

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190329001

http://www.yykxjz.cn/

陈炳霖, 肖炜, 邹芝英, 祝璟琳, 李大宇, 喻杰, 杨弘, 胡平各, 马银花. 正反交奥尼罗非鱼形态性状差异及对体质量的影响. 渔业科学进展, 2020, 41(3): 94-102

Chen BL, Xiao W, Zou ZY, Zhu JL, Li DY, Yu J, Yang H, Hu PG, Ma YH. Correlation analysis and morphological difference and contributions to body weight of reciprocally-crossed subgroups of *Oreochromis niloticus* × *O. Aureus*. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(3): 94-102

正反交奥尼罗非鱼形态性状差异 及对体质量的影响*

陈炳霖^{1,2} 肖炜^{1,2} 邹芝英² 祝璟琳² 李大宇²
喻杰² 杨弘^{1,2①} 胡平各^{1,2} 马银花^{1,2}

(1. 南京农业大学无锡渔业学院 无锡 214081;

2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心 农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室 无锡 214081)

摘要 为探究不同杂交方式奥尼罗非鱼形态性状对体质量的影响, 对埃及尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)与“夏奥1号”奥利亚罗非鱼(*Oreochromis aureus*)正反交子代奥尼罗非鱼群体开展体质量(BW)与全长(TL)、体长(SL)、头长(HL)、体高(BD)、尾柄长(CPL)、尾柄高(CPD)、体厚(BWD)共7个形态性状测定与分析, 判断影响奥尼罗非鱼体质量的主要性状, 并建立体质量多元回归方程; 采用单因素相关性分析、复相关分析、主成分分析等多元分析方法, 比较了正反交奥尼罗非鱼的形态差异。结果显示, 正交奥尼罗非鱼群体全长、体高和尾柄高3个性状对体质量产生主要影响, 回归方程为 $Y_{BW} = -154.286 + 9.016X_{TL} + 10.065X_{BD} + 17.884X_{CPD}$; 反交雌性奥尼罗非鱼群体全长和体高2个性状对体质量产生主要影响, 回归方程为 $Y_{BW} = -92.582 + 7.415X_{TL} + 8.727X_{BD}$; 反交雄性奥尼罗非鱼群体体长和体高2个性状对体质量产生主要影响, 回归方程为 $Y_{BW} = -120.299 + 8.661X_{SL} + 16.590X_{BD}$ 。主成分分析构建了2个主成分, 第1主成分主要代表TS、BDS、CDS、BWS和HS形态特征, 第2主成分主要代表BS和CLS形态特征, 对PCA1和PCA2作散点图可将正交雄鱼与反交雌鱼有效区分。研究表明, 不同杂交方式、不同性别的奥尼罗非鱼影响体质量的形态特征均存在差别, 在亲鱼挑选及子代选育工作中, 建议采用多性状综合选育的方式, 以提高选育培养结果的准确性和稳定性。

关键词 奥尼罗非鱼; 通径分析; 多元回归方程; 主成分分析; 多性状选育
中图分类号 S917.4 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2020)03-0094-09

罗非鱼(Tilapia)是联合国粮农组织(FAO)向全球推广养殖、食用的优质鱼类。自20世纪70年代以来, 我国成功培养并推广了数个生长速度快、抗病能力强的罗非鱼品种, 推动了我国水产养殖的发展。目

* 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-46)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(2017JBFZ03)和罗非鱼原良种保种选育(2130315)共同资助 [This work was supported by China Agriculture Research System (CARS-46), Special Scientific Research Funds for Central Non-Profit Institutes (2017JBFZ03), and the Fund for Breeding of Tilapia (2130315)].

陈炳霖, E-mail: chenbl_527@foxmail.com

① 通讯作者: 杨弘, 研究员, E-mail: yanghong@ffrc.cn

收稿日期: 2019-03-29, 收修改稿日期: 2019-04-17

前,作为我国罗非鱼主要养殖品种的奥尼罗非鱼是以尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)♀和奥利亚罗非鱼(*Oreochromis aureus*)♂为亲本的杂交种,其以雄性率高、生长速度快等特点,深受养殖者的喜爱(杨弘, 2010)。在罗非鱼的选育过程中发现,由于环境影响和多种基因差异表达等因素限制,在选育过程中,仅建立体质量标准已很难满足养殖者对优良品种的选育要求(Neira *et al*, 2004; Rutten *et al*, 2005),因此,利用通径分析、回归分析、主成分分析等方法评估各形态特征对体质量的影响程度,筛选与体质量相关性较大的形态性状并以此建立选育标准,对选育成果的稳定性具有重要意义。近年来,在虾类(孙海峰等, 2018)、蟹类(Ma *et al*, 2013)、贝类(Luo *et al*, 2013)、鱼类(李炎璐等, 2016)等水产动物中均已开展上述相关性研究。目前,对以奥利亚罗非鱼为父本、尼罗罗非鱼为母本进行杂交的正交奥尼罗非鱼(尼罗罗非鱼♀×奥利亚罗非鱼♂)涉及雄性率、基因表达及选育的研究已较为广泛,而对反交奥尼罗非鱼(奥利亚罗非鱼♀×尼罗罗非鱼♂)的研究鲜有报道。对同龄同生长期正反交奥尼罗非鱼进行形态特征对比分析,有利于探究杂交种的显著差异特征,为进一步提高杂种选育优势提供数据依据。

本研究利用国家罗非鱼产业技术体系保种的埃及尼罗罗非鱼和“夏奥 1 号”奥利亚罗非鱼进行正反杂交,对繁育的杂交子代各性状及生长数据进行跟踪测量,建立不同杂交方式下子代各性状对体质量影响的最优回归方程,开展了各个比例性状的主成分分析以及综合影响因素分析,以期为提高罗非鱼选育工作的准确性及稳定性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

将尼罗罗非鱼埃及品系与“夏奥 1 号”奥利亚罗非鱼进行 6×3 (♀×♂)配组,正交和反交各 1 组。配组中,尼罗罗非鱼为我国从阿斯旺坝地区筛选引进的优良品种,“夏奥 1 号”奥利亚罗非鱼是以我国从美国引进的优良亲鱼群体为基础,结合遗传标记、杂种优势等方法,经历 10 代以上的群体选育形成的优良新品种(肖炜等, 2012)。将 2 组在 7 d 内产出的杂交子代鱼苗作为基础实验群体,分别放入相同规格的网箱(长×宽×高为 4 m×4 m×1.5 m)养殖 1 个月后,仔细观察正交子代及反交子代 2 个基础群体泄殖孔来区分幼鱼性别,由于随机挑选的 300 尾正交子代中只有雌性个体 4 尾,个体雄性率达 98.67%,因此,本研

究不设置正交雌鱼实验组。挑选体型健壮的正交雄鱼、反交雌鱼和反交雄鱼各 300 尾,每 100 尾为 1 组,共 9 组,分别放入相同规格的网箱(4 m×4 m×1.5 m)中养殖 2 个月,根据摄食情况统一投喂粗蛋白质含量高于 28.0%的配合饲料,日投喂 2 次。

1.2 数据测量

采样前禁食 24 h,随机挑选正交雄鱼、反交雌鱼和反交雄鱼各 50 尾,使用 MS-222 麻醉后,用电子天平测量体质量(Body weight, BW)和内脏重(Visceral weight, VW),精确到 0.01 g;用直尺、游标卡尺测量全长(Total length, TL)、体长(Standard length, SL)、头长(Head length, HL)、体高(Body depth, BD)、尾柄长(Caudal peduncle length, CPL)、尾柄高(Caudal peduncle depth, CPD)、体厚(Body width, BWD)等形态性状,分别精确到 0.1 cm 和 0.002 cm。

1.3 数据处理

运用 Excel 2017 和 SPSS 24.0 软件对各形态特征的统计数据进行分析,计算各形态特征的相关分析数据。

各性状参数平均值=数据总和/个体数

标准差 $SD = \sqrt{s^2}$, s^2 为各自变量的方差。

变异系数 $CV = SD/X \times 100\%$, SD 为标准差, X 为平均值。

脏体指数 $VSI = W_v/W_B \times 100\%$

式中, W_v 为内脏重, W_B 为体质量。

形态性状对体质量的通径系数 $P_i = b_{xi} \times \sigma_{xi} / \sigma_y$

式中, b_{xi} 为自变量的回归系数, σ_{xi} 为自变量的标准差, σ_y 为因变量的标准差。

单个形态性状对体质量的决定系数 $D_j = P_j^2$

式中, P_j 为该性状对体质量的通径系数。

2 个性状对体质量的共同决定系数 $D_{ij} = 2r_{ij} \times P_i \times P_j$

式中, r_{ij} 为某 2 个性状间的相关系数, P_i 、 P_j 为性状对体质量的通径系数。

主成分分析:将各性状特征值与体长(SL)相比生成比例性状数据,对各比例性状数据进行主成分分析,分析体质量与各比例性状之间的关系及分布特征。

2 结果与分析

2.1 生长与形态性状的统计参数

正反交奥尼罗非鱼形态性状表型参数数据见表 1。对正反交子代各形态特征进行方差统计及 LSD 检验,结果显示,反交雄鱼除体质量、全长、体长和尾柄长外,其他各性状特征值均显著高于正交雄鱼($P < 0.05$),正交及反交雄鱼各形态特征值均显著高于

反交雌鱼($P<0.05$)。正反交子代各形态性状中变异系数最大值均为体质量, 正交雄鱼、反交雌鱼和反交雄鱼体质量变异系数分别为 17.5%、14.3%和 11.6%, 说明各杂交组内体质量的特征值并不稳定, 相比于组内其他各形态特征差异, 组内体质量的差异较大。正反交子代脏体指数显示, 正交雄鱼脏体指数显著高于反交雄鱼, 但与反交雌鱼差异不显著($P>0.05$), 说明

在相同饲养环境下, 同龄反交雄鱼出肉率显著高于正交雄鱼, 反交雌鱼出肉率介于正反交雄鱼二者之间。

2.2 形态性状间相关系数分析

正反交奥尼罗非鱼体质量与其他 7 个形态性状特征值之间的 Pearson 相关系数数据见表 2。正反交子代的体质量各形态性状的相关系数均达到了极显著

表 1 正反交奥尼罗非鱼形态性状表型参数

Tab.1 The apparent parameters of body weight and morphological traits for reciprocally-crossed subgroups of *Oreochromis niloticus* × *O. Aureus*

性状 Traits	正交雄鱼 Forward hybrid males		反交雌鱼 Reverse hybrid females		反交雄鱼 Reverse hybrid males	
	Mean±SD	变异系 CV(%)	Mean±SD	变异系 CV(%)	Mean±SD	变异系 CV(%)
体质量 BW(g)	87.8±15.3 ^a	17.5	55.8±8.0 ^b	14.3	91.4±10.6 ^a	11.6
全长 TL(cm)	17.1±1.0 ^a	6.1	14.6±0.7 ^b	4.7	17.1±0.7 ^a	4.2
体长 SL(cm)	13.8±1.1 ^a	8.2	11.9±0.6 ^b	4.9	13.8±0.6 ^a	4.5
头长 HL(cm)	4.3±0.3 ^b	7.0	3.8±0.3 ^c	7.4	4.5±0.3 ^a	6.4
体高 BD(cm)	5.2±0.4 ^b	7.5	4.6±0.3 ^c	6.5	5.6±0.3 ^a	5.6
尾柄 CPL(cm)	1.5±0.2 ^a	10.2	1.3±0.1 ^b	9.5	1.6±0.2 ^a	9.8
尾柄 CPD(cm)	2.0±0.1 ^b	7.0	1.7±0.1 ^c	4.8	2.0±0.1 ^a	5.7
体厚 BWD(cm)	1.956±0.208 ^b	10.642	1.682±0.102 ^c	6.088	2.042±0.144 ^a	7.072
脏体指 VSI(%)	20.0±15.2 ^a	25.8	17.9±6.8 ^{ab}	38.3	16.1±3.9 ^b	24.1

注: 同一行内参数后字母不同表示差异显著($P<0.05$)

Note: The different letters on the parameters within the line mean significant difference ($P<0.05$)

表 2 正反交奥尼罗非鱼形态性状参数相关系数

Tab.2 The correlation coefficients of apparent parameters for reciprocally-crossed subgroups of *Oreochromis niloticus* × *O. Aureus*

项目 Items	性状 Traits	体质量 BW	全长 TL	体长 SL	头长 HL	体高 BD	尾柄长 CPL	尾柄高 CPD	体厚 BWD
正交 Forward hybrid subgroups	体质量 BW		0.937**	0.811**	0.829**	0.837**	0.452**	0.825**	0.495**
	全长 TL			0.852**	0.855**	0.760**	0.510**	0.789**	0.483**
	体长 SL				0.805**	0.713**	0.340*	0.682**	0.332*
	头长 HL					0.744**	0.253	0.708**	0.470**
	体高 BD						0.279*	0.702**	0.388**
	尾柄 CPL							0.368**	0.076
	尾柄 CPD								0.399**
	体厚 BWD								
反交 Reverse hybrid subgroups	体质量 BW		0.864**	0.885**	0.761**	0.882**	0.334*	0.601**	0.499**
	全长 TL		0.880**		0.940**	0.813**	0.350*	0.555**	0.560**
	体长 SL		0.845**	0.945**		0.737**	0.787**	0.423**	0.566**
	头长 HL		0.454**	0.673**	0.674**		0.749**	0.331*	0.446**
	体高 BD		0.790**	0.715**	0.678**	0.304*		0.269	0.645**
	尾柄长 CPL		0.236	0.185	0.196	0.149	0.281*		0.203
	尾柄高 CPD		0.674**	0.681**	0.664**	0.301*	0.572**	0.325*	
	体厚 BWD		0.397**	0.376**	0.401**	0.207	0.331*	-0.065	0.206

注: 对角线下方为雌鱼表型性状相关系数; 对角线上方为雄鱼表型性状相关系数。*: $P<0.05$; **: $P<0.01$

Note: The apparent statistics below the diagonal were correlation coefficients in female fish; above the diagonal were in male fish. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$

水平($P<0.01$), 体质量与各性状间相关系数依次为全长>体长>体高>头长>尾柄高>体厚>尾柄长。反交子代中, 雌鱼体质量与尾柄长关系不显著($P>0.05$), 与其他性状的相关系数均达到极显著水平($P<0.01$), 体质量与各性状间相关系数依次为全长>体长>体高>尾柄高>头长>体厚>尾柄长; 雄鱼体质量与尾柄长关系达显著水平($P<0.05$), 与其他性状的相关系数均达到极显著水平($P<0.01$), 体质量与各性状间相关系数依次为体长>体高>全长>头长>尾柄高>体厚>尾柄长。正反交子代中尾柄长与体质量的相关系数最小, 体厚其次, 正交子代全长、头长、尾柄高与体质量的相关系数均高于反交子代, 而反交子代体高与体质量的相关系数均高于正交子代。

2.3 形态性状的回归分析

对正反交奥尼罗非鱼各形态特征进行 Kolmogorov-Smirnov Z 检验, 均满足正态分布($P>0.05$)假设。使用逐步引入-剔除法, 以体质量为因变量, 各形态性状为自变量进行回归分析, 排除存在共线性的特征值, 并求得各形态特征对体质量的通径系数。各形态性状回归分析相关数据见表 3。正交子代引入了全长、体

高和尾柄高 3 个自变量, 回归方程式为 $Y_{BW} = -154.286 + 9.016X_{TL} + 10.065X_{BD} + 17.884X_{CPD}$, X_{TL} 、 X_{BD} 、 X_{CPD} 分别代表全长、体高和尾柄高。反交子代中, 雌鱼依次引入全长和体高 2 个自变量, 回归方程式为 $Y_{BW} = -92.582 + 7.415X_{TL} + 8.727X_{BD}$, X_{TL} 、 X_{BD} 分别代表全长和体高; 雄鱼依次引入体长和体高 2 个自变量, 回归方程式为 $Y_{BW} = -120.299 + 8.661X_{SL} + 16.590X_{BD}$, X_{SL} 、 X_{BD} 分别代表体长和体高。各个方程中, 回归截距及各自变量的偏回归系数均达到显著水平($P<0.05$), 表明建立的 3 个回归方程均能精准反映正反交奥尼罗非鱼各保留特征与体质量的多元回归相关性。同时, 各回归方程的自变量、自变量偏回归系数及回归截距均不同, 表明不同杂交方式与不同性别的奥尼罗非鱼影响增重的具体方式不同。

2.4 各形态性状对体质量的影响程度和复相关分析

对正反交奥尼罗非鱼体质量回归分析结果所引入的各性状进行复相关分析数据见表 4。根据单个形态性状对体质量的决定系数和 2 个性状对体质量的共同决定系数, 计算出形态性状对体质量的决定系数数据见表 5。对角线上的数据是单一形态性状对体质量

表 3 正反交奥尼罗非鱼回归分析相关系数
Tab.3 The correlation coefficients of regression analysis for reciprocally-crossed subgroups of *Oreochromis niloticus* × *O. Aureus*

项目 Items	保留性状 Retained traits	未标准化系数 Unstandardized coefficients	标准误差 Std. Error	标准化系数 Standardized coefficients	检验值 <i>t</i>	显著性 Sig.
正交雄鱼 Forward hybrid males	全长 TL	9.016	1.104	0.616	8.170	0.001
	体高 BD	10.065	2.544	0.257	3.956	0.001
	尾柄高 CPD	17.884	7.733	0.159	2.313	0.025
反交雌鱼 Reverse hybrid females	全长 TL	7.415	1.000	0.644	7.411	0.001
	体高 BD	8.727	2.297	0.330	3.799	0.001
反交雄鱼 Reverse hybrid males	体长 BL	8.661	1.451	0.501	5.970	0.001
	体高 BD	16.590	2.853	0.488	5.820	0.001

表 4 正反交奥尼罗非鱼形态性状对体质量的复相关分析
Tab.4 The multiple-correlation coefficients between morphometric traits and body weight for reciprocally-crossed subgroups of *Oreochromis niloticus* × *O. Aureus*

项目 Items	正交雄鱼 Forward hybrid males	反交雌鱼 Reverse hybrid females	反交雄鱼 Reverse hybrid males
相关系数 <i>R</i>	0.961	0.909	0.935
决定系数 R^2	0.923	0.827	0.874
矫正决定系数 Adjusted R^2	0.918	0.819	0.869
标准误差 Std. Error of the Estimate	4.388	3.384	3.853
检验值 <i>F</i>	5.349	14.432	33.868
显著性 Sig.	0.025	0.001	0.001

表 5 正反交奥尼罗非鱼形态学性状对体质量的决定系数
Tab.5 The determinant coefficient of morphometric traits on the body weight for reciprocally-crossed subgroups of *Oreochromis niloticus* × *O. Aureus*

项目 Items	正交 Forward hybrid subgroups			反交 Reverse hybrid subgroups			
	全长 TL	体高 BD	尾柄高 CPL	全长 TL	体长 BL	体高 BD	
雌鱼 Females				全长 TL	0.415	—	0.304
				体高 BD	—	—	0.109
雄鱼 Males	全长 TL	0.379	0.241	0.155	体长 BL	—	0.251
	体高 BD		0.066	0.057	体高 BD	—	0.238
	尾柄高 CPL			0.025			

量的决定系数, 对角线右上方的数据是 2 个性状共同影响下对体质量的决定系数。正交子代中, 各形态特征对体质量的回归分析按影响程度引入全长、体高、尾柄高 3 个自变量, 3 个变量对体质量的相关系数为 0.961, 决定系数为 0.923。全长、体高、尾柄高对正交子代体质量的决定系数由大到小依次为 0.379、0.066、0.025, 性状两两间对体质量影响共同决定系数由大到小依次为 0.241、0.155、0.057, 3 个形态特征协同作用对体质量的总决定系数为 0.923。反交子代中, 雌鱼各形态性状对体质量的回归分析按影响程度引入全长、体高 2 个自变量, 2 个变量对体质量的相关系数为 0.909, 决定系数为 0.827。全长、体高对反交雌鱼体质量的决定系数由大到小依次为 0.451、0.109, 性状两两间对体质量影响共同决定系数为 0.304, 2 个形态特征协同作用对体质量的总决定系数为 0.864; 雄鱼各形态性状对体质量的回归分析按影响程度引入体长、体高 2 个自变量, 2 个变量对体质量的相关系数为 0.935, 决定系数为 0.874。体长、体高对反交雄鱼体质量的决定系数由大到小依次为 0.251、0.238, 性状两两间对体质量影响共同决定系数为 0.385, 2 个形态特征协同作用对体质量的总决定系数为 0.874。复相关分析数据说明, 各杂交组所保留的各性状对体质量均产生较大影响, 且影响程度比回归分析中排除的其他各形态性状更大。

2.5 各形态性状主成分分析

对 7 个比例性状进行主成分分析, 最终提取出 2 个主成分。第 1 主成分 $PCA1=0.395BS+0.764TS+0.469HS+0.731BDS+0.374CLS+0.691CDS+0.563BWS$, 第 2 主成分 $PCA2=0.600BS-0.137TS-0.635HS+0.112BDS+0.348CLS+0.160CDS-0.277BWS$, 2 个主成分的贡献率分别为 34.689%、14.542%, 累积贡献率为 49.230%。根据各因子系数数据绘制散点图见图 1。从图 1 可观察到, 7 个比例性状聚集成上下两部分, 主成分 1 中, TS (全长/体长)、BDS (体高/体长)、

CDS (尾柄高/体长)、BWS (体厚/体长)和 HS (头长/体长) 5 个比例性状影响较大; 主成分 2 中, BS (体质量/体长)和 CLS (尾柄长/体长) 2 个比例性状影响较大。根据各杂交子代个体在 PCA1、PCA2 主成分中的得分, 数绘制性状特征散点图(图 2), 3 个群体中反交雌鱼与正交雄鱼有部分重叠, 而反交雌鱼与正交雄鱼及反交雄鱼重叠部分较少。正反交子代均有少数个体成小簇聚集于大簇四周, 表明在形态特征方面, 正反交子代间既有同源性又存在部分差别。

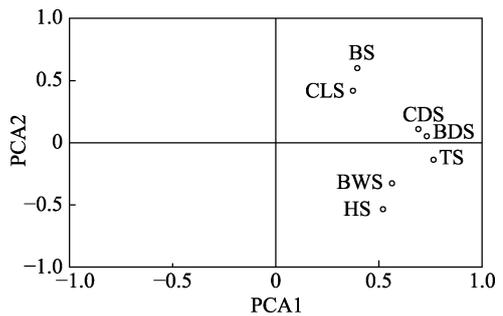


图 1 性状因子主成分得分系数分布
Fig.1 Characteristic coefficients plots of principal components factor scores
BS=BW/SL; TS=TL/SL; HS=HL/SL;
BDS=BD/SL; CLS=CPL/SL
CDS=CPD/SL; BWS=BWD/SL

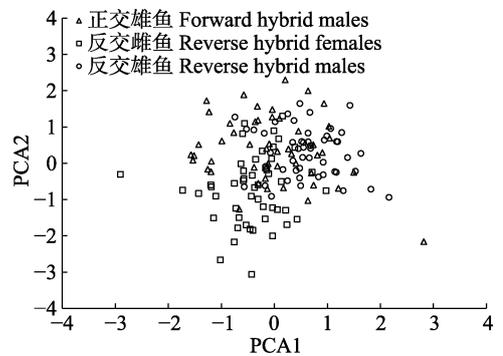


图 2 正反交奥尼罗非鱼群体性状特征主因子散点图
Fig.2 Scatter plots of principal components in reciprocally-crossed subgroups of *Oreochromis niloticus* × *O. Aureus*

3 讨论

3.1 通径分析的必要性及多元回归方程的建立

各形态特征间相关性分析显示,除尾柄长外,正反交奥尼罗非鱼 7 个形态特征与体质量的相关系数均达到极显著水平($P<0.01$)。但经过通径分析并确认回归曲线自变量后,正交奥尼罗非鱼仅保留 3 个形态性状,反交奥尼罗非鱼仅保留 2 个形态性状。本研究结果表明,表型相关性分析仅能体现各自变量(形态性状)与因变量(体质量)的数据关系,但由于各自变量之间存在多重共线性,相关性分析对各自变量间关系的判断并不准确(李洋等, 2012),因此,仅通过表型相关性分析得到的数据不能直接作为体质量回归方程中各自变量的偏回归系数。通径分析能将自变量和因变量之间的相关系数拆分为直接表达和间接表达,继而判断得出影响体质量的主要形态特征(王标等, 2009)。但通径分析所保留自变量的个数会直接影响回归分析的准确性和复杂程度,自变量保留个数与准确性和复杂程度均成正比,因此,有必要探寻二者之间的平衡程度(肖炜等, 2015)。Luxinger 等(2018)利用通径分析方法对巨骨舌鱼(*Arapaima gigas*)各形态学性状对体质量、头重、空壳重等 7 个质量性状的影响程度进行分析,筛选出对体质量影响程度最大的 5 个形态特征,分别为全长、体长、躯干长(Trunk length)、身体最大部分周长(Largest portion of the body)和胃部周长(Caudal perimeter),并建立基于以上 5 个性状为自变量的体质量回归方程;董浚键等(2018)研究发现,翘嘴鲮(*Siniperca chuatsi*)的体质量主要受到全长、体高、眼径和尾柄全长 4 个形态特征的影响,并以此为依据,利用回归分析建立体质量回归方程。以上各研究成果均建立了以通径分析筛选的形态特征为自变量的体质量回归方程,并根据研究结果对上述水生动物的综合选育提供指导。本研究中,正交奥尼罗非鱼保留了全长、体高和尾柄高 3 个形态特征,对体质量的相关指数达 0.923;反交雌性子代保留了全长和体高 2 个形态特征,对体质量的相关指数达 0.827;反交雄性子代保留了体长和体高 2 个形态特征,对体质量的相关指数达 0.874。以上各回归分析中,回归常数和各性状偏回归系数均达到显著水平($P<0.05$),说明本研究成功揭示了影响正反交奥尼罗非鱼体质量的主要形态性状,较明确地阐述了不同杂交方式下各形态性状与体质量的真实关系。但本研究仅从形态学角度对正反交奥尼罗非鱼各形态性状对体质量的影响进行了初步探讨,后续仍需进行 SNP 位点、核基因标记等遗传学分析,以获得更多有价值的结果。

3.2 不同杂交方式奥尼罗非鱼影响体质量的主要形态性状

本研究对正反交奥尼罗非鱼进行相关性分析,并在相关性分析的基础上,进行通径分析和多元回归分析。结果显示,正交奥尼罗非鱼全长、体高和尾柄高 3 个形态特征对体质量的单独决定系数和双性状协同决定系数之和为 0.923,决定体质量增长量变异的 92.3%;反交雌性奥尼罗非鱼全长和体高 2 个形态特征对体质量的单独决定系数和双性状协同决定系数之和为 0.864,决定体质量增长量变异的 86.4%;反交雄性奥尼罗非鱼体长和体高 2 个形态特征对体质量的单独决定系数和双性状协同决定系数之和为 0.874,决定体质量增长量变异的 87.4%。研究表明,当各自变量对因变量的总决定系数(R^2)高于临界点 0.85 时,才能初步判定各自变量为影响因变量的主要变量(刘春雷等, 2011)。本研究中,3 个回归方程中各自变量总决定系数均高于临界点,说明影响正反交奥尼罗非鱼体质量的主要形态特征结果可靠。通径分析结果显示,正反交奥尼罗非鱼保留至回归方程的各形态性状对体质量的综合影响,除尾柄高($P<0.05$)外,均达到极显著水平($P<0.01$),而不同杂交方式对体质量影响较大的各形态性状中均含有体高特征,且对正交雄鱼和反交雌鱼体质量影响较大的形态性状中均含有全长特征。这一结果与许氏平鲷(*Sebastes schlegeli*) (韩慧宗等, 2016)、圆斑星鲈(*Verasper variegatus*) (边力等, 2017)、大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*) (李莉等, 2019)、褐点石斑鱼(*Epinephelus fuscoguttatus*) (黄建盛等, 2017)的研究结果相似。以上结果说明,在对不同杂交方式奥尼罗非鱼进行多性状综合选育时,除了设置体质量这一决定性性状外,还应考虑体高、全长等形态特征,保证综合选育的有效性和稳定性。

3.3 主成分分析对不同杂交方式差异判别和多性状综合选育的指导

目前,体质量依然是传统生产实践中亲鱼挑选或子代选育的主要依据,但随着生产实践的需要,罗非鱼生长速率、鱼类形态性状及特征成为国内外学者研究的热门方向(Trong *et al*, 2013)。由于受到多重基因间的连锁性影响以及环境的限制,单独以体质量为目标鱼类选育结果并不稳定(Carpenter *et al*, 1988),而在选育条件中加入体高、体长等与体质量存在高度相关性的形态性状后,可将单性状选育改良为多性状综合选育,从而有效地提升选育的准确性和稳定性。作为肉量需求较大的商品鱼类,罗非鱼的出肉率同样

是养殖者及消费者重视的特征,目前有研究发现,体质量、体长、体高、体厚等性状与出肉率存在较大相关性(Liere *et al*, 1992; Bolivar *et al*, 2002),因此,在选育过程中,通过对以上形态学性状的选择来提升罗非鱼生长速率和出肉率等指标具有重要的指导作用。统计学中,主成分分析通过降低数据主要原始变量的线性组合来提高多变量数据集的有效维度,从而确定变量与因变量的相关性,是生态数据分析中最常用的工具之一(Peres-Neto *et al*, 2003)。近年来,通过主成分分析对鱼类种内或种间关系及性状与品种相关性的研究也取得了较大进展,于飞等(2008)对 4 个大菱鲃(*Scophthalmus maximus*)群体各比例性状进行主成分分析,发现各群体间全长、体长、头长、吻长和尾柄长 5 个形态特征已产生了明显差异;杨慧等(2015)对 3 个红罗非鱼群体进行主成分分析并进行了有效种分类判别,发现中国台湾红罗非鱼与另外 2 种红罗非鱼群体在体高、头长、体长和尾柄长等形态特征上存在较大差异;汪开成等(2018)对广西红水外来红腹罗非鱼(*Coptodon zillii*)进行主成分分析并发现不同地理群体间已产生了明显形态分化,各地区群体形态差异主要集中在头尾轴、躯干部和尾部性状上。本研究通过对正反交奥尼罗非鱼进行各比例性状的主成分分析发现,在体质量、尾柄长 2 项特征性状上,奥尼罗非鱼正交子代与反交雌鱼存在较大差异,反交雄鱼与正交雄鱼、反交雌鱼均存在较小差异;在其他各项可量特征性状上,奥尼罗非鱼反交雌鱼与正反交雄鱼均存在较大差异,正反交雄鱼间存在较小差异。因此,可将上述形态特征差异作为正反交奥尼罗非鱼子代形态特征差异判别和综合选育的主要依据。

参 考 文 献

- Bian L, Liu CL, Chen SQ, *et al*. Path analysis of effects of morphometric traits on body weight in spotted halibut *Verasper variegatus* at different growth stages. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(6): 1168–1175 [边力, 刘长琳, 陈四清, 等. 不同生长期圆斑星鲽形态性状对体质量影响的通径分析. *中国水产科学*, 2017, 24(6): 1168–1175]
- Bolivar RB, Newkirk GF. Response to within family selection for body weight in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) using a single-trait animal model. *Aquaculture*, 2002, 204(3): 371–381
- Carpenter SR, Kitehell JF. Consumer control of lake productivity. *Bioscience*, 1988, 38(11): 764–769
- Dong JJ, Sun CF, Tian YY, *et al*. Correlation analysis of the main morphological traits and body weight of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) and morphological traits between males and females. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(2): 76–84 [董浚键, 孙成飞, 田园园, 等. 翘嘴鲻主要形态性状与体质量的相关性及雌雄形态性状差异分析. *渔业科学进展*, 2018, 39(2): 76–84]
- Han HZ, Jiang HB, Wang F, *et al*. Principal component and path analysis of morphological traits of selective groups at different month ages of *Sebastes schlegeli*. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(8): 1163–1172 [韩慧宗, 姜海滨, 王斐, 等. 许氏平鲷不同月龄选育群体形态性状的主成分与通径分析. *水产学报*, 2016, 40(8): 1163–1172]
- Huang JS, Chen G, Zhang JD, *et al*. Principal component and path analysis of morphological traits of *Epinephelus fuscoguttatus* at different month ages. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41(7): 1105–1115 [黄建盛, 陈刚, 张健东, 等. 褐点石斑鱼不同月龄形态性状的主成分及通径分析. *水产学报*, 2017, 41(7): 1105–1115]
- Li L, Wang X, Jian YX, *et al*. Correlation and path analysis between morphological traits and body mass of *Hexagrammos otakii* at different months of age. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(1): 58–66 [李莉, 王雪, 菅玉霞, 等. 不同月龄大泷六线鱼形态性状与体质量的相关性及通径分析. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(1): 58–66]
- Li Y, Liu P, Li J, *et al*. Correlation and path analysis of morphometric traits on body weight for *Exopalamon carinicauda*. *Progress in Fishery Sciences*, 2012, 33(6): 59–65 [李洋, 刘萍, 李健, 等. 脊尾白虾形态性状对体质量的相关性及通径分析. *渔业科学进展*, 2012, 33(6): 59–65]
- Li YL, Chen C, Yu H, *et al*. Morphological characteristics and their relationships with the body weight of wild juvenile *Thunnus albacares*. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(1): 8–14 [李炎璐, 陈超, 于宏, 等. 中国南海黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)幼鱼形态特征及其与体质量的关系. *渔业科学进展*, 2016, 37(1): 8–14]
- Liu CL, Chang YM, Liang LQ, *et al*. Correlation and path analyses of phenotypic traits and body mass of transgenic carp with growth hormone gene of salmon. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1893–1899 [刘春雷, 常玉梅, 梁利群, 等. 转大麻哈鱼生长激素基因鲤表型性状与体质量的相关性及通径分析. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1893–1899]
- Liere LV, Gulati RD. Restoration and recovery of shallow eutrophic lake ecosystems in the Netherlands: Epilogue. *Hydrobiologia*, 1992, 233(1–3): 283–287
- Luo X, Ke C, You W. Estimates of correlations for shell morphological traits on body weight of interspecific hybrid abalone (*Haliotis discus hannai* and *Haliotis gigantea*). *Journal of Shellfish Research*, 2013, 32(1): 115–118
- Luxinger AO, Cavali J, Porto MO, *et al*. Morphometric measurements applied in the evaluation of *Arapaima gigas*, body components. *Aquaculture*, 2018, 489(1): 80–84
- Ma HY, Ma CY, Ma LB, *et al*. Correlation of growth-related

- traits and their effects on body weight of the mud crab (*Scylla paramamosain*). *Genetics and Molecular Research*, 2013, 12(4): 4127–4136
- Neira R, Lhorente JP, Araneda C, *et al.* Studies on carcass quality traits in two populations of Coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*): Phenotypic and genetic parameters. *Aquaculture*, 2004, 241(1): 117–131
- Peres-Neto PR, Somers JK. Giving meaningful interpretation to ordination axes: Assessing loading significance in principal component analysis. *Ecology*, 2003, 84(9): 2347–2363
- Rutten MJM, Bovenhuis H, Komen H. Genetic parameters for fillet traits and body measurements in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquaculture*, 2005, 246(1–4): 125–132
- Sun HF, Liu GX, Jiang LY, *et al.* Mathematical analysis of effects of morphometric attributes on body weight for *Macrobrachium rosenbergii*. *Journal of Aquaculture*, 2018, 39(7): 48–54 [孙海峰, 刘国兴, 蒋连玉, 等. 罗氏沼虾的形态性状对体重的相关性分析. *水产养殖*, 2018, 39(7): 48–54]
- Trong TQ, Mulder HA, Van'Arendonk JAM, *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. *Aquaculture*, 2013, 384–387(384): 119–127
- Wang B, Yu MK, Sun HJ, *et al.* Photosynthetic characters of *Quercus acutissima* from different provenances under effects of salt stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1817–1824 [王标, 虞木奎, 孙海菁, 等. 盐胁迫对不同种源麻栎叶片光合特征的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1817–1824]
- Wang KC, Wu ZQ, Wu L, *et al.* Morphological variation analysis on redbelly tilapia (*Coptodon zillii*) of Hongshui River in Guangxi. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(10): 2208–2216 [汪开成, 吴志强, 武琳, 等. 广西红水河外来红腹罗非鱼形态差异分析. *西南农业学报*, 2018, 31(10): 2208–2216]
- Xiao W, Li DY, Zou ZY, *et al.* Comparative analysis of growth variations among four hybrid subgroups of *Oreochromis niloticus* ♀ × *O. Aureus* ♂ and their parental strains. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(5): 905–912 [肖炜, 李大宇, 邹芝英, 等. 四种杂交组合奥尼罗非鱼及其亲本的生长对比研究. *水生生物学报*, 2012, 36(5): 905–912]
- Xiao W, Li DY, Zou ZY, *et al.* Effects of morphometric attributes of xianghu strain of *Oreochromis niloticus* on its body weight. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(1): 433–438 [肖炜, 李大宇, 邹芝英, 等. 湘湖品系尼罗罗非鱼形态性状对体质量的影响. *西南农业学报*, 2015, 28(1): 433–438]
- Yu F, Zhang QW, Kong J, *et al.* Morphological variations and analyses of four imported turbot stocks, *Scophthalmus maximus*. *Marine Fisheries Research*, 2008, 29(5): 27–32 [于飞, 张庆文, 孔杰, 等. 大菱鲆4个进口群体的形态差异分析. *海洋水产研究*, 2008, 29(5): 27–32]
- Yang H, Zhu WB, Dong ZJ, *et al.* Morphological variation analysis of three populations of red tilapia. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, 24(5): 678–684 [杨慧, 朱文彬, 董在杰, 等. 3个红罗非鱼群体的形态差异分析. *上海海洋大学学报*, 2015, 24(5): 678–684]
- Yang H. Present situation of tilapia industry in our country and construction of modern industrial technology system. *China Fisheries*, 2010(9): 6–10 [杨弘. 我国罗非鱼产业现状及产业技术体系建设. *中国水产*, 2010(9): 6–10]

(编辑 冯小花)

Correlation Analysis and Morphological Difference and Contributions to Body Weight of Reciprocally-Crossed Subgroups of *Oreochromis niloticus* × *O. Aureus*

CHEN Binglin^{1,2}, XIAO Wei^{1,2}, ZOU Zhiying², ZHU Jinglin²,
LI Dayu², YU Jie², YANG Hong^{1,2①}, HU Pingge^{1,2}, MA Yinhua^{1,2}

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081;

2. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuxi 214081)

Abstract To study the effect of morphological difference and morphological characteristics on body weight of reciprocally-crossed subgroups of *Oreochromis niloticus* × *O. Aureus*, this study undertook to track and measure body weight and seven growth-related morphological traits, including total length, standard length, head length, body depth, caudal peduncle length, caudal peduncle depth, body width. Fifty individuals were randomly selected in the orthogonal group, and 50 males and 50 females were randomly selected in the backcrossing group for our analysis. All experimental fish are cultured in the same pond. The results showed that the total length, body depth and caudal peduncle depth 3 traits have a major impact on the weight of forward hybrid subgroups, thus establishing a multivariate regression equation related to body weight as $Y_{BW} = -154.286 + 9.016X_{TL} + 10.065X_{BD} + 17.884X_{CPD}$; Meanwhile for female individuals of reverse hybrid subgroups, total length and body depth, were two traits found to have a major impact on body weight, thus establishing a multivariate regression equation related to body weight as $Y_{BW} = -92.582 + 7.415X_{TL} + 8.727X_{BD}$; for male individuals, standard length and body depth are the two traits which have a major impact on body weight, thus establishing a multivariate regression equation related to body weight as $Y_{BW} = -120.299 + 8.661X_{SL} + 16.590X_{BD}$. In order to eliminate the influence of differences in body size among the individuals, we obtained seven proportion characteristics including BS, TS, HS, BDS, CLS, CDS, and BWS, respectively. In the characteristic coefficients plots of principal components factor scores, those seven proportion characteristics were divided into two groups, the first group concluded TS, BDS, CDS, BWS and HS, the other concluded BS and CLS. We drew a scatter plot through the score coefficients of every individuals in principal component factors PCR1 and PCR2. In the plot, the individuals of forward hybrid males could obviously be differentiated with reverse hybrid females. The conclusion showed that the morphological traits affecting body weight were different between different hybridization methods and different genders. In the selection of broodstock and the breeding of progeny, comprehensive traits selection should be adopted to improve the accuracy and stability of the breeding results.

Key words *Oreochromis niloticus* × *O. Aureus*; Path analysis; Multiple regression equation; Principal component analysis; Multi-trait breeding

① Corresponding author: YANG Hong, E-mail: yanghong@ffrc.cn