

文章编号: 1000-0615(2019)07-1626-09

DOI: 10.11964/jfc.20180611324

草鱼体脂性状的变异特征及相关性

姜鹏^{1*}, 卢薛², 李胜杰¹, 可小丽¹,
马冬梅¹, 樊佳佳¹, 王俊杰¹

(1. 中国水产科学研究院珠江水产研究所,
农业农村部热带亚热带水产资源利用与养殖重点实验室, 广东广州 510380;
2. 广东海大集团股份有限公司畜牧水产研究中心, 海大中央研究院,
农业农村部微生态资源养殖利用重点实验室, 广东广州 511400)

摘要: 为探究草鱼体脂性状的变异特征及相关性, 采用数理统计方法对296尾17月龄草鱼的15个数量性状指标进行综合分析评价。结果显示, 草鱼体脂性状(腹脂指数IPF、肝脏粗脂肪含量HLC、肌肉粗脂肪含量MLC)具有丰富的变异特征, 变异系数范围为21.30%~47.04%。相关分析发现, 草鱼3个体脂性状之间呈现显著正相关, 表明草鱼脂质沉积在不同组织中具有一定的同步性。进一步的因子与聚类分析显示, 观测的15个草鱼数量性状大致分为4类, 包括体型因子、体尺因子、脏器指数因子和体脂含量因子, 其中IPF归属于脏器指数因子, HLC和MLC二者组成体脂含量因子。多元统计分析发现, 草鱼形态性状对3个体脂性状变异的解释量范围为7.45%~24.83%, 相较而言, 矢状面体型SS可在一定程度上预测体脂性状。研究表明, 草鱼体脂性状具备较大的选育潜力, 其中IPF整体显示出较好的关联性, 可作为代表性目标性状用于育种实践。本研究为草鱼体脂性状选择育种提供了重要参考依据。

关键词: 草鱼; 体脂性状; 变异; 相关分析; 多元统计分析

中图分类号: S 965.112

文献标志码: A

草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)是我国重要的大宗淡水经济鱼类, 养殖产量约占国内淡水鱼养殖总量的20%, 列第1位^[1]。近年来, 草鱼养殖户普遍采用全程投喂配合颗粒饲料的集约化精养模式来追求经济效益。集约化养殖模式下, 草鱼生长速率快, 上市时间短, 但养殖过程中通常出现营养性脂肪肝、肠系膜脂肪组织和肌肉脂肪含量增加等体脂过度沉积问题^[2], 造成草鱼饲料利用率降低、肝胆综合征频发、体型短粗、肉质不佳等诸多不良影响^[3], 严重制约着草鱼养殖业的健康可持续发展。

目前改善鱼体脂肪过度沉积较为直接的方法是采用营养调控方式, 即通过合理投喂配比科学、

营养素均衡的饲料^[4-5], 或在日粮中适量添加高不饱和脂肪酸、胆碱等降脂因子来控制体脂含量^[6]。事实上, 遗传育种是改良动物体脂沉积的另一重要途径^[7-8]。如在畜牧业中, 为了降低猪的背膘厚度, 通过遗传改良成功培育出多个瘦肉型猪品种, 猪胴体脂肪率由起初的40%降到15%~20%^[9]。研究发现, 鱼类的体脂性状一般表现出中高等遗传力, 显示出较大的遗传改良潜力。例如, Tobin等^[10]研究的虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)脂质性状不仅表型变异大, 而且体脂重量、肌肉和鱼体脂肪含量3个性状平均遗传力达到0.4, 同等条件下蛋白质相关性状遗传力仅有0.18。基于此, Quillet等^[11]利用群体选育技术, 以肌肉脂

收稿日期: 2018-06-12 修回日期: 2019-01-08

资助项目: 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2019ZX-001); 广东省自然科学基金(2015A030313702); 现代农业产业技术体系专项(CARS-45-04)

通信作者: 姜鹏, E-mail: jiangpeng85@126.com

肪指数[*fat index*, FI=肌肉脂质含量/1g(体质量)]为指标, 经连续2代双向选育, 初步培育出高脂和低脂含量肌肉的虹鳟品系。上述案例表明了鱼类脂质性状遗传改良的可行性。

开展选育工作, 需要明确的目标性状。草鱼体脂主要存储于腹腔(肠系膜)、肝脏和肌肉组织中, 相应形成了腹腔脂肪指数和肝脏、肌肉脂肪含量等多个性状指标。然而, 这些体脂性状指标之间是否存在较好的线性关联, 哪一个更具代表性还是未知数。此外, 与体长、体高等外观性状相比, 体脂性状的测量通常需要牺牲活体, 其不易直接测定的特殊性增加了选育操作难度, 而选择一些易测的形态性状进行替代是否可行, 同样需要解析。因此, 本实验通过采集一批较大数量的草鱼样本, 借助数理统计分析, 探究草鱼体脂性状的变异特征与相关关系, 旨在为优质草鱼新品种的开发提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验鱼的构建与采集

繁殖用草鱼亲本为草鱼生长性状选育核心种群, 是源于长江和珠江流域收集的不同地理种群。2015年4月, 从中随机挑选性腺发育良好、体型健壮的雌、雄亲本各20尾进行催产繁殖。按照5雄×5雌的人工混合交配授精方式, 完成4个配组, 构建了预计含有100个草鱼家系的实验群体。环道孵化, 池塘培育苗种, 当个体平均体质量约50 g时, 随机取约8 000尾放入一口1.33 hm²的池塘继续养殖, 全程投喂草鱼专用膨化颗粒饲料。待到2016年9月(17月龄), 实验鱼平均体质量达到1.5 kg商品规格时, 随机取300尾个体用于本实验性状测量(含4尾畸形个体, 后被剔除)。

1.2 性状的测量与计算

实验草鱼在饥饿1 d后开始性状测量。外部可量性状的测定参照国标《养殖鱼类种质检测》第3部分内容(GB/T 18654.3—2008)^[12]。草鱼肌肉粗脂肪含量(*muscle lipid content*, MLC)和肝胰脏粗脂肪含量(*hepatopancreas lipid content*, HLC)的测定参考国标《食品安全国家标准食品中脂肪的测定》(GB 5009.6—2016)^[13]的索式抽提法, 利用FOSS全自动索氏脂肪抽提仪完成。

体长(*body length*, BL)、体高(*body height*,

BH)、体宽(*body width*, BWD)和肠道长4个性状, 采用数显游标卡尺测量, 精确到0.01 cm。体质量(*body weight*, BW)、内脏重、肝胰脏重、肠道重(不含脂肪)和肠系膜脂肪重5个性状, 采用电子天平称量, 精确到0.01 g。肌肉组织样本采自鱼体背鳍以下、侧线鳞以上的前端区域; 肝组织样本取自肝叶边缘部分。黏连在肠道外周的肠系膜脂肪组织, 采用刀片刮取并称量。生物学性状指标, 计算公式如下, 其中草鱼矢状面、横断面和冠状面体型^[14]示意图见图1。

肥满度(*condition factor*, CF, g/cm³)=体质量/体长³×100

脏体指数(*viscerosomatic index*, VSI, %)=内脏质量/体质量×100%

肝体指数(*hepatosomatic index*, HSI, %)=肝胰脏质量/体质量×100%

肠长指数(*intestinal length index*, ILI, %)=肠道长/体长×100%

肠体指数(*intestinosomatic index*, ISI, %)=肠道质量/体质量×100%

腹脂指数(*intraperitoneal fat index*, IPF, %)=肠系膜脂肪质量/体质量×100%

矢状面体型(*sagittal shape*, SS)=(BL-BH)/(BL+BH)

横断面体型(*transverse shape*, TS)=(BL-BWD)/(BL+BWD)

冠状面体型(*coronal shape*, CS)=(BH-BWD)/(BH+BWD)

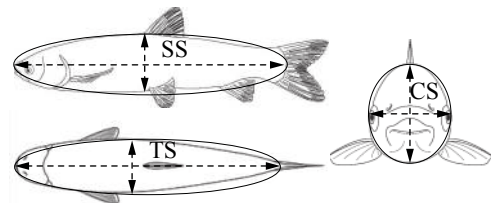


图1 草鱼矢状面SS、横断面TS和冠状面CS体型示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of body shape in the sagittal plane (SS), transverse plane (TS) and frontal plane (CS) for *C. idella*

1.3 数据分析

使用SPSS 19.0软件对观测性状数据进行描述统计、Pearson相关分析、因子与聚类分析。其中, 采用Kolmogorov-Smirnov检验判断数据正态

性；采用KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验变量是否适合因子分析，公因子的提取使用主成分法，按特征值大于1的标准确定，为了使因子易于解释和命名，采用方差最大正交旋转法对其进行旋转处理；R型聚类分析，即对观测指标变量的分类，采用组间连接法，度量尺度选用Pearson相关系数。线性模型中自变量(性状)的相对重要性采用R软件relaimpo程序包中的比例边缘方差分解法(proportional marginal variance decomposition, PMVD)进行估计^[15]。

2 结果

2.1 草鱼观测性状的变异特征

采集同塘养殖的296尾平均体质量为1.6 kg的草鱼个体进行15项指标测量与分析。所获观测值的描述性统计量见表1，经Kolmogorov-Smirnov检验，大多数符合正态分布。在15个性状中，IPF、HLC和MLC 3个重要体脂性状的变异系数最高，为21.30%~47.04%；脏体相关性状(VSI、HSI、ISI、ILI)以及BW、CS的变异系数较为接近，为10.13%~18.45%；而余下的形态相关性状(BL、BH、BWD、CF、SS、TS)变异系数则较低，为

1.43%~4.21%。从上述数据中可发现，草鱼体脂性状存在丰富的变异特征，蕴含较大的遗传改良潜力。

2.2 数量性状间的相关分析

草鱼各数量性状Pearson相关分析结果列于表2。BW、BWD、BH和BL 4个体尺性状间具有极显著正相关性($r = 0.40 \sim 0.85$, $P < 0.01$)；5个脏器指数性状(VSI、HSI、ISI、ILI和IPF)间也均为极显著正相关($r = 0.18 \sim 0.72$, $P < 0.01$)。在体型相关性状中，传统反映鱼体体型的肥满度指标CF与几何形态学指标SS、TS呈现极显著负相关($r = -0.80 \sim -0.90$, $P < 0.01$)，而与CS呈极显著正相关($r = 0.18$, $P < 0.01$)。对于IPF、HLC和MLC 3个体脂性状指标，三者之间均呈极显著正相关($r = 0.18 \sim 0.26$, $P < 0.01$)，其中IPF与其他2性状的关联程度较强。相对而言，IPF与形态性状间的整体相关性也较高。例如，IPF与SS相关系数绝对值最高达到0.41($P < 0.01$)；HLC与SS相关系数绝对值最高达到0.27($P < 0.01$)；MLC与BL相关系数最高达到0.17($P < 0.01$)。上述相关分析结果反映了草鱼的生物学特性，首次明晰了草鱼体脂性状间的相关关系。

表1 草鱼15个数量性状的描述性统计量

Tab. 1 Descriptive statistics of 15 quantitative traits in *C. idella*

性状 trait	均值 mean	标准差 SD	最小值 min value	最大值 max value	变异系数/% CV
体质量/g BW	1 610.93	163.17	1 008.00	2 058.00	10.13
体长/cm BL	46.54	1.95	39.39	51.86	4.18
体高/cm BH	10.27	0.43	8.38	11.24	4.21
体宽/cm BWD	7.43	0.36	6.16	8.47	4.80
肥满度/(g/cm ³) CF	1.60	0.11	1.36	1.93	6.65
矢状面体型 SS	0.64	0.01	0.60	0.67	2.13
横断面体型 TS	0.72	0.01	0.69	0.75	1.43
冠状面体型 CS	0.16	0.02	0.11	0.21	10.53
脏体指数/% VSI	7.83	0.80	5.95	10.28	10.22
肝体指数/% HSI	1.79	0.22	1.28	2.52	12.17
肠体指数/% ISI	1.65	0.30	0.56	3.77	18.45
肠长指数/% ILI	1.74	0.18	1.35	2.34	10.33
腹脂指数/% IPF	2.17	0.46	1.00	3.67	21.30
肝胰脏粗脂肪含量/% HLC	7.83	3.69	2.75	24.05	47.04
肌肉粗脂肪含量/% MLC	0.21	0.08	0.07	0.50	37.71

表 2 草鱼15个数量性状的相关分析

Tab. 2 Correlation analysis of 15 quantitative traits in *C. idella*

性状 trait	BW	BL	BH	BWD	CF	SS	TS	CS	VSI	HSI	ISI	ILI	IPF	HLC	MLC
BW	1														
BL	0.85**	1													
BH	0.75**	0.40**	1												
BWD	0.80**	0.54**	0.71**	1											
CF	-0.05	-0.57**	0.41**	0.23**	1										
SS	0.08	0.54**	-0.55**	-0.16**	-0.90**	1									
TS	-0.07	0.37**	-0.40**	-0.59**	-0.80**	0.70**	1								
CS	-0.19**	-0.25**	0.23**	-0.52**	0.18**	-0.44**	0.33**	1							
VSI	-0.12*	-0.31**	0.24**	-0.15*	0.40**	-0.50**	-0.14*	0.49**	1						
HSI	-0.04	-0.17**	0.21**	-0.05	0.26**	-0.35**	-0.12*	0.32**	0.71**	1					
ISI	0.05	-0.10	0.24**	0.01	0.27**	-0.31**	-0.11	0.28**	0.60**	0.34**	1				
ILI	0.02	-0.04	0.19**	0.02	0.11	-0.21**	-0.07	0.20**	0.41**	0.20**	0.18**	1			
IPF	-0.23**	-0.36**	0.08	-0.20**	0.33**	-0.41**	-0.14*	0.37**	0.72**	0.46**	0.09	0.34**	1		
HLC	-0.00	-0.12*	0.17**	0.02	0.24**	-0.27**	-0.15*	0.18**	0.25**	0.27**	0.08	0.02	0.25**	1	
MLC	-0.11	-0.17**	-0.07	-0.11	0.16*	-0.10	-0.05	0.07	0.18**	0.17**	-0.04	-0.04	0.26**	0.18**	1

注: “*”表示相关性达到显著水平($P < 0.05$); “**”表示相关性达到极显著水平($P < 0.01$)

Notes: “*” indicates significant correlation at the level of 0.05; “**” indicates highly significant correlation at the level of 0.01

2.3 因子分析

为了进一步观测性状间的关系结构, 对草鱼15个性状指标进行KMO检验, 统计值为0.625 (大于最低标准0.5), 表明数据集适合因子分析。运算结果显示, 采用主成分分析法, 根据特征值大于1的原则提取了5个公因子, 其特征值分别为3.22、3.16、2.22、2.00、1.50, 解释了原有15个可量数量性状80.60%的变异, 包含了所测草鱼性状的大部分信息。为了更加明确各公因子的含义, 以最大方差法进行因子轴正交旋转, 得到旋转因子载荷矩阵。从表3可以看出, 第1公因子(F_1)主要由CF、SS和TS组成, 其载荷值分别为0.93、-0.86、-0.93, 可将其称为体型因子; 第2公因子(F_2)主要由BW、BWD、BH和BL组成, 其载荷值分别为0.98、0.85、0.82、0.81, 可称之为体尺因子; 第3公因子(F_3)主要由ILI、VSI、IPF和HSI组成, 其载荷值分别为0.78、0.76、0.69、0.57, 可称之为脏器指数因子; 第4公因子(F_4)包含关联CS和ISI, 其载荷值分别为0.87、0.57, 考虑二者共性方差的大小, 将其称为冠状面体型因子; 第5公因子(F_5)主要由MLC和HLC组成, 其载荷值

分别为0.74、0.66, 可称之为体脂含量因子。

2.4 R型聚类分析

采用系统聚类的组间连接法, 度量标准选择Pearson相关性, 得出15个性状指标的系统聚类树状图(图2)。15个性状指标分为4类较为合理: 第I类群中BW、BL、BH和BWD 4个性状较早聚为一支, 它们代表草鱼体尺性状; 第II类群中大多是脏器指数性状, 其中IPF先与VSI聚为一支, 表明二者之间较高的相关系数($r = 0.72$), 然后再与HSI等5个指标性状聚合; 第III类群反映体脂含量性状, 包括HLC和MLC, 二者较晚聚为一支; 第IV类群反映体型性状, 包括SS和TS。R型聚类结果基本反映出性状间的相关性, 与因子分析结果也较为接近, 其中相关系数高的性状, 最先聚为一支, 然后再与其他同类性状合并为一支。

2.5 草鱼形态性状对体脂性状的影响效果

选择BW、BL等8个形态性状作为自变量, IPF、HLC和MLC 3个体脂性状分别作为因变量, 建立多元线性回归模型, 由于自变量间存在多重共

表 3 方差最大正交旋转后的主因子载荷矩阵

Tab. 3 Varimax orthogonal rotated component matrix for the principal component analysis

性状 trait	因子载荷值 factor loading values				
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
BW	-0.09	0.98	-0.05	-0.03	-0.02
BL	-0.56	0.81	-0.11	-0.11	-0.09
BH	0.38	0.82	0.11	0.32	0.06
BWD	0.36	0.85	-0.02	-0.35	-0.07
CF	0.93	-0.01	0.13	0.16	0.15
SS	-0.86	-0.02	-0.20	-0.39	-0.14
TS	-0.93	-0.17	-0.08	0.29	-0.02
CS	-0.03	-0.19	0.17	0.87	0.16
VSI	0.21	-0.05	0.76	0.47	0.22
HSI	0.12	0.04	0.57	0.33	0.36
ISI	0.20	0.12	0.32	0.57	-0.20
ILI	0.03	0.06	0.78	0.00	-0.23
IPF	0.17	-0.21	0.69	0.13	0.40
HLC	0.17	0.09	-0.02	0.23	0.66
MLC	0.02	-0.12	0.14	-0.18	0.74
特征值 eigenvalues	3.22	3.16	2.22	2.00	1.50
贡献率/% contribution rate	21.50	21.04	14.77	13.33	9.96
累计贡献率/% accumulative contribution rate	21.50	42.54	57.31	70.63	80.60

注：加粗字体用于指示各公共因子中的主要变量

Notes: bold fonts are used to indicate the main variables contained in the common factors

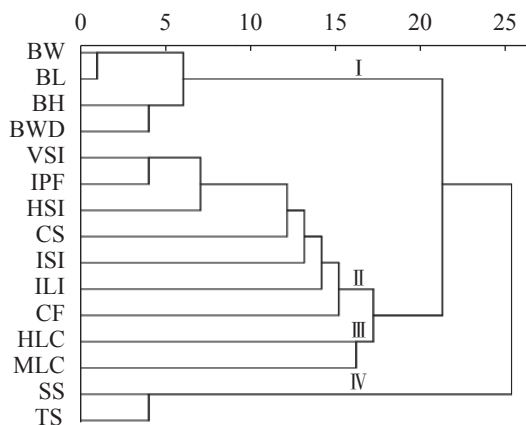


图 2 草鱼 15 个数量性状的 R 型聚类图

Fig. 2 Dendrogram of R-cluster analysis of 15 quantitative traits in *C. idella*

线性问题，选用比例边缘方差分解法(PMVD)，计算各自变量对因变量(决定系数 R^2)的贡献比例，

即评估草鱼各形态性状对体脂性状的相对重要性。8 个形态性状对 IPF、HLC、MLC 3 个体脂性状总的决定系数分别为 24.83%、9.08% 和 7.45%，其中矢状面体型 SS 对 IPF 和 HLC 的影响最大，占总解释量的 60.02%、68.73%；肥满度 CF 对 MLC 的影响最大，占总解释量的 40.47%。综合分析，形态性状可解释体脂性状的变异程度不高，相对而言，矢状面体型 SS 可在一定程度上预测体脂性状(图 3)。

3 讨论

生物性状丰富的变异是品种选育的物质基础。本研究观测草鱼 15 个数量性状的变异系数，发现体脂性状(IPF、HLC 和 MLC)显示出最为丰富的变异特征(21.30%~47.04%)，预示草鱼脂性状蕴含较大的遗传改良潜力。如傅建军等^[16]对草鱼 4 月龄幼鱼肌肉成分的遗传参数估计，发现肌

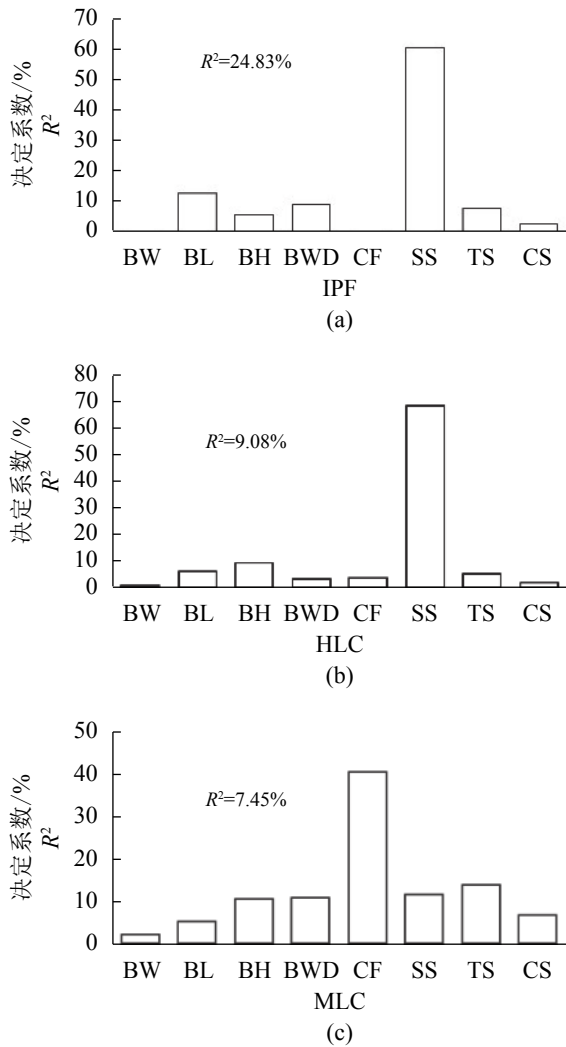


图3 草鱼形态性状对体脂性状的相对重要性

Fig. 3 Relative importance of morphological traits for lipid traits in *C. idella*

肉粗脂肪含量遗传力为 0.20, 变异系数达到 39.3%; 对比而言, 草鱼肌肉粗蛋白含量遗传力为 0.17, 变异系数为 14.9%。另外, 分析李杰^[17]的草鱼营养学实验数据, 当饲料中添加高不饱和脂肪酸 n-3 HUFA 降脂因子, 可有效降低草鱼脂质沉积, 但体脂性状变异系数却呈升高趋势 (29.75%~46.51%), 说明草鱼个体间脂质代谢能力存在明显差异。

生物作为一个有机整体, 各性状之间存在一定关联, 解析性状间的相关性, 可为育种目标的确定以及选择方案的制定提供依据。根据本研究相关分析结果, IPF、HLC 和 MLC 3 个体脂性状, 两两之间均呈现极显著正相关 ($r = 0.18 \sim 0.26$), 表明草鱼脂质沉积在这 3 个组织中具有同

步性, 而且这种同步性在形态指标中也得以体现。例如, 常被用于反映鱼体肥满度的性状 CF 与 3 个体脂性状均呈显著正相关, 证实了草鱼外观越肥, 鱼体脂质含量越高的感官判断。不过, 虽然体脂性状间呈现正相关关系, 但线性相关程度并不高, 这很可能是由于鱼体脂肪酸组成以及沉积模式存在组织差异造成的^[18]。研究还发现, 草鱼体尺性状 (BW、BL、BH 和 BWD) 间具有较高的相关性, 这与孙俊龙等^[19]、李玺洋等^[20]的研究结果一致。草鱼脏器指数、体型等性状的相关关系也符合预期的鱼类生长发育特征。需要说明的是, 本研究涉及的性状相关仅局限于表型分析, 表型相关可剖分为遗传相关和环境相关。通常认为, 遗传相关反映性状间的内在联系, 当相关的两性状均具有较高遗传力时, 表型相关则主要由遗传相关所决定^[21]。

为了进一步观测各性状指标间的关系结构, 本研究引入多元统计分析方法——因子与聚类分析, 二者都含有降维的思想。因子分析是将多个错综复杂的指标转化为少数几个主因子, 化简数据; 聚类分析异曲同工, 特点在于运算简单、结果直观^[22]。总体分析, 观测的 15 个草鱼数量性状大致分为 4 类: 体型因子、体尺因子、脏器指数因子和体脂含量因子。从统计学角度可知, 各公因子间是正交性 (不相关), 因子内各载荷值较大者则存在密切关联^[23]。对于本研究关注的体脂性状而言, IPF 与脏器指数公因子的载荷值最大, 且与该因子内载荷值较大的 VSI、HSI 和 ILI 呈正向关系, 载荷值等同于公因子与性状变量间的相关系数, 该结果意味着: 当减少肠系膜脂肪沉积时, 鱼体脏器指数将整体改善, 鱼体净肉率也相应得到提升, 这将丰富草鱼脂质性状遗传改良的价值与意义。此外, MLC 与 HLC 性状在体脂含量因子上均有较高的载荷值, 聚类分析二者也相聚为一类, 虽然相关分析显示 MLC 与 HLC 关联程度不高, 但通过因子分析, 发现了二者共同的潜变量 (latent variable), 可用于综合反映鱼体的粗脂肪含量水平, 由此计算的个体因子得分有助于优良种质资源筛选评价等研究^[24]。

相较于外部形态性状, 脂质性状的特殊性在于其不易直接测定, 精确测量需要牺牲活体, 这增加了育种实践难度, 因此有必要评估易度量性状指标的可替代性, 即在多元线性回归模

型中评估自变量(形态指标)对因变量(体脂性状)的相对重要性。由于体尺、体型等形态性状之间存在严重的多重共线性,最小二乘法得到的回归系数等评价指标已变得不可靠,为此本研究选用比例边缘方差分解方法PMVD(proportional marginal variance decomposition)衡量各自变量对因变量总变异的解释程度^[15]。该方法在国外已有较多研究,如Grömping^[25-26]通过模拟及实例分析,验证了PMVD度量方法的优势特点。对于本研究数据,矢状面体型SS在解释IPF和HLC决定系数 R^2 中的贡献较高,因此其可在一定程度上预测体脂性状。从几何角度解析,矢状面体型SS实际表示草鱼侧面形体的椭圆率(ellipticity)^[14],所以草鱼SS值越小的个体,体型越显修长,同时预示脂质沉积量也很可能越少。

开展选育工作,需要明确的目标性状。目前综合多方面因素,腹脂指数IPF在草鱼3个体脂性状中显示出更好的代表性。首先,在相关分析中,IPF表现出与其他多个性状有良好的关联性,尤其是与体型及体质量性状的负相关关系,非常有利于融入当前以快长为目的的草鱼新品种选育计划。其次,腹腔肠系膜脂肪组织可以通过某些技术设备实现无损定量检测,如核磁共振成像技术对鱼类脂肪组织可视化研究^[27],有助于避免性状测量时宰杀活体的弊端。再次,如果单纯降低肌肉组织的粗脂肪含量,选育出的产品肉质能否满足消费者的需求有待商榷,也未有相关执行标准。例如,在猪肉肉质性状选育中,适宜的肌肉脂肪含量(2.0%~3.5%)可产生较为理想的口感,过多过少均影响猪肉品质^[28-29]。相对而言,草鱼腹腔肠系膜脂肪主要功能为贮存能量,是进化过程中鱼类应对饥饿胁迫的一种适应性策略,在正常养殖环境下,则常常引起过多的脂质沉积。因此,选择腹脂指数IPF作为目标性状,通过育种手段有效降低脂质沉积,对于改善鱼体体型、减少内脏废弃物等方面将有诸多益处。

综上所述,本研究采用数理统计方法探究了草鱼体脂性状的变异特征及相关性。结果表明,草鱼体脂性状具备较大的遗传改良潜力,其中IPF可作为代表性目标性状用于育种实践。本研究结果为草鱼体脂性状选择育种提供了重要参考依据。

感谢朱冰、蒲宗旺、黎红、姚汶励、何虹荣、赵亭亭、赵莹、孙海林和黄卓明等在草鱼性状测量工作中给予的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴: 2017[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
The People's Republic of China Ministry of Agriculture, Fisheries Bureau. China fishery statistical yearbook: 2017[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017 (in Chinese).
- [2] 周燕. 草鱼及罗非鱼膨化饲料和非膨化饲料的比较研究[D]. 广州: 中山大学, 2006.
Zhou Y. The contrast of extruded diet and pellet diet of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*)[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2006 (in Chinese).
- [3] 李文倩. 鳊鱼、草鱼肌肉品质评价及比较[D]. 上海: 上海海洋大学, 2010.
Li W Q. Evaluation and comparison of flesh quality in *Siniperca chuatsi* (Basilewsky) and grass carp *Ctenopharyngodon idella*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2010 (in Chinese).
- [4] Du Z Y, Liu Y J, Tian L X, et al. Effect of dietary lipid level on growth, feed utilization and body composition by juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2005, 11(3): 139-146.
- [5] Guo X Z, Liang X F, Fang L, et al. Effects of dietary non-protein energy source levels on growth performance, body composition and lipid metabolism in herbivorous grass carp (*Ctenopharyngodon idella* Val.)(J). *Aquaculture Research*, 2015, 46(5): 1197-1208.
- [6] Ji H, Li J, Liu P. Regulation of growth performance and lipid metabolism by dietary n-3 highly unsaturated fatty acids in juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idella*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2011, 159(1): 49-56.
- [7] Switonski M, Stachowiak M, Cieslak J, et al. Genetics of fat tissue accumulation in pigs: a comparative approach[J]. *Journal of Applied Genetics*, 2010, 51(2): 153-168.
- [8] Zerehdaran S, Vereijken A L J, Van Arendonk J A M, et al. Estimation of genetic parameters for fat deposition

- and carcass traits in broilers[J]. *Poultry Science*, 2004, 83(4): 521-525.
- [9] 刘源. 猪DGAT1基因和Ob基因多态性及其与背膘厚的关系[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- Liu Y. Polymorphisms of DGAT1 and Ob genes and associations with backfat thickness in pigs[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2006 (in Chinese).
- [10] Tobin D, Kause A, Mäntysaari E A, *et al.* Fat or lean? The quantitative genetic basis for selection strategies of muscle and body composition traits in breeding schemes of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Aquaculture*, 2006, 261(2): 510-521.
- [11] Quillet E, Le Guillou S, Aubin J, *et al.* Two-way selection for muscle lipid content in pan-size rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Aquaculture*, 2005, 245(1-4): 49-61.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 养殖鱼类种质检测 第3部分: 性状测定: GB/T 18654.3-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Inspection of germplasm for cultured fishes-Part 3: measurement of characters: GB/T 18654.3-2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2008 (in Chinese).
- [13] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- China Food and Drug Administration. National food safety standard -Determination of fat in food: GB 5009.6-2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016 (in Chinese).
- [14] TrQng T Q, Mulder H A, Van Arendonk J A M, *et al.* Heritability and genotype by environment interaction estimates for harvest weight, growth rate, and shape of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) grown in river cage and VAC in Vietnam[J]. *Aquaculture*, 2013, 384-387: 119-127.
- [15] Grömping U. Relative importance for linear regression in R: The package relaimpo[J]. *Journal of Statistical Software*, 2006, 17(1): 1-27.
- [16] 傅建军, 张猛, 沈玉帮, 等. 草鱼幼鱼生长性状和肌肉成分的遗传参数估计[J]. 水产学报, 2015, 39(12): 1780-1787.
- Fu J J, Zhang M, Shen Y B, *et al.* Genetic parameter estimates of growth traits and flesh components in juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(12): 1780-1787(in Chinese).
- [17] 李杰. 高不饱和脂肪酸对草鱼稚鱼生长、脂质代谢的影响及其分子机理的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- Li J. Effects of dietary n-3 HUFA on growth performance and lipid metabolism in juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idellus*[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011 (in Chinese).
- [18] 田晶晶, 萧培珍, 吉红, 等. 实用饲料对养殖草鱼体组织脂肪酸组成的影响[J]. 饲料工业, 2013, 34(20): 22-27.
- Tian J J, Xiao P Z, Ji H, *et al.* Influence of practical diets on tissue fatty acid composition in reared grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. *Feed Industry*, 2013, 34(20): 22-27(in Chinese).
- [19] 孙俊龙, 沈玉帮, 傅建军, 等. 草鱼一龄前不同月龄主要形态性状对体重影响效果的分析[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(3): 341-349.
- Sun J L, Shen Y B, FU J J, *et al.* The effects of the morphometric traits at different month ages on body weight of *Ctenopharyngodon idellus*[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, 24(3): 341-349(in Chinese).
- [20] 李玺洋, 白俊杰, 樊佳佳, 等. 二龄草鱼形态性状对体重影响效果的分析[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(4): 535-541.
- Li X Y, Bai J J, Fan J J, *et al.* The relationship between morphological characters and body weight of *Ctenopharyngodon idellus*[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(4): 535-541(in Chinese).
- [21] Lynch M, Walsh B. Genetics and analysis of quantitative traits[M]. Sunderland: Sinauer Associates, 1998: 35-48.
- [22] 李新蕊. 主成分分析、因子分析、聚类分析的比较与应用[J]. 齐鲁师范学院学报, 2007, 22(6): 23-26.
- Li X R. Compare and application of principal component analysis, factor analysis and clustering analysis[J]. *Journal of Shandong Education Institute*, 2007, 22(6): 23-26(in Chinese).
- [23] Norman G R, Streiner D L. Biostatistics. The bare essentials[M]. 3rd ed. Shelton, Connecticut: People's Medical Publishing House, 2008: 194-209.

- [24] Beuselinck P R, Steiner J J. A proposed framework for identifying, quantifying, and utilizing plant germplasm resources[J]. *Field Crops Research*, 1992, 29(3): 261-272.
- [25] Grömping U. Estimators of relative importance in linear regression based on variance decomposition[J]. *The American Statistician*, 2007, 61(2): 139-147.
- [26] Grömping U. Variable importance in regression models[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2015, 7(2): 137-152.
- [27] Wu J L, Zhang J L, Du X X, *et al.* Evaluation of the distribution of adipose tissues in fish using magnetic resonance imaging (MRI)[J]. *Aquaculture*, 2015, 448: 112-122.
- [28] Fortin A, Robertson W M, Tong A K W. The eating quality of Canadian pork and its relationship with intramuscular fat[J]. *Meat Science*, 2005, 69(2): 297-305.
- [29] Franco D, Lorenzo J M. Effect of gender (barrows vs. females) on carcass traits and meat quality of Celta pig reared outdoors[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(4): 727-734.

Phenotypic variability and correlation analysis of lipid traits in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)

JIANG Peng^{1*}, LU Xue², LI Shengjie¹, KE Xiaoli¹, MA Dongmei¹, FAN Jiajia¹, WANG Junjie¹

(1. Key Laboratory of Tropical & Subtropical Fishery Resource Application & Cultivation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510380, China;

2. Key Laboratory of Microecological Resources and Utilization in Breeding Industry, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haid Central Research Institute, Animal Husbandry and Fisheries Research Center of Guangdong Haid Group Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: Grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) is an important economic freshwater fish in China. Under intensive aquaculture conditions, the farmed grass carps often display excess fat accumulation, such as fatty liver, rotund shape and increased body lipid content. To evaluate the possibility of genetic improvement, this study estimated the phenotypic variability and correlation of lipid traits in *C. idella*. A total of 15 quantitative traits of 17 month-old *C. idella* among 296 individuals were analyzed by mathematical statistical methods. The results showed that intraperitoneal fat index IPF, hepatopancreas lipid content HLC and muscle lipid content MLC had high variation in *C. idella*, and the phenotypic variation coefficients ranged from 21.30 % to 47.04 %. Correlation analysis showed that there was a significant positive correlation among the three lipid traits, suggesting that the process of lipid deposition has a certain synchronization in different tissues of *C. idella*. Furthermore, factor and cluster analysis revealed that the observed 15 quantitative traits were roughly divided into 4 categories: body shape factor, body size factor, organ index factor, and body lipid content factor. IPF belonged to organ index factor, while HLC and MLC formed body fat content factor together. In addition, multivariate statistical analysis showed that the explanation degree of morphological traits on the variation of the three lipid traits ranged from 7.45% to 24.83%. By contrast, sagittal shape SS can, to some extent, predict body lipid traits. In summary, the lipid traits of *C. idella* have great potential for genetic improvement, and IPF would be an attractive character as breeding target. This study provided important reference for genetic improvement of lipid traits in *C. idella*.

Key words: *Ctenopharyngodon idella*; lipid traits; variability; correlation analysis; multivariate statistical analysis

Corresponding author: JIANG Peng. E-mail: jiangpeng85@126.com

Funding projects: Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2019ZX-001); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2015A030313702); China Agriculture Research System (CARS-45-04)