

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.15176

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

王海峰, 赵帅, 张伟杰, 经晨晨, 左然涛, 侯受权, 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: 为研究饵料、家系及二者交互作用对中间球海胆(*Strongylocentrotus intermedius*)生长、摄食及变异的影响, 利用两种饵料—裙带菜(*Undaria pinnatifida*)和配合饲料, 对 6 个中间球海胆全同胞家系进行了 60 d 投喂, 实验结束时测量了实验海胆的终末体重(FBW)和总摄食量, 并计算了体重特定生长率(SGR)、饵料系数(FCR)和体重变异系数的变化(ΔCV), 利用双因素及单因素方差分析的方法, 检验了饵料、家系及二者交互作用对 FBW、SGR、FCR 及 ΔCV 的影响。结果表明, 饵料与家系的交互作用对 FBW 和 ΔCV 无显著影响, 摄食裙带菜的海胆较摄食配合饲料的海胆在终末体重(FBW)和整齐度(ΔCV)上表现出极显著的优势($P < 0.01$), 不同家系间海胆的 FBW 和 ΔCV 也有显著差异($P < 0.05$)。饵料与家系的交互作用对体重 SGR 和 FCR 均有极显著影响($P < 0.01$), 在每家系内, 裙带菜投喂下海胆体重 SGR 均极显著优于配合饲料投喂($P < 0.01$); 饵料系数(FCR)均极显著高于配合饲料投喂($P < 0.01$); 对于每种饵料, 不同家系间 SGR 也均具有显著差异($P < 0.05$), FCR 亦是如此。两种饵料下家系 SGR 排位基本一致, 说明家系与饵料在 SGR 上的交互作用是由于不同饵料下家系对 SGR 的影响程度有差异造成的, 而家系 FCR 排位出现了较大变化则说明 FCR 受到交互作用的影响是由于不同饵料对不同家系的投喂效果不同造成的。本研究结果表明, 家系选择可用于对中间球海胆生长、饵料系数和整齐度的遗传改良, 饵料对这些性状的表现有显著的影响, 对饵料系数进行家系选育时应注意家系与饵料的交互作用问题。

关键词: 中间球海胆; 家系; 饵料; 交互作用; 生长; 摄食; 变异

中图分类号: S96

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)06-1186-09

中间球海胆(*Strongylocentrotus intermedius*)又称虾夷马粪海胆, 是从日本引进的优良养殖品种, 具有生长速度快、生殖腺色泽好、棘刺短、易于养殖等优点^[1]。近年来该种在辽宁、山东沿海形成了一定的生产规模, 经济效益显著^[2]。然而, 在养殖过程中也出现了生产速度慢、抗逆抗病能力差等一系列问题。国内外经验表明, 优良品种是推动养殖动物产量和品质提升的主要因素之一。因此, 培育中间球海胆新品种对其养殖生产效益的提高具有非常重要的意义。

家系选育是一种广泛应用于水产动物遗传改良的选择育种方法。挪威 Akvaforsk 水产研究所

运用大规模家系选育技术成功培育出优质大西洋鲑(*Salmo salar*)品系, 其生长速度已达到野生种的 2 倍以上, 养殖周期从选育前的 4 年缩减到现在的 18 个月^[3]; De Donato 等^[4]对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)进行了 4 代的选育, 使其生长率增加了 0.05 g/d, 成活率提高了 11.1%。此外, 运用家系选育技术对印度鲤鱼(*Cyprinus carpio*)^[5]和罗非鱼的选育^[6]等都取得了较好的选育结果。近年来, 国内多种水产动物均已开展了家系选育研究。例如, 马爱军等^[7]探讨了大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)家系构建及标准化培育技术; 王俊杰等^[9]以同家系为材料, 估计了虾夷扇贝(*Patinopecten ye-*

收稿日期: 2015-04-24; 修订日期: 2015-06-19.

基金项目: 国家 863 计划项目(2012AA10A412); 辽宁省农业攻关及成果产业化项目(2015203003).

作者简介: 王海峰 (1990-), 男, 硕士研究生. E-mail: 827357434@qq.com

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

soensis)早中期生长性状的遗传力及遗传相关; 栾生等^[11]、李云峰等^[12]和孟思远等^[13]分别在同胞家系基础上估计了刺参(*Stichopus japonicus*)耳状幼体体长、稚参体长、幼参体长、体重、肉刺数目和肉刺长度等性状的遗传力。家系选育方法已在中间球海胆的良种培育工作中得到应用: 常亚青等^[14]及沈妍等^[15-16]通过对中间球海胆经济性状进行家系间比较, 认为家系选择方法可用于针对性腺产量和品质的遗传改良; 刘小林等^[17]通过建立家系估计了中间球海胆早期生长性状的遗传力, Chang 等^[18]及周海森^[19]进一步估计了中间球海胆整个生产周期生长性状的遗传力以及繁殖期生殖腺性状的遗传参数, 为中间球海胆生长性状和品质性状的家系选育奠定了理论基础。

基因型与环境的交互作用被证明广泛存在于多种水产动物的家系选育中^[20]。例如, Evans 等^[21]研究表明, 太平洋牡蛎(*Crassostres gigas*)的产量、存活率、平均体重等受基因型与不同生长地点互作影响显著; Saillant 等^[22]研究认为, 海鲈(*Dicentrarchus labrax*)基因型与温度、密度互作对体重、生长率有显著性影响; 邓岳文等^[23]研究表明, 皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)养殖温度和家系的互作对壳长增长率有显著性影响; 黄英姿等^[24]研究认为, 福寿螺(*Poacea canaliculata*)的不同家系与不同养殖环境互作对其体重的生长有显著性影响。开展家系与环境的交互作用研究, 其意义在于评估家系所代表的基因型在不同环境(如饵料)下是否会有不同的排位, 若排位不同, 在单环境下进行选种则会显著影响选种准确性及选种效率, 因此家系与环境因子的交互作用是家系选育中确定是否要开展多环境联合选种的依据。Zhang 等^[25]的研究表明, 水温、光照、养殖密度等环境因子与中间球海胆家系间存在显著的交互作用, 部分家系在优良环境下表现不佳, 而在不利环境下却有优于其他家系的表现。对于饵料这一显著影响海胆生长及性腺发育的重要环境因素^[26-28]与家系的交互作用研究目前尚未见报道。研究饵料与中间球海胆家系在生长、摄食及变异等方面的交互作用, 一方面可为中间球海胆

家系选育研究提供参考资料, 另一方面有望选择出适于不同饵料喂养的家系, 为中间球海胆优良品系的培育及推广奠定种质资源基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验家系选用大连海洋大学农业部北方海水增养殖重点实验室 2013 年 6 月构建的第 3 批 F₄ 中间球海胆选育家系。在家系培育至 10 月龄时, 从该批次家系群体中随机选择 6 个相互之间无亲缘关系的全同胞家系作为实验材料。

实验用饵料为新鲜裙带菜与人工配合饲料, 其中, 裙带菜取自大连黑石礁海域(粗蛋白 15.84%, 粗脂肪 3.18%, 多糖 41.21%, 粗纤维 9.45%^[29]), 人工配合饵料取自大连海洋大学农业部北方海水增养殖重点实验室, 其配方、营养组成及加工方法如表 1 所示。

表 1 配合饲料配方及营养组成
Tab. 1 Artificial feed formula and nutritional composition

原料组成 raw material	含量 content %
玉米面 corn flour	25
小麦粉 wheat flour	21
海带粉 kelp powder	15
豆粕 soybean meal	12
鱼粉 fish meal	12
卵磷脂 lecithin	1
豆油 soybean oil	3
磷酸二氢钙 calcium dihydrogen phosphate	2
多维 ¹⁾ multidimensional ¹⁾	1
多矿 ²⁾ multi mine ²⁾	2
抗氧化剂 antioxidants	1
明胶 gelatin	5
营养成分 nutritional components	
蛋白 protein	27
脂肪 fat	6

注: 1) 多维预混物(以 kg 饲料计): 维生素 A, 1700 IU; 维生素 D, 1200 IU; 维生素 E, 45 mg; 维生素 K, 4 mg; 维生素 B₁, 4.5 mg; 维生素 B₂, 10 mg; 维生素 B₆, 15 mg; 维生素 B₁₂, 0.05 mg; 烟酸, 65 mg; D-泛酸, 23 mg; 叶酸, 5.5 mg; D-生物素, 0.1 mg; 肌醇, 110 mg。

2) 多矿盐预混物(mg/kg): 铜, 11; 铁, 170; 锌, 34; 锰, 12; 钴, 1.2; 碘, 1.5; 硒, 0.15; 镁, 60; 钾, 200。

Note: 1) Vitamin premis (per kg diet): vitamin A, 1700 IU; vitamin D, 1200 IU; vitamin E, 45 mg; vitamin K, 4 mg; vitamin B₁, 4.5 mg; vitamin B₂, 10 mg; vitamin B₆, 15 mg; vitamin B₁₂, 0.05 mg; nicotinic acid, 65 mg; D-calcium pantothenate, 23 mg; folic acid, 5.5 mg; D-biotin, 0.1 mg; inositol, 110 mg。

2) Mineral premis (mg/kg): copper, 11; iron, 170; zinc, 34; manganese, 12; cobalt, 1.2; iodine, 1.5; selenium, 0.15; magnesium, 60; potassium, 200。

将原材料用粉碎机磨成细粉状, 过 80 目筛绢网去除原料中的杂质。将原料按照饲料配方比例混合在一起做成面团, 加入 20%的水混匀。然后将其放在 90℃高压蒸汽锅内蒸 10 min, 取出稍加冷却后压成 3~4 mm 厚的饼状, 并分割为长 20 cm, 宽 4 cm 片状小块, 阴干 1 周后使用。

1.2 实验方法

从选择的 6 个家系中各随机选取 120 枚海胆, 等分为 2 组, 分别投喂配合饲料和新鲜裙带菜, 每组内设 3 个重复。具体实验设置见表 2。实验海胆置于塑料网箱(单层尺寸为 41 cm×35 cm×

11.7 cm, 孔径: 0.8 cm)中进行养殖。养殖过程中每 2~3 天换水 1 次, 每次换水 1/3~1/2, 每 7 天倒池 1 次。每 2~3 天投喂饵料 1 次, 投喂前对各实验单元所投喂的饵料进行称重, 并保证过量投喂。实验自 2014 年 4 月 10 日开始, 至 2014 年 6 月 10 日结束, 共进行 60 天。实验开始前测量所有实验海胆的初始体重, 实验结束后测量所有海胆的终末体重, 并对每个重复的残饵进行收集测量。实验期间水温为(14.96±2.47)℃; 盐度为 32.12±0.29; pH 为 7.93±0.05; 溶解氧为(7.93±0.05) mg/L。

表 2 2 种饵料投喂下各家系实验海胆数量及重复设置
Tab. 2 Number of experimental sea urchin and design of replicates in each family fed by two diets

饵料种类 diet	实验家系及海胆数量 number of families and sea urchins					
	家系 1 family1	家系 2 family 2	家系 3 family 3	家系 4 family 4	家系 5 family 5	家系 6 family 6
裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i>	20 枚×3 重复	20 枚×3 重复	20 枚×3 重复	20 枚×3 重复	20 枚×3 重复	20 枚×3 重复
	20 sea urchins × 3 replicates	20 sea urchins × 3 replicates	20 sea urchins × 3 replicates	20 sea urchins × 3 replicates	20 sea urchins × 3 replicates	20 sea urchins × 3 replicates
配合饵料 artificial feed	20 枚×3 重复	20 枚×3 重复	20 枚×3 重复	20 枚×3 重复	20 枚×3 重复	20 枚×3 重复
	20 sea urchins × 3 replicates	20 sea urchins × 3 replicates	20 sea urchins × 3 replicates	20 sea urchins × 3 replicates	20 sea urchins × 3 replicates	20 sea urchins × 3 replicates

1.3 数据计算及分析

各实验单元内海胆平均体重的特定生长率(SGR)和变异系数变化(ΔCV)、各实验单元内海胆的饵料系数(FCR)计算如下:

$$SGR\ (\%/d) = (\ln X_1 - \ln X_0) / t \times 100\%$$

式中, X_0 为初始体重平均值, X_1 为终末体重平均值, t 为实验天数。

$$\Delta CV\ (\%) = (SD_1 / X_1 - SD_0 / X_0) \times 100\%$$

式中, SD_1 为终末体重平均值的标准差, SD_0 为初始体重平均值的标准差。

$$FCR = F / (X_1 - X_0)$$
 其中, F 为总投饵量。

采用 Excel 软件对数据进行初步整理。以家系和饵料为实验因素, 以初始体重(IBW)作为协变量分别对终末体重(FBW)、体重 SGR、饵料系数(FCR)及变异系数变化(ΔCV)进行双因素方差分析, 检验协变量的影响及家系与饵料的交互作用。协变量影响不显著时, 将协变量剔除。交互作用不显著时, 以双因素方差分析结果为准。若交互作用显著, 则分别固定家系或饵料, 以饵料

或家系为实验因素, 对终末体重重新进行单因素方差分析; 方差分析前对数据的正态性和方差齐性进行检验, 对不符合正态性和方差齐性的数据进行转换。采用 LSD 方法, 对具有显著影响的因素各水平间进行多重比较。统计分析采用 SPSS 16.0 软件, 显著性水平设置为 $P < 0.05$, 极显著水平设置为 $P < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 两种饵料投喂下海胆生长、摄食与变异等表型统计量

两种饵料投喂下中间球海胆生长、摄食等表型统计量见表 3。由表 3 可知, 实验过程中所有试验单元海胆的成活率均为 100%。两种饵料下, 中间球海胆的体重平均值都呈现出递增的状况, 投喂裙带菜组的海胆的体重的增长幅度比投喂配合饵料的增幅大。此外, 中间球海胆对裙带菜的摄食量显著大于对配合饵料的摄食量; 两种饵料下, 中间球海胆的体重变异系数呈现出递减的状况,

表 3 2 种饵料下海胆体重、变异、摄食及存活率表型统计量
Tab. 3 Statistics for body weight, variation, feeding and survival rate of sea urchins fed by two diets

项目 item	裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i>		配合饵料 artificial feed	
	初始值 initial value	最终值 final value	初始值 initial value	最终值 final value
数量/枚 number	360	360	360	360
体重/g body weight	1.09±0.74	5.07±2.20	1.06±0.69	2.88±1.61
体重变异系数/% CV for body weight	68	43	65	56
总摄食量/g total food intake	8615.69		838.71	
成活率/% survival rate	100	100	100	100

投喂裙带菜组的海胆的体重变异系数降低幅度比投喂配合饵料的幅度大。

2.2 各实验因素对海胆生长、摄食与变异的影响

各影响因素及协变量对海胆生长、摄食与变异的影响见表 4。初始体重 IBW 作为协变量时仅对终末体重有极显著影响, 对其他指标无显著影响。家系对海胆 FBW、SGR、转化后的 FCR(TFCR)和 ΔCV 有显著或极显著影响, 饵料对所有测量指

标均有极显著影响, 家系与饵料的交互作用对 FBW 和 ΔCV 无显著影响, 而对 SGR 和 TFCR 均有极其显著的影响。

2.3 家系与饵料对海胆终末体重和变异变化的影响

由表 4 可知, 中间球海胆的终末体重和变异系数变化不受家系与饵料交互作用的影响, 家系与饵料对终末体重和变异系数变化的影响见图 1、图 2。由图 1 可知, 家系间海胆的终末体重存在显

表 4 饵料、家系及二者之间交互作用对海胆生长、摄食与变异的影响
Tab. 4 Effects of diet, family and diet by family interaction on growth, feeding and variation of the sea urchin

参数 parameter	终末体重 FBW	特定生长率 SGR	转化后的饵料系数 TFCR	变异系数变化 ΔCV
初始体重 IBW	0.001	0.100	0.601	0.761
家系 family	0.012	0.000	0.003	0.004
饵料 diet	0.000	0.000	0.000	0.000
家系与饵料交互作用 family \times diet	0.096	0.007	0.010	0.604

注: 表中数字表示 P 值。IBW 对生长、摄食等各参数影响不显著时下面各因素显著性水平为剔除协变量后重新分析的结果。
Note: Numbers in the table are P value. When the effect of IBW on parameters such as growth and feeding is not significant, significance levels for the following factors are re-examined without covariates in the analysis model.

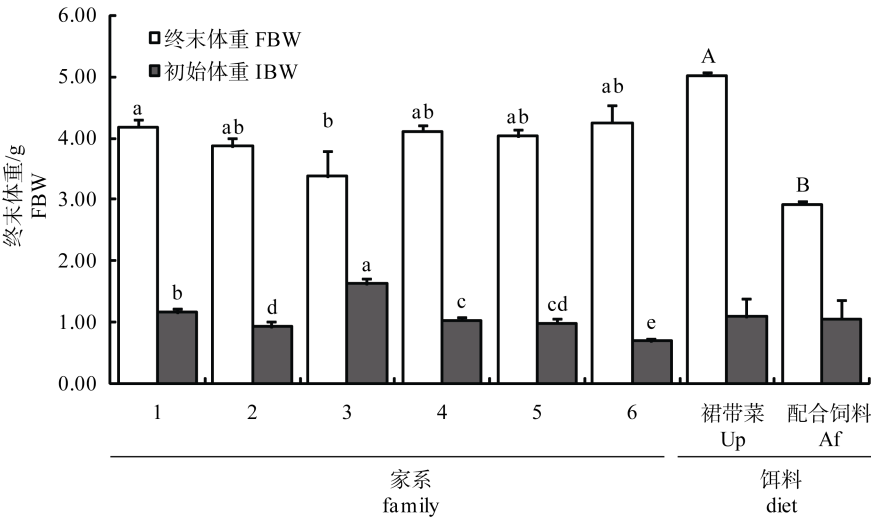


图 1 家系与饵料对海胆终末体重的影响

图中家系间或饵料间直方柱上标含有相同字母表示差异不显著, 大写字母表示极显著水平($P<0.01$), 小写字母表示显著水平($P<0.05$).

Fig. 1 Effects of family and diet on FBW of *Strongylocentrotus intermedius*
Columns among families or between diets sharing the same superscript are not significantly different. Upper-case letters indicate extremely significant difference ($P<0.01$). Lower-case letters indicate significant difference ($P<0.05$).

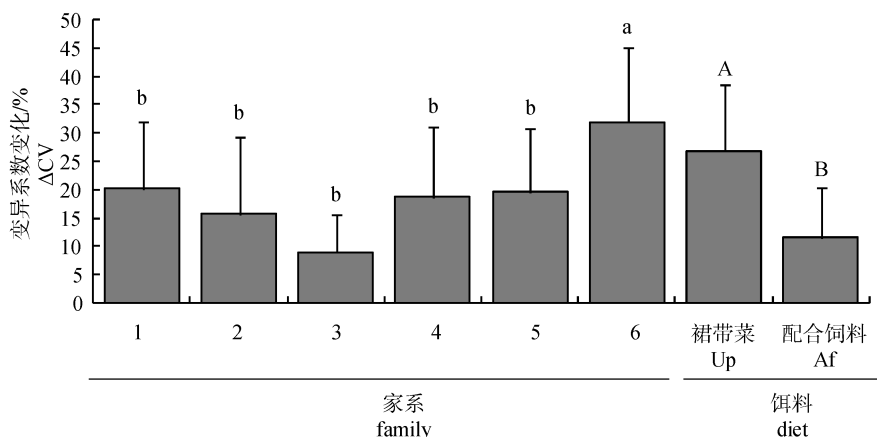


图 2 家系与饵料对海胆变异系数变化的影响

柱上标含有不同大写字母表示组间差异极显著($P<0.01$), 不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$).

Fig. 2 Effects of family and diet on ΔCV of *Strongylocentrotus intermedius*

Columns sharing different upper-case letters indicate extremely significant difference ($P<0.01$), and lower-case letters indicate significant difference ($P<0.05$).

著差异($P<0.05$), 1 号家系海胆终末体重最大, 3 号家系海胆终末体重最小; 摄食裙带菜的海胆终末体重极显著大于摄食配合饲料组($P<0.01$)。由图 2 可知, 家系间海胆体重的变异系数变化存在显著差异($P<0.05$), 6 号家系海胆体重的变异系数变化显著大于其他家系; 摄食裙带菜的海胆变异系数变化极显著大于摄食配合饲料组($P<0.01$)。

2.4 家系与饵料对海胆 SGR 和 FCR 的影响

由表 4 可知, 中间球海胆的体重 SGR 和饵料系数 FCR 均极显著受家系与饵料交互作用的影响($P<0.01$)。进一步固定家系或饵料进行的单因素方差分析表明: 摄食裙带菜的情况下, 家系间 SGR 差异极显著($P<0.01$), 6 号家系生长速度最快, 3 号最慢, 1 号、2 号、4 号、5 号家系居中; 在配合饲料投喂下, 家系间差异较裙带菜小, 但达到显著水平($P<0.05$), 家系间 SGR 排位与裙带菜相同(图 3)。摄食裙带菜的情况下, 家系间饵料系数 FCR 差异显著($P<0.05$), 1 号、4 号、6 号家系 FCR 较低, 2 号、3 号、5 号较高; 摄食配合饲料情况下, 家系间饵料系数 FCR 差异显著($P<0.05$), 家系间 FCR 排位与裙带菜不同, 1 号、3 号、4 号家系较低, 2 号、6 号家系较高(图 4)。

3 讨论

3.1 不同饵料对海胆生长、摄食与变异的影响

饵料对水产养殖动物的存活、生长以及其他

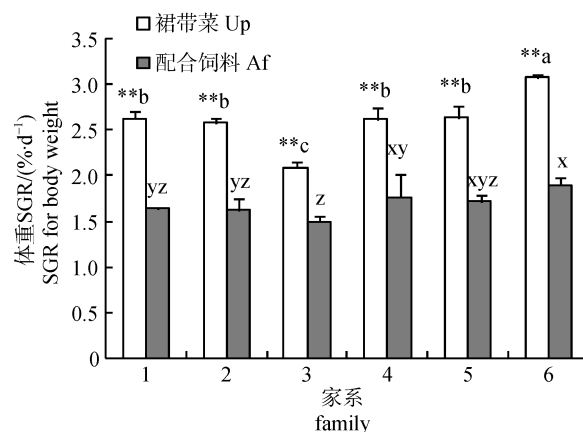


图 3 相同饵料下不同家系间海胆 SGR 比较

**表示家系内饵料间差异极显著($P<0.01$). 不同字母表示组间差异显著($P<0.05$).

Fig. 3 Comparisons among SGRs of different families fed by the same diet

** means SGRs for body weights are extremely significantly different between diets within a family ($P<0.01$). Values with different letters indicate significant difference ($P<0.05$) between different families.

生命活动均有显著影响。本研究所使用的饵料极显著影响中间球海胆的生长、摄食和变异($P<0.01$), 对于同一家系来说, 饵料均显著影响中间球海胆体重 SGR 和 FCR, 且裙带菜的投喂效果均极显著优于配合饲料。周海森等^[30]和 Kennedy 等^[31]研究认为单独投喂海带等新鲜褐藻能很好地促进海胆的体生长, 本实验结果与其一致。配合饲料并未收到很好的投喂效果, 原因可能是配合饲料的原

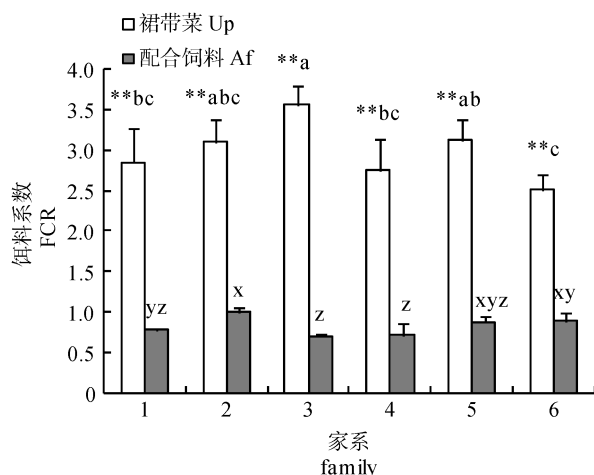


图 4 相同饵料下不同家系间海胆饵料系数 FCR 比较
 **表示家系内饵料间差异极显著 ($P<0.01$). 不同字母表示组间差异显著 ($P<0.05$).

Fig. 4 Comparisons among FCRs of different families fed by the same diet

** means SGRs for body weights are extremely significantly different between diets within a family ($P<0.01$). Values with different letters indicate significant difference ($P<0.05$) between different families.

料使用及营养成分配比不能很好地满足海胆的生长, 尚需要进一步改进。两种饵料投喂下海胆的变异系数均下降, 表明两组内海胆大小差距都在减小, 即小规格海胆体重正在逐步接近大海胆。裙带菜投喂下海胆的变异下降幅度极显著大于配合饲料, 说明裙带菜更能使小规格海胆快速生长, 而配合饲料可能不适合小规格海胆生长, 这为上述的海胆对配合饲料的适应性差找到了原因。

3.2 家系对海胆生长、摄食与变异变化的影响

家系显著影响中间球海胆的生长和变异, 这表明中间球海胆的生长速度受到遗传因素的影响, 其部分表型变异来源于遗传方面的差异, 这应该是不同家系的亲本在生长性状方面的可遗传的差异在后代家系中的呈现。家系是影响水产动物生长速度的主要因素之一^[32-34]。Zhang 等^[25]在 3 个环境下对 7 个中间球海胆全同胞家系的生长速度进行了比较, 认为家系对生长差异的影响在不同环境下均达到显著水平。本研究结果与 Zhang 等^[25]的研究结果基本一致, 不同的是, 本研究发现, 不同饵料下家系对海胆生长的影响程度不同: 裙带菜投喂下家系间的 SGR 的差异达到极显著水

平 ($P<0.01$), 而配合饲料投喂下, 家系间 SGR 的差异为显著水平 ($P=0.043$), 其原因应该是由裙带菜的投喂效果极显著优于配合饲料, 可以使基因型方面的差异较快表现出来。另外, 本研究首次对中间球海胆家系间饵料系数的差异进行了研究, 结果表明投喂同种饵料情况下, 不同中间球海胆家系的饵料系数存在显著差异。这表明, 家系选择除了可以用于提高中间球海胆的生长速度和降低变异幅度外, 还有降低其饵料系数的潜力。降低饵料系数可以节约养殖成本, 是水产动物遗传改良的重要目标之一, 在大西洋鲑^[35]、虹鳟^[36]等一些水产动物的遗传改良中, 针对饵料系数的选择育种已取得了较好的遗传进展。中间球海胆摄食新鲜褐藻及配合饲料的饵料系数的遗传参数尚待研究。

3.3 饵料和家系交互作用对海胆生长、摄食与变异的影响

中间球海胆家系与饵料的交互作用不影响终末体重 FBW 和变异系数变化 ΔCV , 但显著影响生长速度 SGR 和饵料系数 FCR。遗传与环境的交互作用对性状的影响一方面是由于不同基因型间在该性状上排位变化造成的, 即不同基因型对不同的环境有不同的响应, 另一方面则是因为基因型在不同环境间的差异程度不同造成的^[37]。Zhang 等^[25]研究表明, 在 3 种环境下(水温、养殖水池、密度、照度等均有差异), 中间球海胆的生长速度受到家系与环境交互作用的影响, 其产生原因是由于不同环境下家系排位的变化。与 Zhang 等^[25]研究结果不同, 本研究中, SGR 虽然受到家系与饵料交互作用的影响, 但是两种饵料下家系 SGR 的排位基本一致, 说明 SGR 受到交互作用的影响是由于不同饵料下家系对 SGR 的影响程度有差异造成的, 即裙带菜投喂下家系影响为极显著, 而配合饲料投喂下, 家系影响为显著。环境因子的不同应该是造成本研究与 Zhang 等^[25]研究结果不同的主要原因。本实验中两种饵料下家系 FCR 的排位发生了较大的变化, 例如: 裙带菜投喂下 3 号家系排位最高, 而在配合饲料投喂下 3 号家系排位最低; 裙带菜投喂下 6 号家

系排位最低,而在配合饲料投喂下 3 号家系排位处在第二位。可见,FCR 受到交互作用的影响是由于不同饵料对不同家系的投喂效果不同造成的。因此,在对中间球海胆进行家系选育时,如果目标性状为饵料系数,需要考虑到家系与饵料的交互作用对家系选择的影响。

参考文献:

- [1] Chang Y Q, Wang Z C, Wang G J. Effect of temperature and algae on feeding and growth in sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Journal of Fisheries of China, 1999, 23(1): 69–75. [常亚青, 王子臣, 王国江. 温度和藻类饵料对中间球海胆摄食及生长的影响[J]. 水产学报, 1999, 23(1): 69–75.]
- [2] Kong Y T, Wang Q, Cheng Z M, et al. Study on the feed of salted-undaria pinnatifida suringar instead of fresh kelp to *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Shandong Fisheries, 2001(1): 7–8. [孔泳滔, 王琦, 程振明, 等. 盐渍裙带菜替代鲜海带投喂虾夷马粪海胆的试验[J]. 齐鲁渔业, 2001(1): 7–8.]
- [3] Yin S W, Huang H, Lei C G, et al. Studies on the genetics-breeding of Marine Economic Fishes[J]. Fisheries Science, 2007, 26(7): 416–419. [尹绍武, 黄海, 雷从改, 等. 海水经济鱼类遗传育种研究进展[J]. 水产科学, 2007, 26(7): 416–419.]
- [4] De Donato M, Ramirez R, Howell C, et al. Artificial family selection based on growth rate in cultivated lines of *Litopenaeus vannamei* (Decapoda, Penaeidae) from Venezuela[J]. Genet Mol Biol, 2008, 31(4): 850–856.
- [5] Li H M, Sun X W. The sustainable development of marine aquaculture in Liaoning by applying the large scale home breeding technology[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 4(1): 7–10. [李鸿鸣, 孙效文. 应用大规模家系选育技术促进辽宁海水养殖业的可持续发展[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 4(1): 7–10.]
- [6] Gall G A E, Bakar Y. Application of mixed-model techniques to fish breed improvement: analysis of breeding-value selection to increase 98-day body weight in tilapia[J]. Aquaculture, 2002, 212(1–4): 93–113.
- [7] Ma A J, Wang X A, Xue B G, et al. Investigation on family construction and rearing techniques for turbot (*Scophthalmus maximus*) family selection[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(3): 301–306. [马爱军, 王新安, 薛宝贵, 等. 大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)选育家系的和培育技术研究[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(3): 301–306.]
- [8] Huang F Y, He Y Y, Li J, et al. Estimates for the heritability of body length in shrimp *Fenneropenaeus chinensis* is named “Huanghai No.1”[J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(2): 269–274. [黄付友, 何玉英, 李健, 等. “黄海 1 号” 中国对虾体长遗传力的估计[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(2): 269–274.]
- [9] 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.]
- [10] You W W, Ke C H, Luo X, et al. Heritability of growth traits for small abalone *Haliotis diversicolor* estimated from sib matings[J]. J Shellfish Res, 2010, 29(3): 705–708.
- [11] Luan S, Sun H L, Kong J. Heritability of auricularia larval body length for sea cucumber *Apostichopus japonicus* Senlenka[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(3): 378–383. [栾生, 孙慧玲, 孔杰. 刺参耳状幼体体长遗传力的估计[J]. 中国水产科学, 2006, 13(3): 378–383.]
- [12] Li Y F, Chang Y Q, Tian Y, et al. Heritability of early growth traits in larval and juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2009, 24(1): 30–33. [李云峰, 常亚青, 田巍, 等. 仿刺参耳状幼体和稚参阶段的体长遗传力估计[J]. 大连水产学院学报, 2009, 24(1): 30–33.]
- [13] Meng S Y, Chang Y Q, Li W D, et al. Heritability of four growth traits in juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2010, 25(6): 475–479. [孟思远, 常亚青, 李文东, 等. 仿刺参幼参阶段 4 个生长性状遗传力的估计[J]. 大连海洋大学学报, 2010, 25(6): 475–479.]
- [14] 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.]
- [15] Shen Y, Ding J, Zhang W J, et al. Correlation and path analysis of quantitative characters among F_3 generation of sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Journal of Agriculture, 2013, 3(4): 42–47. [沈妍, 丁君, 张伟杰, 等. 虾夷马粪海胆 F_3 代群体数量性状相关性与通径分析[J]. 农学学报, 2013, 3(4): 42–47.]
- [16] Shen Y, Chang Y Q, Liu P J, et al. Analysis of body and gonad traits & nutrient composition among F_2 generation of sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* [J]. Journal of Agriculture, 2012, 2(8): 60–67. [沈妍, 常亚青, 刘平晋, 等. 虾夷马粪海胆 F_2 代群体体尺、性腺性状及营养成分的分析[J]. 农学学报, 2012, 2(8): 60–67.]
- [17] Liu X L, Chang Y Q, Xiang J H, et al. Heritability of juvenile

- growth for the sea urchins *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2003, 10(3): 206–211.
- [刘小林, 常亚青, 相建海, 等. 虾夷马粪海胆早期生长发育的遗传力估计[J]. 中国水产科学, 2003, 10(3): 206–211.]
- [18] 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.
- [19] Zhou H S. Study of selective breeding of sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[D]. Dalian Ocean University, 2013. [周海森. 中间球海胆选择育种研究[D]. 大连海洋大学, 2013.]
- [20] 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. [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.]
- [21] Evans S, Langdon C. Effects of genotype \times environment interactions on the selection of broadly adapted Pacific oysters (*Crassostrea gigas*)[J]. Aquaculture, 2006, 261(2): 522–534.
- [22] Saillant E, Dupont-Nivet M, Haffray P, et al. Estimates of heritability and genotype–environment interactions for body weight in sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) raised under communal rearing conditions[J]. Aquaculture, 2006, 254(1–4): 139–147.
- [23] Deng Y W, Liu X, Zhang G F. Genotype–environment interaction of growth in *Haliotis discus hannai*[J]. Marine Sciences, 2005, 29(12): 31–33. [邓岳文, 刘晓, 张国范. 皱纹盘鲍基因型与环境互作的初步研究[J]. 海洋科学, 2005, 29(12): 31–33.]
- [24] Huang Y Z, Mao S X. The initial research on genotype–environment interaction of primitive weigh in *Ampullzria gigas*[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 1992, 5(1): 48–53. [黄英姿, 毛盛贤. 关于福寿螺前期体重基因型与环境互作的初步研究[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 1992, 5(1): 48–53.]
- [25] 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.
- [26] Phillips K, Hamid N, Silcock P, et al. Effect of manufactured diets on the yield, biochemical composition and sensory quality of *Evechinus chloroticus* sea urchin gonads[J]. Aquaculture, 2010, 308(1–2): 49–59.
- [27] Chang Y Q, Lawrence J M, Cao X B, et al. Food consumption, absorption, assimilation and growth of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* fed a prepared feed and the alga *Laminaria japonica*[J]. J World Aquacult Soc, 2005, 36(1): 68–75.
- [28] Pearce C M, Daggett T L, Robinson S. Effect of urchin size and diet on gonad yield and quality in the green sea urchin (*Strongylocentrotus droebachiensis*)[J]. Aquaculture, 2004, 233(1–4): 337–367.
- [29] Li X X, Dong S F, Liu H W. Analysis and evaluation on nutritious componentes of *Undaria pinnatifidain* Yantai sea area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(33): 18768–18769, 18772. [李兴霞, 董淑凤, 刘禾蔚. 烟台海域裙带菜营养成分分析及评价[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(33): 18768–18769, 18772.]
- [30] Zhou H S, Chang Y Q, Luo S B, et al. Effects of three feeding models on growth, gonad yield and gonad quality of the sea urchin(*Strongylocentrotus intermedius*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(7): 1050–1057. [周海森, 常亚青, 罗世滨, 等. 3种饵料模式对中间球海胆生长、性腺产量和性腺品质的影响[J]. 水产学报, 2013, 37(7): 1050–1057.]
- [31] Kennedy E J, Robinson S M C, Parsons G J, et al. Effect of protein source and concentration on somatic growth of juvenile green sea urchins *Strongylocentrotus droebachiensis*[J]. J World Aquacult Soc, 2005, 36(3): 320–336.
- [32] Dupont-Nivet M, Médale F, Leonard J, et al. Evidence of genotype–diet interactions in the response of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) clones to a diet with or without fishmeal at early growth[J]. Aquaculture, 2009, 295(1–2): 15–21.
- [33] Pierce L R, Palti Y, Silverstein J T, et al. Family growth response to fishmeal and plant-based diets shows genotype \times diet interaction in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Aquaculture, 2008, 278(1–4): 37–42.
- [34] Kvingedal R, Evans B S, Lind C E, et al. Population and family growth response to different rearing location, heritability estimates and genotype \times environment interaction in the silver-lip pearl oyster (*Pinctada maxima*)[J]. Aquaculture, 2010, 304(1–4): 1–6.
- [35] Thodesen J, Grisdale-Helland B, Helland S J, et al. Feed intake, growth and feed utilization of offspring from wild and selected Atlantic salmo (*Salmo salar*)[J]. Aquaculture, 1999, 180(3–4): 237–246.
- [36] Abdel-Tawwab M, Ahmad M H, Khattab Y A E, et al. Effect of dietary protein level, initial body weight, and their interaction on the growth, feed utilization, and physiological alterations of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.)[J]. Aquaculture, 2010, 298(3–4): 267–274.
- [37] Gjerdem T, Baranski M. Selective breeding in aquaculture: An introduction (1th ed)[M]. Amsterdam: Springer, 2009: 119–124.

Effects of diet, family, and the diet by family interaction on growth, feeding, and phenotypic variation in sea urchin, *Strongylocentrotus intermedius*

WANG Haifeng, ZHAO Shuai, ZHANG Weijie, JING Chenchen, ZUO Rantao, HOU Shouquan, CHANG Yaqing

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

Abstract: *Strongylocentrotus intermedius* was introduced to China from Japan in 1989. It is the only sea urchin species cultured in China due to its short spines and high gonad quality. Family selection is being applied to genetically improve growth rates and gonad quality of *S. intermedius*. Families from different environments (water temperature, stocking density, illumination, and culture facility) rank differently during family selection, suggesting a family by environment interaction. However, the diet by family interaction, which is one of the most important environment factors, has not been examined. In this study, two different diets (artificial feed and *Undaria pinnatifida*) were fed to six families of *S. intermedius* to examine the effects of diet, family, and the diet by family interaction on final body weight (FBW), specific growth rate (SGR) for body weight, feed conversion rate (FCR), and change in the coefficient of variation (ΔCV). At the end of the 60-day experiment, we found no significant diet by family interaction effect on FBW or ΔCV . Sea urchins fed *U. pinnatifida* grew significantly larger and had more uniform FBW than those fed artificial feed ($P < 0.01$). Significant differences were detected in both FBW and ΔCV among families. These differences suggest that family selection is an effective genetic method to improve FBW and uniformity. We compared the FCRs of *S. intermedius* families fed macro-algae and artificial feed for the first time. Significant diet by family interaction effects were detected on both SGR and FCR ($P < 0.01$). Sea urchins in all families fed *U. pinnatifida* had larger SGR and FCR ($P < 0.01$). Both SGR and FCR were significantly different among families fed the different diets ($P < 0.05$). These differences suggest that both SGR and FCR can be improved genetically using family selection. The families fed the two diets were the same when ranked by SGR, suggesting that the interaction effect on SGR was caused by variations in the families between diets. However, family ranking using FCR was the opposite of that for SGR. Re-ranking the families showed that FCR was different based on diet. In conclusion, our results suggest that growth rates, FCR, and uniformity of *S. intermedius* were improved genetically by family selection. In addition, diet significantly lowered growth rate, FCR, and uniformity when family selection was applied. Breeders should consider the family by diet interaction when FCR is the target trait.

Key words: *Strongylocentrotus intermedius*; family; diet; interaction; growth; feeding; variation

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