龄) feed conversion ratio
SH101.1	0.97±0.68 ^{b-c}	-0.19±0.04 ^{lm}	12.67
SH102.2	1.47±1.21 ^{a-c}	0.04±0.08 ^{figh}	11.80
SH103.1	1.13±0.93 ^{a-c}	-0.06±0.06 ^{jk}	10.95
SH103.2	1.53±1.02 ^{a-c}	0.04±0.07 ^{figh}	7.43
SH104.1	1.47±1.05 ^{a-c}	0.04±0.07 ^{figh}	15.29
SH105.1	2.11±0.51 ^a	0.29±0.03 ^a	13.53
SH106.1	1.77±0.90 ^{ab}	0.13±0.06 ^c	14.20
SH106.2	1.21±1.03 ^{a-c}	0.00±0.07 ^{hi}	15.85
SH107.2	1.59±0.88 ^{a-d}	0.09±0.06 ^f	9.73
HS108.1	0.52±0.25 ^e	-0.29±0.02 ⁿ	4.39
HS110.1	2.10±1.06 ^a	0.29±0.07 ^a	9.91
HS111.1	0.71±1.14 ^{cde}	-0.20±0.07 ^m	7.20
SH113.1	1.69±0.86 ^{abc}	0.06±0.06 ^{fg}	9.72
SH113.2	0.85±0.78 ^{b-c}	-0.15±0.05 ^l	11.23
SH115.2	1.16±0.56 ^{a-c}	-0.04±0.04 ^{ij}	/
SH116.1	1.10±0.38 ^{a-c}	-0.17±0.02 ^{lm}	12.95
SH116.2	0.61±0.56 ^{de}	-0.28±0.04 ⁿ	12.45
SH117.1	1.83±1.31 ^{ab}	0.24±0.08 ^{bc}	8.15
SH117.2	1.87±0.79 ^{ab}	0.25±0.05 ^b	5.69
SH118.1	1.73±1.55 ^{abc}	0.19±0.10 ^d	9.95
SH118.2	1.79±0.75 ^{ab}	0.20±0.05 ^{cd}	8.59
SH119.1	1.24±1.00 ^{a-c}	-0.02±0.06 ^{ij}	/
SH119.2	1.51±1.28 ^{a-c}	0.04±0.08 ^{figh}	7.98
SH120.2	1.58±1.13 ^{a-d}	0.09±0.07 ^f	9.83
SH121.1	0.63±0.87 ^{de}	-0.22±0.06 ^m	17.29
SH121.2	1.47±1.28 ^{a-c}	-0.03±0.08 ^{ij}	9.30
SH122.1	1.35±1.27 ^{a-c}	-0.03±0.08 ^{ij}	7.89
SH122.2	1.02±0.65 ^{b-c}	-0.10±0.04 ^k	/
SH123.1	1.48±0.72 ^{a-c}	0.04±0.05 ^{figh}	16.53
SH123.2	1.31±0.84 ^{a-c}	0.00±0.05 ^{hi}	15.11
SH124.1	1.49±1.35 ^{a-c}	-0.03±0.09 ^{ij}	9.14
SH124.2	0.61±1.09 ^{de}	-0.22±0.07 ^m	9.09
SH125.1	1.07±0.48 ^{a-c}	-0.08±0.03 ^k	9.35
SH125.2	1.53±1.40 ^{a-c}	0.03±0.09 ^{gh}	12.10

注：同一列数值中上标字母完全不同表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Values in the same column with totally different superscript letters are significantly different ($P<0.05$).

系为 SH117-2 (表 4)。SH115.2、SH119.1 和 SH122.2 家系由于饵料投喂数据缺失, 未计算饵料系数。

2.4 基于表型值和育种值的家系选择效率

表 5 显示了基于表型值和育种值的家系选择效率比较结果。250 日龄、295 日龄和 340 日龄体重表型值和育种值的相关系数介于 0.968~0.992, 且均达到极显著水平($P<0.01$)。3 个生长阶段排名前 50%的共同家系相同率介于 88.89%~94.44%, 基于育种值选择前 50%家系的平均育种值较基于表型值选择高 0.93%~4.83%。

2.5 亲本一般配合力与特殊配合力

250 日龄、295 日龄和 340 日龄各父本的一般配合力分别介于-0.22~0.33, -0.31~0.41 和-0.29~0.31 (图 1)。M16、M8 和 M11 等父本的一般配合力始终较低, 而 M5、M6 和 M17 等父本的一般配合力始终较高。250 日龄、295 日龄和 340 日龄各母本的一般配合力分别介于-0.24~0.33, -0.31~0.41 和-0.28~0.28 (图 2)。F15、F21 和 F41 等母本的一般配合力始终较低, 而 F9、F11 和 F19 等母本的一般配合力始终较高。250 日龄、295 日龄和 340 日龄各父母本组合的特殊配合力分别介于-0.07~0.09, -0.10~0.13 和-0.32~0.32 (图 3), 虽然配合力估计值随后代海胆生长而增长, 但各日龄间配合力具有一定的相关性。M8F15、M11F21 和 M12F23 等杂交组合特殊配合力始终较低, 而 M5F9 和 M6F11 等杂交组合的特殊配合力始终较高。

3 讨论

3.1 中间球海胆与马粪海胆的种间杂交

中间球海胆具有生殖腺品质好、生长速度快、棘刺短易于养殖等优点, 成为唯一一种在中国开展人工养殖的海胆种类, 然而由于其耐高温能力差, 在水温超过 25℃的海域即易大量死亡^[34], 因此其养殖规模受到了极大的限制。马粪海胆自然分布于日本沿海及中国南北各地沿海, 在 0~30℃水温下均能存活^[34], 是一种广温性种类。常亚青等^[12]报道了中间球海胆与马粪海胆在 16℃水温下杂交受精率可高达 62.7%~69.6%, 经培育可获得幼海胆。基于以上研究基础, 本研究选取这两种海胆做亲本构建杂交家系, 主要目的是为了构建在生长、耐温等经济性状上具有丰富遗传变异的育种

表 5 基于表型值和育种值的家系选择效率比较

Tab. 5 Comparisons for the selection efficiency between family selection based on phenotypic value and breeding value

日龄/d Age	全部家系 all families	前 50%家系 top 50% families			
	表型值—育种 值相关系数	共同家系 相同率	依育种值选择平均育种值/g	依表型值选择平均育种值/g	育种值选择效率优势
	correlation coefficients	the same family rates	mean breeding value based on breeding value selection	mean breeding value based on phenotype selection	breeding value selection priority
250	0.987**	89.47%	0.098	0.095	2.58%
295	0.992**	94.44%	0.139	0.138	0.93%
340	0.968**	88.89%	0.118	0.112	4.83%

注: **表示表型值与育种值间的相关系数达到极显著水平($P<0.01$).

Note: ** means the correlation coefficient between phenotypic value and breeding value is significantly different ($P<0.01$).

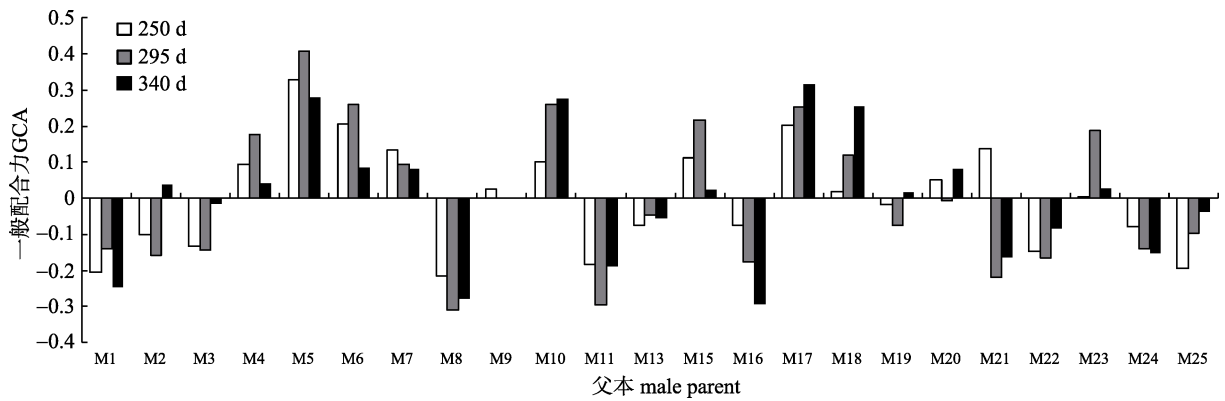


图 1 各父本体重的一般配合力

Fig. 1 General combining ability in body weight of male parents

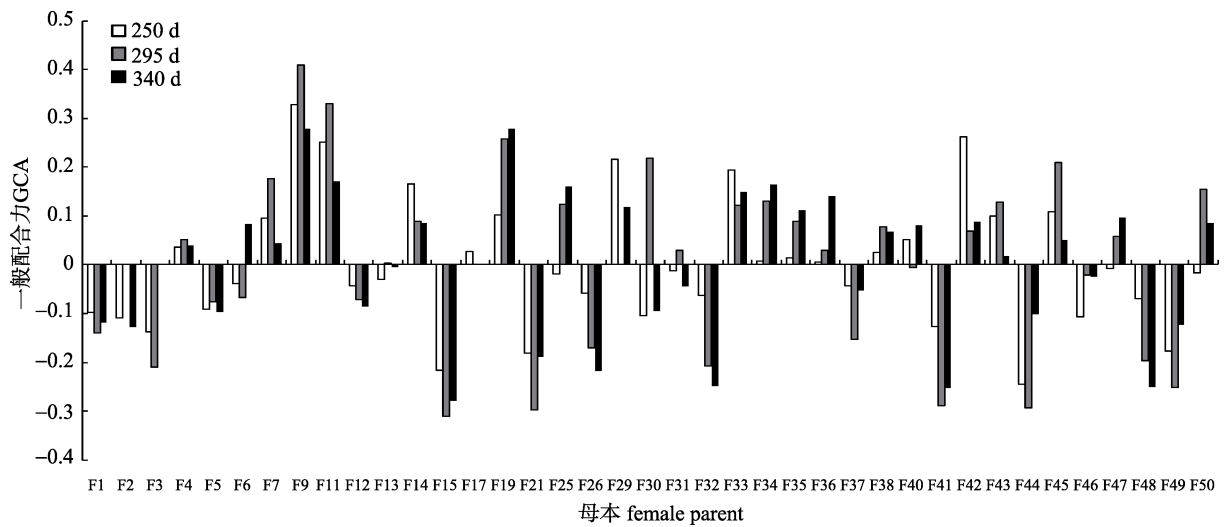


图 2 各母本体重的一般配合力

Fig. 2 General combining ability in body weight of female parents

基础群。从体重来看, 杂交海胆具有极大的表型变异, 但值得注意的是, 其 250 和 295 日龄的变异可能部分来源于测量误差, 这是因为最小个体的体重仅有 0.01 g, 而电子天平的精度为 0.01 g。虽然变异系数随日龄增加而下降, 但其 340 日龄的变异系数仍达到 74.58%。这一结果高于 Chang 等^[7]、Zhang 等^[27]对相近日龄中间球海胆家系选育群体的报道, 其原因应该是种间杂交增加了体重生长速度的遗传变异水平。从常亚青等^[12]报道的数据来看, 杂交海胆壳径的表型变异明显高于自繁组。

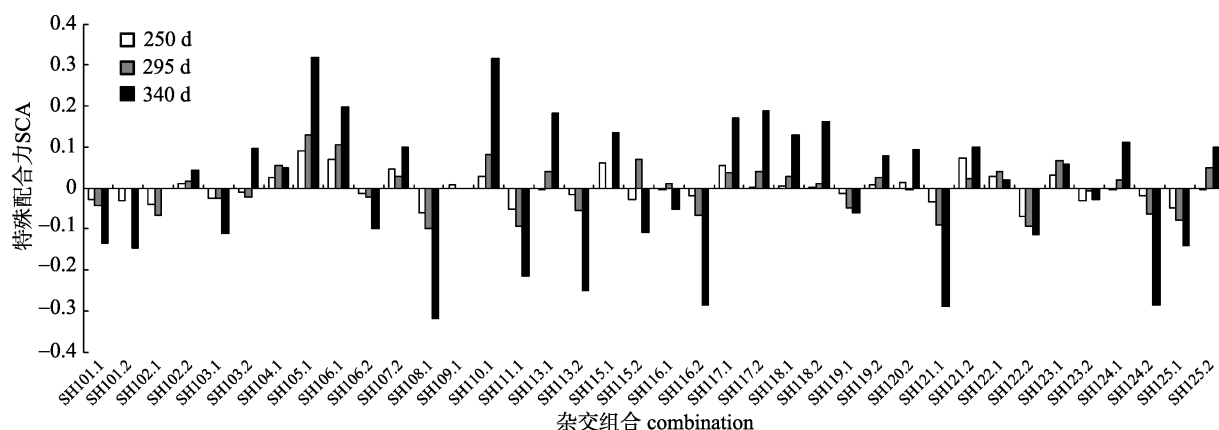


图 3 各杂交组合体重的特殊配合力

Fig. 3 Specific combining ability in body weight of hybridized combinations

3.2 体重表型值与育种值在杂交家系间的比较及基于二者的家系选择效率

目前, 水产动物种内自繁家系间的生长、摄食、抗逆和品质等性状表型值的显著差异有较多报道^[15-19, 25-28], 而关于远缘杂交家系间经济性状表型值差异的研究则较少^[4-5], 本研究中, 3 个生长阶段杂交海胆体重的表型值在家系间均存在极显著差异, 这一结果与李建立等^[4]、张跃环等^[5]对紫扇贝和海湾扇贝、香港巨牡蛎和长牡蛎杂交家系的研究结果一致, 同时也与中间球海胆种内自繁家系的研究结果一致^[25-28], 这表明中间球海胆与马粪海胆杂交群体具备依据表型值进行家系选择的基础。进一步对体重育种值的比较表明, 育种值在杂交家系间的差异达到极显著水平, 相较于表型值, 育种值具有显著性差异的两两家系的数量更多, 这表明育种值在家系间的差异程度大于表型值, 这是由于本研究中的育种值是由表型值剔除了平均值、随机效应、尤其是杂交的非加性效应而获得的加性效应值, 育种值在家系间的比较减少了可能的影响因素, 从而使结果显著性增加。本研究中, 体重育种值与表型值间的相关系数达到 0.96 以上, 高于张天时等^[20]、刘峰等^[23]对中国明对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)、牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)的研究结果, 在 50% 家系留种率下, 育种值选择和表型值选择的家系相同率(88.89%~94.44%)同样高于对中国明对虾^[20]、牙鲆^[23]、三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)^[24]、菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)^[35]等物种的

研究结果, 而与在罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)^[21]、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)^[22]中获得的结果相近, 这些差异可能与物种、规格间的差异有关, 另外, 也可能与家系养殖环境的设置和育种值估计模型的不同有关。与多数研究结果^[20-24]一致, 本研究认为对杂交海胆家系选择来说, 育种值选择相较于表型值选择具有更高的选择效率, 选择效率优势虽并不明显, 但却与生长规格有一定的正相关性, 因此, 随着海胆的生长, 育种值选择的优势可能会进一步增加, 这一推测有待进一步验证。本研究还显示, 不同家系间的饵料系数差异悬殊, 其差异程度要高于王海峰等^[26]对中间球海胆家系间饵料系数差异的研究结果, 原因可能是远缘杂交增加了海胆摄食相关性状的遗传变异水平, 这为杂交海胆在饵料系数上的家系选择奠定了良好的基础。

3.3 亲本的配合力表现

在杂交中, 亲本的一般配合力是对加性效应的度量, 可预测一个亲本杂交后代的平均表现, 而特殊配合力则是对亲本杂交后由于互作表现出的非加性效应, 在一定程度上可预测杂种优势。配合力估计已应用于多种水产动物如虹鳟、合浦珠母贝(*Pinctada fucata*)、瓯江彩鲤(*Cyprinus carpio* var. *color*)、凡纳滨对虾、九孔鲍(*Haliotis diversicolor supertexta*)、文蛤(*Meretrix meretrix*)、尼罗罗非鱼(*O. niloticus*)等品系或群体杂交的亲本选配和杂种优势预测和利用中^[31-33, 36-39]。本研究中, M4、M5、M6、M7、M10、M15、M17 和 M18

等雄性亲本在3个生长阶段的体重上表现出较高且正向的一般配合力, F7、F9、F11、F14、F19、F33、F42和F45等雌性亲本表现出较高且正向的一般配合力, 表明这些亲本在体重上具有较高的育种值, 利用这些亲本构建杂交组合更易获得表现优良的后代^[31, 37]。M5F9、M6F11、M10F19、M17F33、M17F34和M23F45等杂交组合在体重上的特殊配合力较高, 表明这些亲本组合杂交后更易产生杂种优势。在特殊配合力高的亲本组合中, 至少有1个亲本具有较高的一般配合力, 这与王炳谦等^[31]、谷龙春等^[36]的研究结果一致, 这在一定程度上可说明具有高育种值的亲本间更容易产生交互作用, 其原因尚待深入研究。由于中间球海胆与马粪海胆性成熟不完全同步, 本研究中构建的家系多为中间球海胆♂与马粪海胆♀亲本杂交产生, 其反交组合家系在250日龄仅有4个, 在295日龄和340日龄则仅为3个。虽然从结果来看, 雄性马粪海胆亲本和雌性中间球海胆亲本一般配合力平均值均为负值, 二者组合的特殊配合力平均值也为负值, 但由于亲本数量少, 并不能说明马粪海胆♂与中间球海胆♀这一杂交组合育种潜力差, 进一步的研究应采用人工促熟方法同步促熟两种海胆, 以构建足量的正反交家系, 评估两种海胆正反杂交的不同效应。

自繁家系的选育主要以育种值为依据, 杂交家系除了要以育种值为依据以外, 还要重视对杂种优势的利用。本研究对中间球海胆与马粪海胆杂交后代的体重育种值进行了家系间比较, 并估计了杂交亲本的一般配合力(育种值)和特殊配合力, 研究结果可为杂交海胆的家系选择和杂种优势利用奠定良好的基础。

参考文献:

- [1] Gjedrem T. Genetic improvement of cold-water fish species[J]. Aquac Res, 2000, 31(1): 25–33.
- [2] Bentsen H B, Eknath A E, Vera P D, et al. Genetic improvement of farmed tilapias: growth performance in a complete diallel cross experiment with eight strains of *Oreochromis niloticus*[J]. Aquaculture, 1998, 160(1): 145–173.
- [3] Lu X, Luan S, Luo K, et al. Genetic analysis of the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*): heterosis and heritability for harvest body weight[J]. Aquac Res, 2016, 47(11): 3365–3375.
- [4] Li J L, Wang C D, Li Z X, et al. Growth and path analyses of hybrid families between the Peruvian and bay scallop[J]. Marine Sciences, 2012, 36(8): 15–20. [李建立, 王春德, 李朝霞, 等. 紫扇贝和海湾扇贝杂交家系的生长和通径分析[J]. 海洋科学, 2012, 36(8): 15–20.]
- [5] Zhang Y H, Wang Z P, Yan X W, et al. Analysis of the early heterosis for interspecific hybrids between *Crassostrea hongkongensis* and *C. gigas*[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(9): 1358–1366. [张跃环, 王昭萍, 闫喜武, 等. 香港巨牡蛎与长牡蛎种间杂交及早期杂种优势分析[J]. 水产学报, 2012, 36(9): 1358–1366.]
- [6] Lou Y D, Li X Q. Distant hybridization of fish and its application in aquaculture in China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(1): 151–158. [楼允东, 李小勤. 中国鱼类远缘杂交研究及其在水产养殖上的应用[J]. 中国水产科学, 2006, 13(1): 151–158.]
- [7] Chang Y Q, Zhang W J, Zhao C, et al. Estimates of heritabilities and genetic correlations for growth and gonad traits in the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Aquac Res, 2012, 43(2): 271–280.
- [8] Liu X L, Chang Y Q, Xiang J H, et al. Estimates of genetic parameters for growth traits of the sea urchin, *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Aquaculture, 2005, 243(1–4): 27–32.
- [9] Liu X L, Chang Y Q, Xiang J H, et al. Study on heritability of growth in the juvenile sea urchin, *Strongylocentrotus nudus*[J]. J Shellfish Res, 2004, 23(1): 215–219.
- [10] Pante M J, Garvida J J, Cruz T L D. Growth performance and initial heritability estimates for growth traits in juvenile sea urchin *Tripneustes gratilla*[J]. Sci Dil, 2007, 19(1): 1–10.
- [11] Branham J M. Comparative fertility of gametes from six species of sea urchins[J]. Biol Bull, 1972, 142(3): 385–396.
- [12] Chang Y Q, Wang Z C, Song J, et al. Cross breeding between four species of sea urchin, feasibility and early development of F₁ offspring[J]. Journal of Fisheries of China, 2000, 24(3): 211–216. [常亚青, 王子臣, 宋坚, 等. 四种海胆杂交的可行性及子代的早期发育[J]. 水产学报, 2000, 24(3): 211–216.]
- [13] Ding J, Chang Y Q, Wang C H, et al. Evaluation of the growth and heterosis of hybrids among three commercially important sea urchins in China: *Strongylocentrotus nudus*, *S. intermedius*, and *Anthocardaris crassispina*[J]. Aquaculture, 2007, 272(1–4): 273–280.
- [14] Jing C C, Zhang W J, Song J, et al. Fertilization, hatching and larval development of sea urchin hybrid between

- Strongylocentrotus intermedius* and *Anthocardia crassipina*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2015, 30(6): 620–626. [经晨晨, 张伟杰, 宋坚, 等. 中间球海胆与紫海胆种间杂交的受精、孵化和幼体发育研究[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(6): 620–626.]
- [15] Wang X A, Ma A J, Lei J L, et al. Comparison of the growing performance of different families of turbot (*Scophthalmus maximus* L.)[J]. Marine Sciences, 2011, 35(4): 1–8. [王新安, 马爱军, 雷霖霖, 等. 大菱鲆不同家系生长性能的比较[J]. 海洋科学, 2011, 35(4): 1–8.]
- [16] Luo K, Xia Y T, Wang B, et al. Construction and comparison in growth performance among different families of *Acipenser gueldenstaedtii*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(2): 463–469. [罗坤, 夏永涛, 王斌, 等. 俄罗斯鲟(*Acipenser gueldenstaedtii*)家系构建及不同家系间生长性能比较[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(2): 463–469.]
- [17] Wang J J, Ding J, Chang Y Q, et al. The growth traits comparison and genetic parameter evaluation of *Patinopecten yessoensis* in early and mid-stage[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(9): 1318–1325. [王俊杰, 丁君, 常亚青, 等. 虾夷扇贝家系早中期生长性状比较与遗传参数估计[J]. 水产学报, 2014, 38(9): 1318–1325.]
- [18] Wang Q Z, Li S L, Fu C D, et al. Establishment of high temperature resistance families and use of laboratory assays to predict subsequent survival in juvenile stage of the Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(3): 371–377. [王庆志, 李石磊, 付成东, 等. 虾夷扇贝耐高温育种家系的建立与早期筛查[J]. 水产学报, 2014, 38(3): 371–377.]
- [19] He Y Y, Li J, Liu P, et al. Comparison of the resistance to pH value and ammonia in Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) families[J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(5): 761–765. [何玉英, 李健, 刘萍, 等. 中国对虾家系幼体对氨氮和 pH 值的耐受性比较[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2008, 38(5): 761–765.]
- [20] Zhang T S, Luan S, Kong J, et al. Analysis of breeding value estimation for body weight of *Fenneropenaeus chinensis* using animal models[J]. Marine Fisheries Research, 2008, 29(3): 7–13. [张天时, 栾生, 孔杰, 等. 中国对虾体重育种值估计的动物模型分析[J]. 渔业科学进展, 2008, 29(3): 7–13.]
- [21] Luo K, Kong J, Luan S, et al. Difference analysis of breeding value estimation for *Macrobrachium rosenbergii* by animal models[J]. Marine Fisheries Research, 2008, 29(3): 85–91. [罗坤, 孔杰, 栾生, 等. 应用动物模型对罗氏沼虾育种值估计的差别分析[J]. 渔业科学进展, 2008, 29(3): 85–91.]
- [22] Ma A J, Wang X A, Lei J L. Genetic parameterization for turbot *Scophthalmus maximus*: implication to breeding strategy [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(2): 187–194. [马爱军, 王新安, 雷霖霖. 大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)不同生长阶段体重的遗传参数和育种值估计[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(2): 187–194.]
- [23] Liu F, Chen S L, Wang L, et al. Analysis of growth performance and breeding value of “Ping You No. 1” Japanese flounder and selection of parents[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(3): 521–527. [刘峰, 陈松林, 王磊, 等. “鲆优 1 号”牙鲆生长和育种性能分析及亲本选留[J]. 中国水产科学, 2013, 20(3): 521–527.]
- [24] Gao B Q, Liu P, Li J. Analysis of the growth and breeding value of *Portunus trituberculatus* ‘Huangxuan No. 1’[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(1): 44–50. [高保全, 刘萍, 李健. 三疣梭子蟹‘黄选 1 号’生长和育种性能分析[J]. 中国水产科学, 2015, 22(1): 44–50.]
- [25] Chang Y Q, Zhang W J, Ding J, et al. Comparison of gonad traits among families and between genders of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(7): 1080–1088. [常亚青, 张伟杰, 丁君, 等. 虾夷马粪海胆不同家系和性别间性腺性状的比较[J]. 水产学报, 2010, 34(7): 1080–1088.]
- [26] Wang H F, Zhao S, Zhang W J, et al. Effects of diet, family, and the diet by family interaction on growth, feeding, and phenotypic variation in sea urchin, *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(6): 1186–1194. [王海峰, 赵帅, 张伟杰, 等. 饵料、家系及二者交互作用对中间球海胆生长、摄食与变异的影响[J]. 中国水产科学, 2015, 22(6): 1186–1194.]
- [27] Zhang W J, Zhao C, Chen M, et al. Family growth response to different laboratory culture environments shows genotype–environment interaction in the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Aquac Res, 2013, 44(11): 1706–1714.
- [28] Chang Y Q, Tian X F, Zhang W J, et al. Family growth and survival response to two simulated water temperature environments in the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Int J Mol Sci, 2016, 17(9): 1356.
- [29] Gilmour A R, Gogel B J, Cullis B R, et al. ASReml User Guide Release 4.0[M]. Hemel Hempstead: VSN International Ltd., 2012.
- [30] Patterson H D, Thompson R. Recovery of interblock information when block size are unequal[J]. Biometrics, 1971, 58: 545.
- [31] Wang B Q, Gu W, Gao H J, et al. Prediction of hybridization advantage among five strains of rainbow trout by combina-

- tion ability and SSR markers[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(2): 206–213. [王炳谦, 谷伟, 高会江, 等. 利用配合力和微卫星标记预测虹鳟品系间的杂交优势[J]. 中国水产科学, 2009, 16(2): 206–213.]
- [32] Wang H, Luo K, Luan S, et al. Combining ability of hybrid generation from the introduced populations of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(4): 489–495. [王浩, 罗坤, 栾生, 等. 凡纳滨对虾多个引进群体的杂交配合力分析[J]. 水产学报, 2013, 37(4): 489–495.]
- [33] Hu Z G, Liu J Y, Bao X F, et al. Combining ability and heterosis of hybridization between cultured and wild stocks of *Haliotis diversicolor supertexta*[J]. South China Fisheries Science, 2014, 10(1): 43–49. [胡志国, 刘建勇, 包秀凤, 等. 九孔鲍双列杂交家系子代的杂种优势与配合力分析[J]. 南方水产科学, 2014, 10(1): 43–49.]
- [34] Chang Y Q, Ding J, Song J, et al. Biology and Aquaculture of Sea Cucumbers and Sea Urchins[M]. Beijing: Ocean Press, 2004. [常亚青, 丁君, 宋坚, 等. 海参、海胆生物学研究与养殖[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.]
- [35] Li D C, Yan X W, Huo Z M, et al. Estimation of heritability and breeding value on shell length of manila clam *Ruditapes philippinarum* at spat stage [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(6): 1550–1556. [李冬春, 闫喜武, 霍忠明, 等. 蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)养成期壳长遗传力与育种值估计[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(6): 1550–1556.]
- [36] Gu L C, Li J B, Yu D H, et al. Establishment and genetic analysis of complete diallel cross families of pearl oyster (*Pinctada fucata*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(1): 26–31. [谷龙春, 李金碧, 喻达辉, 等. 合浦珠母贝双列杂交家系的建立与遗传分析[J]. 水产学报, 2010, 34(1): 26–31.]
- [37] Bi X, Xiang S P, Wang J, et al. Combining ability and heterosis analysis for reproductive traits of complete set selection lines in Oujiang color common carp, *Cyprinus carpio* var. *color*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 19(5): 775–783. [毕详, 项松平, 王剑, 等. 瓯江彩鲤配套选育系繁殖性状的配合力测定与杂交优势分析[J]. 中国水产科学, 2012, 19(5): 775–783.]
- [38] Wu Y P, Chen A H, Yao G X, et al. Combining ability analysis on diallel cross from three different red *Meretrix meretrix* populations[J]. Marine Fisheries, 2014, 36(4): 314–319. [吴杨平, 陈爱华, 姚国兴, 等. 3个不同地理群体红壳文蛤杂交的配合力分析[J]. 海洋渔业, 2014, 36(4): 314–319.]
- [39] Lin M X, Yang J, Yue W C, et al. Analysis of combining ability, heterosis and genetic correlation on growth traits of GIFT tilapia[J]. South China Fisheries Science, 2016, 12(2): 1–6. [林明雪, 杨洁, 岳武成, 等. “吉富”系列罗非鱼生长性状的配合力、杂种优势与遗传相关分析[J]. 南方水产科学, 2016, 12(2): 1–6.]

Comparisons of early growth and estimation of combining ability of parents for *Strongylocentrotus intermedius* and *Hemicentrotus pulcherrimus* sea urchin hybrid families

ZHANG Weijie, HAN Fenjie, CHEN Shun, LIU Kui, ZHOU Mi, WANG Baofeng, WANG Zhong, LIU Mingtai, ZHAN Yaoyao, JING Chenchen, CHANG Yaqing

Key Laboratory of Mariculture & Stock Enhancement in the North China's Sea, Ministry of Agriculture; Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

Abstract: To compare the growth differences between *Strongylocentrotus intermedius* and *Hemicentrotus pulcherrimus* sea urchin hybrid families and evaluate the parents' combining ability in body weight, 42 hybrid families were produced. Using the restricted maximum likelihood and best linear unbiased prediction approaches, the breeding value of body weight at 250, 295, and 340 days of age, the general combining ability (GCA) of male and female parents and the specific combining ability (SCA) of parental combinations were evaluated. Differences in the phenotypic value and breeding value of body weight among families were compared using variance analysis. The results showed that both the phenotypic and breeding values of body weight significantly differed among families ($P < 0.01$). The breeding value of body weight showed a greater variation among families than the phenotypic value. When the proportion of the selected families was 50%, 88.89%–94.44% of the selected families were identical between the phenotypic and breeding value selection methods, and the breeding value selection method had a 0.93%–4.83% better selection efficiency. At the ages of 250, 295, and 340 days, the calculated GCAs of the male parents were -0.22 – -0.33 , -0.31 – -0.41 , and -0.29 – -0.31 whereas those of the female parents were -0.24 – -0.33 , -0.31 – -0.41 , and -0.28 – -0.28 , respectively. The calculated SCAs of the parental combinations were -0.07 – -0.09 , -0.10 – -0.13 , and -0.32 – -0.32 . At the ages of 250, 295, and 340 days, the male parents M5, M6, and M17 and the female parents F9, F11, and F19 always had higher GCAs than the other parents. The parental combinations M5F9 and M6F11 always had higher SCAs than the other combinations. The results provide a reference point for progeny testing and family selection in *S. intermedius* and *H. pulcherrimus* hybrid families.

Key words: *Strongylocentrotus intermedius*; *Hemicentrotus pulcherrimus*; hybridization; family; growth; combining ability

Corresponding author: CHANG Yaqing. E-mail: yqchang@dlou.edu.cn