

文章编号: 1000-0615(2019)04-1018-11

DOI: 10.11964/jfc.20171011006

虾夷扇贝高品质脂肪酸闭壳肌家系选育

谢 玺¹, 王庆志^{1*}, 许有燊², 滕炜鸣¹, 陈 炜²,
刘卫东¹, 于佐安¹, 张 明¹, 周遵春¹

(1. 辽宁省海洋水产科学研究院, 大连市海产贝类种质资源创新利用重点实验室, 辽宁 大连 116023;
2. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 以虾夷扇贝闭壳肌重量与脂肪酸组成为主要筛选指标, 通过对不同选育家系的生长性状进行比较, 在筛选出闭壳肌高出柱率家系的同时, 以EPA、DHA和 ω -3/ ω -6脂肪酸比值等重要营养性状作为参考指标进行家系筛选。结果显示, 在12个选育家系中, B04、B05、B10家系的出柱率优势最显著; 各家系闭壳肌的EPA+DHA占总脂肪酸45%以上, ω -3/ ω -6脂肪酸比值范围为10.94~12.69, 家系B03、B05、B06、B07、B10、B11与B12在闭壳肌脂肪酸含量上具有更高选育价值; 综合分析, 判定B05和B10为虾夷扇贝闭壳肌高出柱率且高品质脂肪酸家系。研究表明, 虾夷扇贝的生长与闭壳肌的主要脂肪酸组成没有显著相关性, 以闭壳肌脂肪酸含量与生长性状指标进行虾夷扇贝复合性状选育是可行的, 本研究结果可以为扇贝选择育种工作的深入开展提供科学依据。

关键词: 虾夷扇贝; 家系; 育种; 闭壳肌; 脂肪酸

中图分类号: S 968.31

文献标志码: A

双壳类软体动物种类繁多, 分布广泛, 能适应各种海洋和淡水环境, 在生态系功能服务和动物系统演化中具有重要的地位, 是世界各地的重要渔业资源, 同时也是现代海洋农牧业的产业支柱^[1]。虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)隶属于软体动物门(Mollusca)、瓣鳃纲(Lamellibranchia)、珍珠贝目(Pteriodia)、扇贝科(Pectinidae), 是一种典型的冷水性贝类, 自然分布于日本北海道和本州北部、朝鲜半岛以及俄罗斯远东海域, 北向延伸至库页岛与鄂霍次克海^[2-3]。虾夷扇贝肉质鲜美、营养丰富、个体大、生长快, 在原产地日本被视为最重要的优质贝类, 是全世界扇贝科中最适于增养殖的优良品种之一^[4]。自20世纪80年代初从日本成功引入该品种以来, 其工厂化育苗及人工增养殖技术不断完善, 在北黄海形成了稳定的产业规模, 增养殖面积发

展到70余万ha, 年产量近30万t, 产值达数百亿元, 目前是我国贝类养殖的重要品种^[5-8]。

近年来, 虾夷扇贝在北黄海主要产区的死亡率居高不下, 高温期成贝的大规模死亡尤为严重, 给当地渔业经济造成了巨大损失, 制约了产业的稳定发展。研究表明种质衰退、环境变化、过度养殖、病原侵袭等可能与虾夷扇贝的大规模死亡有关^[9-14], 培育优质抗逆新品种, 是保证虾夷扇贝增养殖产业可持续发展的有效途径之一^[15-18]。当前虾夷扇贝养殖所用苗种的生长、抗逆及品质等性状大多未经过系统的定向选育, 良种覆盖率不高。选择育种是使经济动植物在生长、产量、抗逆性等方面获得显著改良的有效方法, 以现有品种中的自然变异作为选育原始材料, 通过逐代定向选育, 使得目标经济性状不断累积后形成新的品种。虽然我国

收稿日期: 2017-10-23 修回日期: 2018-03-27

资助项目: 辽宁省重点研发计划(2017203006); 国家自然科学基金(31302186); 大连市高层次创新人才支持计划(2016RQ081); 辽宁省海洋与渔业科研项目(201818); 辽宁省博士科研启动基金(201601387); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-49)

通信作者: 王庆志, E-mail: wqzlm@126.com

重要经济扇贝选择育种已取得一定进展, 选育出“中科红”海湾扇贝(*Argopecten irradians*)、 “蓬莱红”栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、 “海大金贝” 虾夷扇贝等新品种, 对促进扇贝养殖业的健康发展发挥了重要作用, 但扇贝的人工选育目前仍主要围绕在生长与壳色方面^[15-17], 有关优质抗逆品种选育报道较少^[18]。

扇贝前闭壳肌退化, 后闭壳肌大而发达, 属单柱类; 其色质洁白细嫩、味道鲜美、营养丰富, 具高蛋白质和高度不饱和脂肪酸组成特点^[9]。虾夷扇贝闭壳肌的高度不饱和脂肪酸以 ω -3系列为主, 主要包括二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)和二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)^[20]。众所周知, ω -3脂肪酸因其在生命体中发挥的重要作用而备受青睐^[21], ω -3/ ω -6脂肪酸的合理摄入能够调节机体免疫和基因表达^[22], 对冠心病病人的细胞端粒有保护作用^[23], 还能通过酶促反应转变为具抗炎作用的内源性大麻素, 在不抑制机体免疫系统的前提下抑制炎症反应^[24]; 降低心血管疾病或中风发作风险^[25]; 此外, ω -3脂肪酸在保持血脑屏障完整性中也发挥着至关重要作用^[26-27]; 怀孕或泌乳期间的母源性 ω -3脂肪酸还能够保护婴儿免患高风险 I 型糖尿病^[28]; EPA和DHA可以增强机体大脑的前扣带皮层功能进而改善认知灵活性^[29]。2014年, 以消除营养不良和改变膳食结构营养饮食为宗旨的第二次国际营养会议再次确认并提出: 鱼类和海产品是自然状态下人类蛋白质和必需微量营养素的重要来源, 其 ω -3脂肪酸EPA和DHA是保障育龄妇女及婴幼儿生长发育的必需脂肪酸^[30]。本实验在前期虾夷扇贝良种选育工作基础上, 测量分析了部分选育家系的闭壳肌重、出柱率及其 ω -3系脂肪酸含量等性状, 比较了不同家系间生长性状与脂肪酸组成的差异及其相关性, 旨在为虾夷扇贝优良品种选育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 家系构建

虾夷扇贝家系建立于2015年4月, 从大连长海县人工底播增殖群体中, 随机选取3~4龄、性腺发育成熟且性状优良的个体为亲本, 参考王庆志等^[18]的方法, 采用巢式交配设计获得了35个

全同胞家系。在辽宁省海洋水产科学研究院育种中心完成扇贝幼虫和稚贝培育, 在长海县大长山岛海域进行浮筏养成。

1.2 样品测量

2016年10月, 自然海区水温为15~16 °C, 扇贝壳长长至5~6 cm时, 随机选取12个家系(编号为B01~B12), 每个家系含30~50枚健康活泼扇贝, 冷藏运回辽宁省海洋水产科学研究院海水养殖实验室。各家系用游标卡尺(精度为0.01 mm)测量30枚壳长、壳宽和壳高, 以电子天平(精度为0.01 g)称量扇贝湿重; 并剖取软体部于60 °C烘干至恒重, 以分析天平(精度为0.000 1 g)分别称量闭壳肌与软体部干重, 计算出柱率:

$$\text{出柱率}(\%) = \frac{\text{闭壳肌干重}}{\text{软体部干重}} \times 100\%$$

1.3 脂肪酸组成测定

同一家系闭壳肌(干样)通过完全随机区组平均分成3个生物学重复, 以IKA-A11基本型研磨机粉碎至60目网筛过滤, 未通过的颗粒用玻璃研钵研磨直至全部过筛。参考陈炜等^[20]在比较虾夷扇贝二倍体与三倍体脂肪酸组成时所使用的脂肪酸甲酯气相色谱法, 分析虾夷扇贝闭壳肌的脂肪酸组成。

称取样品2~3 g, 加入3%的BHT甲醇溶液, 以改进的Folch法^[31]萃取脂质。所得脂质用0.5 mol/L的KOH-甲醇于70 °C水浴中皂化1 h, 用BF₃催化法制取脂肪酸甲酯, 并转移到石油醚中, 取上清液用于色谱分析。采用部分脂肪酸甲酯标准样品(SIGMA公司和上海试剂一厂)与ECL值相结合的方法定性, 通过面积归一化法定量。气相色谱分析条件: 日本岛津GC-2010型气相色谱仪, 配有抗氧化交联石英毛细管色谱柱FFAP(中国科学院大连化学物理研究所, 30 m×0.25 mm, 0.3 μm); 检测器为FID(氢火焰离子化检测器); 载气为高纯氮气; 恒流为1 mL/min; 分流比为100:1; 汽化室温度为260 °C, 色谱柱初温160 °C, 以2 °C/min程序升温至230 °C, 并保持基线平稳。

1.4 数据分析

所有数据采用平均值±标准差(mean±SD)表示, 运用Excel 2016和SPSS 19.0分析实验数据, 方差分析前用Levene氏 test检验数据方差齐性和正态性。通过单因素方差分析(One-Way ANOVA)

并结合Tukey氏test多重分析比较不同家系虾夷扇贝的壳长、壳高、闭壳肌干重、出柱率和脂肪酸组成的差异显著性，显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 家系的生长性状

经过1年的生长，随机选取的12个虾夷扇贝家系(B01~B12)的壳长、壳宽、壳高、湿重、闭壳肌干重、闭壳肌与软体部比率(出柱率)等生长性状如图1所示。家系B10的壳长最长，为58.87 mm，与家系B04~B07差异不显著，较其余家系差异显著($P < 0.05$)；家系B11壳长最短，为42.38 mm，与家系B08和B12差异不显著。扇贝家系壳高的变化与壳长相同。家系B03的壳宽最宽，为14.34 mm，与家系B01、B04、B05、B06、B07、B09差异不显著，显著宽于其余家系($P < 0.05$)。

家系B04的湿重最重，为20.73 g，与家系B01、B03、B05、B06、B07、B10差异不显著，显著重于家系B02、B08、B09、B11和B12($P < 0.05$)。家系B05的闭壳肌干重最重，为0.95 g，与家系B04、B10差异不显著，3个家系显著重于其余各家系($P < 0.05$)；家系B08的闭壳肌最轻，干重为0.35 g，与家系B11和B12差异不显著。在闭壳肌与软体部比率(出柱率)方面，家系B04最高(0.492 3)，家系B10次之(0.491 7)，二者差异不显著，且与家系B05、B06、B07、B09差异不显著，但是显著高于其余各家系，出柱率最低为家系B08(0.410 5)。

2.2 家系的闭壳肌脂肪酸组成

虾夷扇贝各家系闭壳肌共检测出20种脂肪酸(表1)，包括C14:0、C15:0、C16:0、C17:0、C18:0等5种饱和脂肪酸(SFA)，C16:1n7、C18:1n9、C18:1n7、C20:1等4种单不饱和脂肪酸(MUFA)，

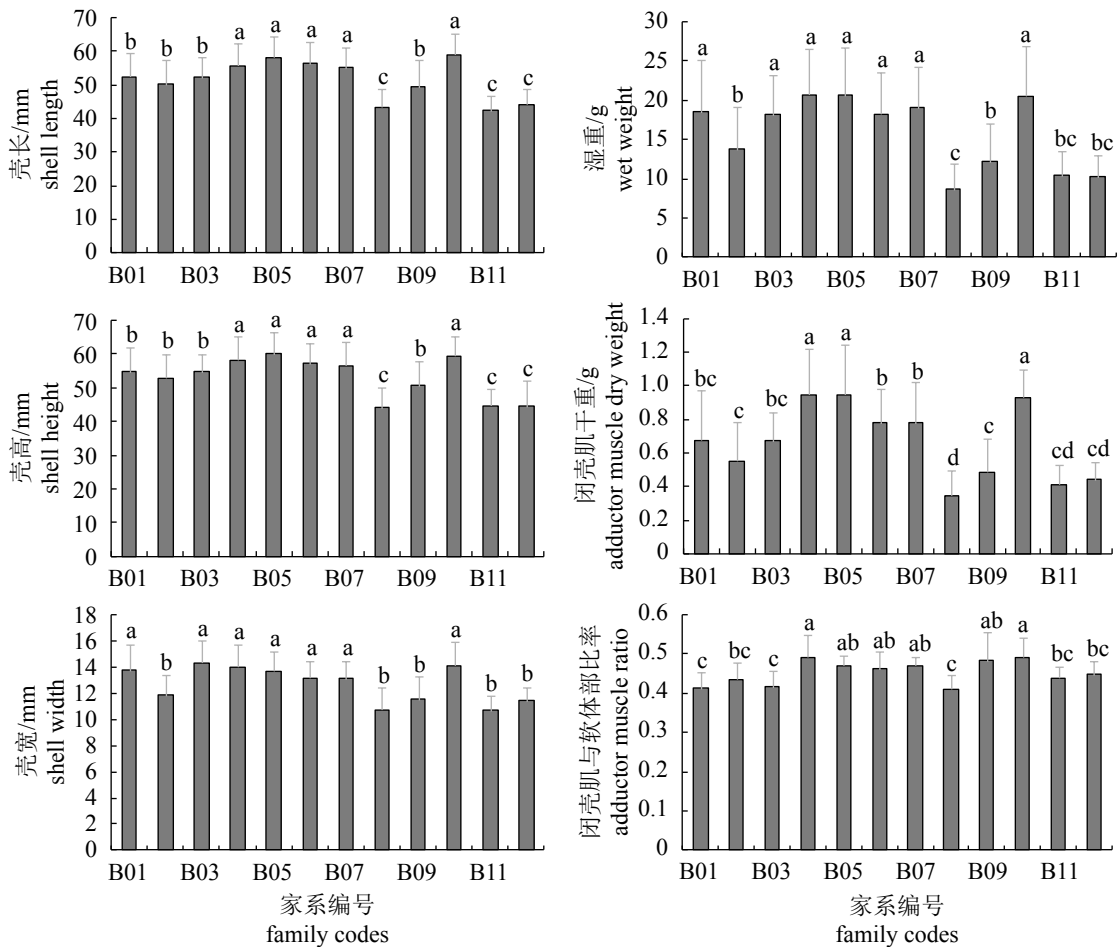


图1 虾夷扇贝家系的生长性状与出柱率

图中标注小写字母不同表示存在显著性差异($P < 0.05$)

Fig. 1 The phenotypic characteristics and adductor muscle ratio of distinct *P. yessoensis* families

Different lowercase letters in the bar mean significant difference ($P < 0.05$), the same below

表 1 虾夷扇贝家系闭壳肌脂肪酸组成
 Tab. 1 Fatty acid profiles of adductor muscles from distinct *P. yessoensis* families

脂肪酸 fatty acid	家系编号 family codes											
	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B09	B10	B11	B12
C14:0	2.38±0.07 ^b	2.15±0.16 ^{bc}	2.09±0.03 ^c	2.91±0.30 ^a	1.79±0.05 ^d	2.05±0.09 ^c	1.93±0.15 ^{cd}	2.10±0.09 ^c	2.29±0.16 ^{bc}	2.34±0.10 ^b	1.64±0.01 ^d	2.09±0.04 ^c
C15:0	0.50±0.00	0.49±0.01	0.47±0.04	0.51±0.03	0.54±0.03	0.55±0.03	0.43±0.02	0.58±0.05	0.52±0.03	0.55±0.05	0.52±0.06	0.52±0.00
C16:0	16.97±0.15 ^d	17.25±0.04 ^c	17.05±0.59 ^{cd}	16.92±0.26 ^d	17.87±0.11 ^b	17.00±0.09 ^{cd}	16.47±0.52 ^d	18.19±0.12 ^a	17.10±0.39 ^{cd}	17.87±0.65 ^{bc}	17.47±0.13 ^c	17.06±0.20 ^{cd}
C16:1n7	2.88±0.18 ^{bc}	2.78±0.10 ^c	2.77±0.10 ^c	3.60±0.42 ^a	2.24±0.14 ^{de}	2.29±0.06 ^d	2.87±0.27 ^{bc}	1.93±0.06 ^c	3.26±0.23 ^{ab}	2.46±0.18 ^d	2.00±0.17 ^c	1.96±0.04 ^c
C16:4n3	0.47±0.01 ^c	0.46±0.01 ^c	0.42±0.02 ^c	0.42±0.02 ^c	1.40±0.11 ^{ab}	1.30±0.01 ^b	0.45±0.02 ^c	1.44±0.06 ^c	0.42±0.04 ^c	1.48±0.08 ^c	1.20±0.08 ^b	1.29±0.04 ^b
C17:0	0.69±0.02 ^c	0.70±0.03 ^c	0.69±0.04 ^c	0.67±0.02 ^c	1.13±0.09 ^a	0.97±0.14 ^b	0.71±0.02 ^c	1.06±0.02 ^c	0.71±0.05 ^c	1.06±0.09 ^{ab}	1.11±0.16 ^{ab}	1.04±0.10 ^{ab}
C18:0	6.50±0.10 ^d	6.72±0.17 ^{cd}	6.54±0.05 ^d	6.21±0.31 ^{de}	8.13±0.16 ^a	7.58±0.10 ^b	6.92±0.15 ^c	8.13±0.28 ^a	6.23±0.12 ^c	7.66±0.33 ^{ab}	8.00±0.11 ^a	7.85±0.16 ^{ab}
C18:1n9	1.78±0.16 ^a	1.83±0.05 ^a	1.82±0.12 ^a	1.80±0.08 ^a	0.90±0.01 ^b	0.90±0.01 ^b	1.71±0.17 ^a	0.93±0.03 ^b	1.88±0.07 ^a	0.82±0.06 ^c	0.71±0.02 ^d	0.80±0.02 ^c
C18:1n7	3.36±0.03 ^b	3.46±0.15 ^{ab}	3.25±0.13 ^b	3.65±0.12 ^a	3.25±0.14 ^b	2.96±0.16 ^{bc}	3.37±0.12 ^b	2.96±0.16 ^{bc}	3.63±0.21 ^{ab}	2.78±0.07 ^c	2.76±0.05 ^c	2.84±0.06 ^c
C18:2n6	0.90±0.13 ^b	0.96±0.02 ^b	0.99±0.08 ^{ab}	0.89±0.05 ^b	0.44±0.10 ^{cd}	0.56±0.08 ^c	0.89±0.17 ^{ab}	0.51±0.09 ^{cd}	1.07±0.03 ^a	0.42±0.02 ^d	0.38±0.06 ^d	0.47±0.05 ^{cd}
C18:3n3	0.57±0.03 ^b	0.64±0.13 ^{ab}	0.57±0.01 ^b	0.62±0.06 ^c	0.38±0.10 ^c	0.32±0.07 ^c	0.55±0.01 ^b	0.56±0.22 ^{bc}	0.61±0.01 ^a	0.41±0.04 ^c	0.38±0.04 ^c	0.45±0.06 ^c
C18:4n3	3.92±0.19 ^b	3.75±0.10 ^b	3.73±0.10 ^b	4.68±0.17 ^a	2.87±0.09 ^{de}	2.97±0.10 ^{de}	3.68±0.60 ^{bc}	2.56±0.12 ^f	3.91±0.22 ^b	3.23±0.01 ^c	2.75±0.13 ^{cd}	3.07±0.13 ^{cd}
C20:1	3.56±0.93 ^{de}	4.36±0.13 ^d	3.99±0.13 ^c	3.93±0.17 ^c	4.98±0.05 ^c	5.15±0.19 ^b	4.07±0.13 ^c	5.16±0.06 ^b	3.84±0.09 ^c	5.21±0.56 ^{ab}	5.78±0.69 ^{ab}	5.81±0.53 ^a
C20:2n6	1.12±0.03 ^a	0.75±0.07 ^c	0.66±0.02 ^c	0.66±0.03 ^c	0.92±0.23 ^{ab}	0.72±0.08 ^c	0.69±0.01 ^c	0.86±0.14 ^b	0.65±0.04 ^c	0.70±0.03 ^c	0.55±0.02 ^d	0.86±0.05 ^b
C20:4n6	1.36±0.04 ^d	1.22±0.05 ^c	1.38±0.05 ^d	1.15±0.07 ^c	1.61±0.02 ^c	1.67±0.11 ^{bc}	1.29±0.13 ^{de}	2.28±0.22 ^a	1.48±0.12 ^{cd}	1.68±0.05 ^b	1.75±0.09 ^b	1.68±0.11 ^{bc}
C20:4n3	0.71±0.03 ^d	0.79±0.07 ^{bc}	0.63±0.04 ^c	0.79±0.01 ^c	0.86±0.05 ^b	1.03±0.06 ^c	0.65±0.02 ^c	1.14±0.11 ^a	0.78±0.05 ^{bc}	0.99±0.17 ^{ab}	0.89±0.03 ^b	0.91±0.04 ^b

• 续表1 •

脂肪酸 fatty acid	家系编号 family codes											
	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B09	B10	B11	B12
C20:5n3	25.33±0.28 ^b	24.85±0.11 ^c	25.91±0.28 ^b	24.94±0.29 ^c	26.06±0.14 ^a	26.71±0.15 ^a	25.99±0.44 ^b	25.05±0.49 ^{b,c}	26.22±0.51 ^a	25.89±0.83 ^{b,c}	26.73±0.34 ^a	26.21±0.26 ^a
C22:3n6	1.53±0.12 ^{cd}	1.51±0.04 ^c	1.46±0.03 ^d	1.56±0.03 ^c	1.59±0.12 ^{cd}	1.87±0.07 ^a	1.52±0.07 ^c	1.29±0.13 ^c	1.52±0.03 ^c	1.61±0.12 ^b	1.69±0.15 ^{ab}	1.54±0.12 ^{cd}
C22:5n3	0.83±0.03	0.84±0.07	0.86±0.10	0.78±0.02	0.73±0.03	0.80±0.20	0.87±0.08	0.76±0.17	0.86±0.05	0.75±0.02	0.83±0.27	0.82±0.15
C22:6n3	21.73±0.25 ^b	22.24±0.19 ^a	22.03±0.06 ^a	20.74±0.52 ^c	22.01±0.22 ^a	22.35±0.15 ^a	22.2±0.39 ^a	22.12±0.35 ^a	20.69±0.34 ^c	21.84±0.24 ^b	22.61±0.56 ^c	22.51±0.24 ^a
SFA	27.04±0.14	27.31±0.27	26.85±0.70	27.22±0.32	29.46±0.20	28.16±0.20	26.46±0.55	30.06±0.38	26.85±0.60	29.48±1.06	28.75±0.04	28.56±0.46
MUFA	11.57±0.70	12.43±0.24	11.83±0.10	12.99±0.46	11.37±0.28	11.30±0.13	12.02±0.20	11.00±0.14	12.61±0.27	11.28±0.79	11.25±0.81	11.42±0.48
PUFA	58.47±0.99	58.00±0.27	58.63±0.35	57.24±0.60	58.86±0.48	60.30±0.18	58.79±0.72	58.58±0.56	58.20±0.41	59.00±1.06	59.77±0.75	59.81±0.28
ω-3	53.56±0.21	53.57±0.33	54.14±0.35	52.98±0.61	54.31±0.29	55.48±0.29	54.40±0.84	53.64±0.12	53.49±0.31	54.59±1.09	55.40±0.89	55.26±0.35
ω-6	4.91±0.81	4.44±0.07	4.49±0.16	4.26±0.07	4.55±0.28	4.82±0.14	4.39±0.26	4.94±0.44	4.71±0.14	4.41±0.10	4.38±0.17	4.55±0.09

注：数值右肩不同字母表示家系之间差异显著 ($P < 0.05$)

Notes: values with different letters indicate significant difference between families ($P < 0.05$)

以及C16:4n3、C18:2n6、C18:3n3、C18:4n3、C20:2n6、C20:4n6、C20:4n3、C20:5n3(EPA)、C22:3n6、C22:5n3、C22:6n3(DHA)等11种多不饱和脂肪酸(PUFA), 且特点为PUFA>SFA>MUFA(图2)。其中PUFA占比为57%~60%, SFA为26%~30%, MUFA为11%~13%。在SFA中C16:0约占脂肪酸总量的16%~18%, C18:0次之, 约占6%~8%; MUFA主要是C20:1最高(4%~6%); 在PUFA中EPA最高, DHA次之, 二者之和约占脂肪酸总量的45%~49%(表1)。家系B11的EPA+DHA最高, 占脂肪酸总量的49.34%, 与家系B06、B12、B07、B05、B10、B03差异不显著, 家系B04的EPA+DHA最低(45.68%), 显著低于其余各家系($P<0.05$)(图3)。各家系PUFA中 $\omega-3/\omega-6$ 的比值为10.94~12.69; 家系B11的 $\omega-3/\omega-6$ 最大(12.69), 与家系B01、B02、B03、B04、B05、B07、B10、B12差异不显著, 家系B11、B10、B07和B04显著高于家系B06、B08、B09($P<0.05$), 且家系B08的 $\omega-3/\omega-6$ 最低(10.94), 显著低于其余各家系($P<0.05$)。

2.3 家系生长与脂肪酸组成的相关性

虾夷扇贝不同家系的闭壳肌出柱率与EPA+DHA、 $\omega-3/\omega-6$ 不具有显著线性相关性($P>0.05$, $n=12$)(图4), 其线性方程式分别为 $y=-5.255x+50.125$ ($R^2=0.024$), $y=4.468x+9.986$ ($R^2=0.072$), 表明扇贝家系闭壳肌的生长与脂肪酸EPA+DHA的积累、 $\omega-3/\omega-6$ 比值变化无关。

3 讨论

家系选育是水产动物选择育种的重要手段,

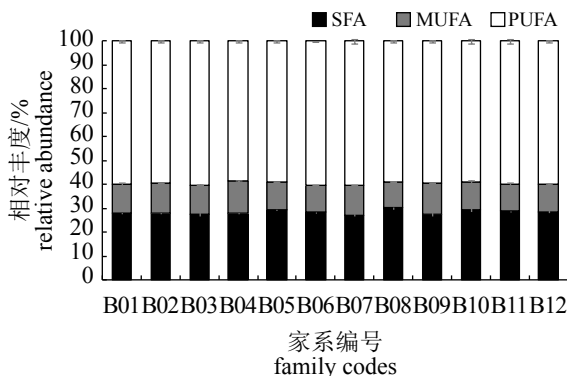


图2 虾夷扇贝各家系闭壳肌SFA、MUFA和PUFA相对丰度比较

Fig. 2 Relative abundances of SFA, MUFA and PUFA in adductor muscles of distinct *P. yessoensis*

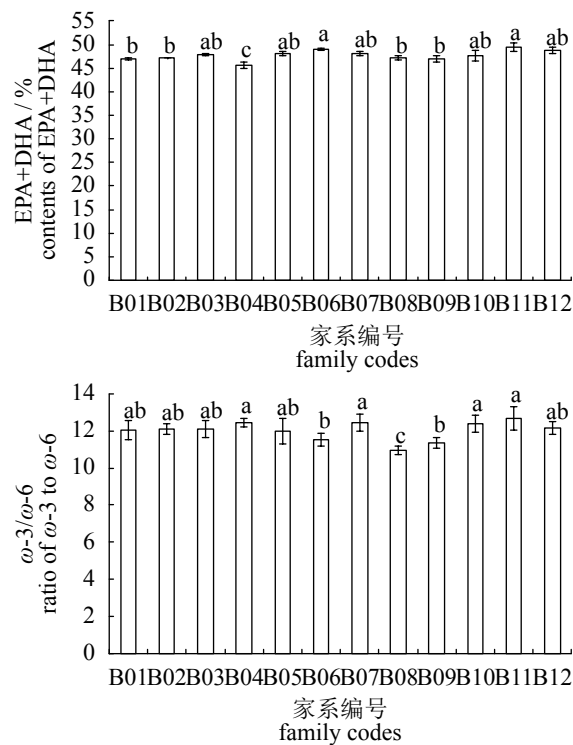


图3 虾夷扇贝各家系闭壳肌脂肪酸EPA+DHA含量与 $\omega-3/\omega-6$ 比值

Fig. 3 Relative percentages of EPA and DHA in total fatty acids and the ratio of $\omega-3/\omega-6$ fatty acids in adductor muscles of distinct *P. yessoensis* families

被广泛应用于水产业的种质改良^[32]。目前有关虾夷扇贝的人工选育还主要集中在生长、壳色、存活率等性状, 对可食用部分的营养价值进行育种研究的报道较少。丁君等^[33]对选育的“象牙白”品系(双壳白色)与普通群体虾夷扇贝的营养成分进行了比较分析, 发现在一些重要营养成分上“象牙白”扇贝已表现出分化。王庆志等^[18]以存活率为考察指标开展了虾夷扇贝的耐高温品系选育与早期筛查工作, 发现不同家系的耐高温性差异显著, 耐高温这一性状受遗传因素影响较大, 并且家系生长与存活没有明显相关性。张存善等^[15]通过对33个全同胞家系的壳长、壳高、壳宽和活体体质量的生长进行动态跟踪, 发现不同家系间的生长性状差异极显著, 分别有壳高与活体质量生长快速的家系。Liang等^[34]利用歧化选择法构建了壳高的上选家系和下选家系, 通过一代选育即可使虾夷扇贝壳高生长速率提高7.85%。闭壳肌是扇贝的主要可食用部位, 也是扇贝的重要经济性状, 其营养价值和出柱率可作为家系选育的重要指标, 如张存善

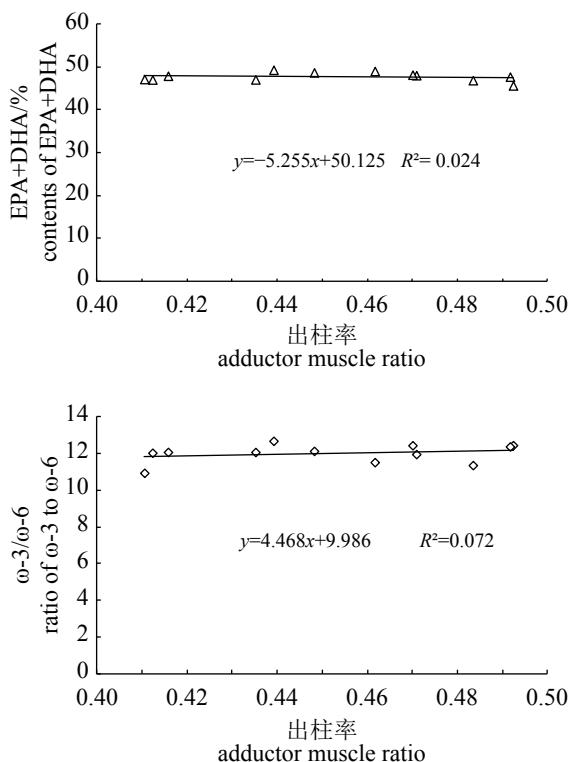


图4 虾夷扇贝家系闭壳肌出柱率与 EPA+DHA、 $\omega-3/\omega-6$ 的相关性

Fig. 4 Correlation of adductor muscle ratio with EPA+DHA and $\omega-3/\omega-6$ in distinct *P. yessoensis* families

等^[35]在研究虾夷扇贝形态性状对软体部重和闭壳肌重的影响时,发现壳宽是闭壳肌重的主要影响因素。本实验以虾夷扇贝闭壳肌干重与脂肪酸组成为主要筛选指标,辅以壳长、壳高、壳宽、活体湿重等生长性状为补充筛选指标综合分析进行家系选育。本研究中B04、B05和B10号家系在壳长、壳高、壳宽、湿重、闭壳肌干重以及出柱率等性状同时显示出最大优势;家系B06和B07的闭壳肌干重次之,但相比其他家系优势仍然明显,其余性状指标与家系B04、B05、B10差异不显著;表明在12个选育家系中,B04、B05、B06、B07和B10号家系的生长速率相对最快,特别是B04、B05和B10号家系闭壳肌的增重优势更为明显。

脂肪酸是脂类的主要组分,能够为所有营养水平的代谢提供能量,常作为细胞间的信号物质,在生命体中发挥着重要作用。但除了少数动物,多不饱和脂肪酸(如EPA和DHA)几乎完全由植物合成^[36]。EPA是一种优良的生物能源前体,DHA参与生物膜结构和功能的维护,二者

对于食物链各营养级上的所有动物,包括浮游生物、无脊椎动物、鱼类乃至人类的健康至关重要^[37-38]。人体自身不能合成EPA和DHA这类必需脂肪酸,只能通过食物来摄取。食物中的含量越多营养价值越高。近年来不断有研究报道水产动物家系间的肌肉营养成分差异及其选育,以期通过选择育种对肌肉品质进行遗传改良,并把脂肪酸作为人工选育的重要指标之一。张永珍等^[39]对半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)不同家系肌肉中脂肪酸组成与含量进行了比较,发现15个家系的EPA和DHA含量具有显著性差异,并筛选出3个高EPA+DHA含量的家系。李明云等^[40]测定了4个家系大黄鱼(*Larimichthys crocea*)肌肉中脂肪酸含量,发现不同家系间PUFA、EPA、DHA的含量存在差异。本研究中不同虾夷扇贝家系闭壳肌的脂肪酸含量差异显著,闭壳肌的EPA+DHA占总脂肪酸45%以上,其中B11最高达49.34%,与B03、B05、B06、B07、B10和B12家系差异不明显,但显著高于其他家系,表明12个选育家系中B03、B05、B06、B07、B10、B11与B12家系在闭壳肌营养上具有更高的选育价值。根据营养学研究,人类饮食中的 $\omega-3/\omega-6$ 过去一直维持在1:2,现代健康膳食结构的 $\omega-3/\omega-6$ 应为1:4~1:6,而不合理的饮食习惯已经使 $\omega-3/\omega-6$ 脂肪酸摄入失调达到1:10,研究表明这样的变化易导致肥胖和患炎症类疾病的风险升高^[22, 41]。开展高脂肪酸闭壳肌扇贝良种选育工作,有利于促进高附加值海洋保健产品开发和 $\omega-3/\omega-6$ 脂肪酸摄入不平衡现状的改善。本研究中不同家系扇贝闭壳肌 $\omega-3/\omega-6$ 的比值存在显著差异,其值范围在10.94~12.69之间,其中家系B11的 $\omega-3/\omega-6$ 最大,为12.69,与家系B01、B02、B03、B04、B05、B07、B10、B12差异不显著,但显著高于B06、B08和B09家系。家系间闭壳肌脂肪酸含量存在显著差异的结果表明,开展高品质脂肪酸闭壳肌虾夷扇贝的良种选育应是可行的。

研究中虾夷扇贝生长速率快的家系与生长速率慢的家系相比,其SFA、MUFA和PUFA没有表现出明显差异,这与虾夷扇贝二倍体与三倍体的闭壳肌脂肪酸组成结果类似^[20]。本实验选取的12个家系是在相同的养殖环境下摄食、生长与发育的结果,分析时采用混合样品(每个家系取30枚扇贝样品混合测定)基本排除了个体间差异。因此,家系间脂肪酸组成的差异可能主要受遗传

因素影响, 这与不同家系大黄鱼肌肉脂肪酸的研究结果相近^[40, 42]。本研究中家系间脂肪酸组成差异总体不大, 可能与所用家系数量较少有关, 今后开展进一步相关选育时应构建较多数量的家系。此外, 有关脂肪酸组成与水产动物其他性状相关性的报道较少, 目前仅见张永珍等^[39]报道的EPA含量与半滑舌鲷性别不具有相关性, 而DHA含量与鱼体性别表现出一定相关性, 并强调二者与半滑舌鲷性别的相关性有待扩大样本量进行研究与验证。本研究发现不同家系间闭壳肌的出柱率与EPA+DHA、 ω -3/ ω -6之间不具有显著相关性, 即扇贝的生长与闭壳肌的主要脂肪酸组成没有明显相关关系。因此, 在进行虾夷扇贝生长相关选择育种时, 可以结合扇贝闭壳肌的脂肪酸含量开展复合性状选育。

参考文献:

- [1] Wang S, Zhang J B, Jiao W Q, *et al.* Scallop genome provides insights into evolution of bilaterian karyotype and development[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(5): 120.
- [2] Ivin V V, Kalashnikov V Z, Maslennikov S I, *et al.* Scallop fisheries and aquaculture of northwestern Pacific, Russian Federation[M]//Shumway S E, Parsons G J. *Scallops: Biology, Ecology and Aquaculture*. 2nd ed. Boston: Elsevier Science, 2006: 1163-1224.
- [3] Kosaka Y, Ito H. Japan[M]//Shumway S E, Parsons G J. *Scallops: biology, ecology and aquaculture*. 2nd ed. Boston: Elsevier Science, 2006: 1093-1141.
- [4] Hardy D. *Scallop farming*[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2006.
- [5] 张福绥, 何义朝, 马江虎, 等. 虾夷扇贝的引种、育苗及试养[J]. *海洋科学*, 1984, 8(5): 38-45.
- Zhang F S, He Y C, Ma J H, *et al.* The introduction of the Japanese scallop, *Patinopecten yessoensis* (Jay), into China, its spat-rearing and experimental cultivation[J]. *Marine Sciences*, 1984, 8(5): 38-45(in Chinese).
- [6] 王庆成. 虾夷扇贝的引进及其在我国北方增养殖的前景[J]. *水产科学*, 1984(4): 24-27.
- Wang Q C. Introduction of Japanese scallop and prospect of culture it in northern China[J]. *Fisheries Science*, 1984(4): 24-27(in Chinese).
- [7] 李文姬, 薛真福. 持续发展虾夷扇贝的健康增养殖[J]. *水产科学*, 2005, 24(9): 49-51.
- Li W J, Xue Z F. Healthy sustainable proliferation & cultivation of scallop *Patinopecten yessoensis*[J]. *Fisheries Science*, 2005, 24(9): 49-51(in Chinese).
- [8] Gosling E. *Marine Bivalve Molluscs*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2015: 355-359.
- [9] 倪守胜, 杨钰, 柳淑芳, 等. 基于线粒体Cyt *b*基因的虾夷扇贝群体遗传结构分析[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(3): 432-439.
- Ni S S, Yang Y, Liu S F, *et al.* Population-genetics analysis of the Japanese scallop *Patinopecten yessoensis* based on mitochondrial Cyt *b* gene[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(3): 432-439(in Chinese).
- [10] 于佐安, 李文姬, 张明, 等. 大连市长海县虾夷扇贝养殖海区浮游病毒的丰度[J]. *水产学报*, 2011, 35(6): 911-917.
- Yu Z A, Li W J, Zhang M, *et al.* Distributions of virioplankton in the sea of raft culture of *Patinopecten yessoensis* in Changhai of Dalian[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(6): 911-917(in Chinese).
- [11] 于佐安, 李文姬, 张明, 等. 虾夷扇贝大规模死亡的流行病学研究及可能致病因子的探讨[J]. *中国海洋大学学报*, 2013, 43(6): 52-57.
- Yu Z A, Li W J, Zhang M, *et al.* Identification of possible pathogenic factors of massive mortality and its epidemiological investigation of cultured scallop (*Patinopecten yessoensis*)[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2013, 43(6): 52-57(in Chinese).
- [12] 于佐安, 谭克非, 张明, 等. 筏式虾夷扇贝养成期不同密度生长与经济效益分析[J]. *水产学报*, 2016, 40(10): 1624-1633.
- Yu Z A, Tan K F, Zhang M, *et al.* The analysis of growth and economic benefit at different density in the cultivation period of raft cultural scallop *Patinopecten yessoensis*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(10): 1624-1633(in Chinese).
- [13] 滕炜鸣, 李文姬, 张明, 等. 虾夷扇贝脓胞病原查氏弧菌的PCR快速检测[J]. *水产科学*, 2014, 33(10): 649-653.
- Teng W M, Li W J, Zhang M, *et al.* Rapid detection of pathogen *Vibrio chagasii* from abscess yesso scallop by PCR technique[J]. *Fisheries Science*, 2014, 33(10): 649-653(in Chinese).
- [14] 刘超, 吴富村, 林思恒, 等. 高温刺激导致虾夷扇贝死亡因素的探究[J]. *海洋科学*, 2016, 40(11): 91-98.

- Liu C, Wu F C, Lin S H, *et al.* Pilot study on reasons for yesso scallop's (*Patinopecten yessoensis*) survival after heat shock[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(11): 91-98(in Chinese).
- [15] 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*, 2008, 4(5): 44-50.
- 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): 44-50(in Chinese).
- [16] 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.
- 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(in Chinese).
- [17] 孙欣, 梁峻, 赵学伟. 虾夷扇贝獐子岛红品系家系建立及生长发育的比较[J]. *水产科学*, 2016, 35(5): 510-515.
- Sun X, Liang J, Zhao X W. Establishment, family growth and development in Zhangzidao Hong strain of Yesso Scallop *Patinopecten yessoensis*[J]. *Fisheries Science*, 2016, 35(5): 510-515(in Chinese).
- [18] 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.
- 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(in Chinese).
- [19] 曹善茂, 王昊, 陈炜, 等. 岩扇贝闭壳肌营养成分的分析及与中国3种扇贝的比较[J]. *大连海洋大学学报*, 2016, 31(5): 544-550.
- Cao S M, Wang H, Chen W, *et al.* Analysis, evaluation and comparison of nutritive composition in rock scallop *Crassadoma gigantean* with three Chinese scallops[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2016, 31(5): 544-550(in Chinese).
- [20] 陈炜, 高悦勉, 孙征. 虾夷扇贝二倍体与三倍体脂肪酸组成的比较[J]. *水产学报*, 2002, 26(2): 139-142.
- Chen W, Gao Y M, Sun Z. Comparison of fatty acids composition between diploid and triploid Japanese scallop, *Patinopecten yessoensis*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, 26(2): 139-142(in Chinese).
- [21] Breivik H. Long-chain omega-3 specialty oils[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2007.
- [22] Weaver K L, Ivester P, Seeds M, *et al.* Effect of dietary fatty acids on inflammatory gene expression in healthy humans[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2009, 284(23): 15400-15407.
- [23] Farzaneh-Far R, Lin J, Epel E S, *et al.* Association of marine omega-3 fatty acid levels with telomeric aging in patients with coronary heart disease[J]. *JAMA*, 2010, 303(3): 250-257.
- [24] McDougale D R, Watson J E, Abdeen A A, *et al.* Anti-inflammatory ω -3 endocannabinoid epoxides[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(30): E6034-E6043.
- [25] Rizos E C, Ntzani E E, Bika E, *et al.* Association between omega-3 fatty acid supplementation and risk of major cardiovascular disease events: a systematic review and meta-analysis[J]. *JAMA*, 2012, 308(10): 1024-1033.
- [26] Andreone B J, Chow B W, Tata A, *et al.* Blood-brain barrier permeability is regulated by lipid transport-dependent suppression of caveolae-mediated transcytosis[J]. *Neuron*, 2017, 94(3): 581-594.
- [27] Ben-Zvi A, Lacoste B, Kur E, *et al.* Mfsd2a is critical for the formation and function of the blood-brain barrier[J]. *Nature*, 2014, 509(7501): 507-511.
- [28] Niinistö S, Takkinen H M, Erlund I, *et al.* Fatty acid status in infancy is associated with the risk of type 1 diabetes-associated autoimmunity[J]. *Diabetologia*, 2017, 60(7): 1223-1233.
- [29] Zamroziewicz M K, Paul E J, Rubin R D, *et al.* Anterior cingulate cortex mediates the relationship between O3PUFAs and executive functions in APOE e4 carriers[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2015, 7: 87.
- [30] FAO. The state of world fisheries and aquaculture[M]. Rome Italy: FAO, 2016.
- [31] Christie W W, Han X L. Lipid analysis: isolation, separation, identification and lipidomic analysis[M]. 4th ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2010.
- [32] Gjedrem T, Baranski M. Selective breeding in aquaculture: an introduction[M]. New York: Springer Netherl-

- ands, 2009.
- [33] 丁君, 常亚青, 张婧, 等. 虾夷扇贝“象牙白”品系与普通品系营养成分分析及评价[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(2): 121-128.
- Ding J, Chang Y Q, Zhang J, *et al.* Analysis and evaluation of nutritive composition in “Ivory” strains and ordinary strains of *Mizuhopecten yessoensis*[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(2): 121-128(in Chinese).
- [34] 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.
- [35] 张存善, 常亚青, 曹学彬, 等. 虾夷扇贝体形性状对软体重和闭壳肌重的影响效果分析[J]. 水产学报, 2009, 33(1): 87-94.
- Zhang C S, Chang Y Q, Cao X B, *et al.* Analysis of effect of body shape traits on soft-tissue weight and adductor weight in *Patinopecten yessoensis* Jay[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(1): 87-94(in Chinese).
- [36] Neves M, Castro B B, Vidal T, *et al.* Biochemical and populational responses of an aquatic bioindicator species, *Daphnia longispina*, to a commercial formulation of a herbicide (Primextra® Gold TZ) and its active ingredient (*S*-metolachlor)[J]. Ecological Indicators, 2015, 53: 220-230.
- [37] Saito H, Aono H. Characteristics of lipid and fatty acid of marine gastropod *Turbo cornutus*: high levels of arachidonic and *n*-3 docosapentaenoic acid[J]. Food Chemistry, 2014, 145: 135-144.
- [38] da Costa F, Robert R, Quéré C, *et al.* Essential fatty acid assimilation and synthesis in larvae of the bivalve *Crassostrea gigas*[J]. Lipids, 2015, 50(5): 503-511.
- [39] 张永珍, 杨英明, 王磊, 等. 半滑舌鳎不同家系肌肉中脂肪酸含量的分析[J]. 中国水产科学, 2016, 23(2): 417-424.
- Zhang Y Z, Yang Y M, Wang L, *et al.* Comparative study of the muscle fatty acid composition of different families of half smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(2): 417-424(in Chinese).
- [40] 李明月, 郑岳夫, 管丹东, 等. 大黄鱼四家系肌肉营养成分差异及品质选育分析[J]. 水产学报, 2009, 33(4): 632-638.
- Li M Y, Zheng Y F, Guan D D, *et al.* The nutrition of fatty acid and amino acid analysis of four genealogies *Pseudosciaena crocea* (Richardson)[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(4): 632-638(in Chinese).
- [41] Massiera F, Barbry P, Guesnet P, *et al.* A Western-like fat diet is sufficient to induce a gradual enhancement in fat mass over generations[J]. Journal of Lipid Research, 2010, 51(8): 2352-2361.
- [42] 林利民, 王秋荣, 王志勇, 等. 不同家系大黄鱼肌肉营养成分的比较[J]. 中国水产科学, 2006, 13(2): 286-291.
- Lin L M, Wang Q R, Wang Z Y, *et al.* Comparison of biochemical compositions of muscle among three stocks and wild-caught large yellow croaker *Pseudosciaena crocea*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(2): 286-291(in Chinese).

Comparative study of the adductor muscle ratio and fatty acid composition in selective breeding families of Japanese scallop (*Patinopecten yessoensis*)

XIE Xi¹, WANG Qingzhi^{1*}, XU Youshen², TENG Weiming¹, CHEN Wei²,
LIU Weidong¹, YU Zuo'an¹, ZHANG Ming¹, ZHOU Zunchun¹

(1. Dalian Key Laboratory of Genetic Resources for Marine Shellfish,

Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute, Dalian 116023, China;

2. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: Family selection has emerged as the essential manner of selective breeding in aquaculture. The current artificial selection for Japanese scallop (*Patinopecten yessoensis*) is primarily focused on the apparent characters, e.g. growth, shell color and survival rate. However, the selective breeding in terms of nutritional value of adductor muscle has been rarely reported. Based on the adductor muscle dry weight and fatty acid profile of *P. yessoensis*, the families harboring higher growth rates were screened out initially and the vital nutritional indicators, i.e. the relative abundances of EPA as well as DHA of total fatty acids, and the ratio of ω -3/ ω -6 fatty acids, were further assessed. Among a total of 12 selected families, the growth rates and adductor muscle ratio of B04, B05 and B10 were prominently higher than other families. The relative abundances of EPA and DHA of total fatty acids were all above 45% and the ratio of ω -3/ ω -6 fatty acids varied between 10.94 and 12.69 in any individual family. The families, B03, B05, B06, B07, B10, B11 and B12, exhibited superior nutritional performance involving fatty acids of adductor muscle. The highest-quality families of *P. yessoensis*, i.e. B05 and B10, were successfully selected on a basis of the comprehensive comparative analyses. These results revealed that it was feasible to perform artificial selection in terms of the growth performance and the equally critical fatty acid composition of *P. yessoensis*. This study provides valuable insights into selective breeding of scallops in aquaculture.

Key words: *Patinopecten yessoensis*; family; selective breeding; adductor muscle; fatty acid

Corresponding author: WANG Qingzhi. E-mail: wqzlm@126.com

Funding projects: Liaoning Science and Technology of China (2017203006); National Natural Science Foundation of China (31302186); Dalian High Level Innovative Talents Support Plan (2016RQ081); Liaoning Fisheries Science and Technology Program (201818); PhD Research Initiated Fund Project in Liaoning Province (201601387); China Agriculture Research System (CARS-49)