

DOI: 10.5846/stxb202003260695

叶乐,王海山,杨超杰,陈治,胡清雨.饥饿对眼斑双锯鱼(*Amphiprion ocellaris*)幼鱼形态性状与体质量相关性的影响.生态学报, 2021, 41(2): 761-768.

Ye L, Wang H S, Yang C J, Chen Z, Hu Q Y. Effect of starvation on the correlation between morphological characters and body weight in *Amphiprion ocellaris*. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 761-768.

饥饿对眼斑双锯鱼 (*Amphiprion ocellaris*) 幼鱼形态性状与体质量相关性的影响

叶 乐^{1,2,*}, 王海山^{1,2}, 杨超杰^{1,2}, 陈 治^{1,2}, 胡清雨^{1,2}

1 热带海洋生物资源利用与保护教育部重点实验室(海南热带海洋学院), 三亚 572022

2 海南省热带海洋渔业资源保护与利用重点实验室, 三亚 572022

摘要:本研究运用多变量路径分析技术,分析饥饿 7d(饥饿组)和非饥饿状态下(对照组)眼斑双锯鱼(*Amphiprion ocellaris*)幼鱼的体质量和形态特征之间的相互依赖关系。实验对两种状态下的幼鱼进行体质量(g)和全长(L_1)、体长(L_2)、体高(L_3)、头长(L_4)、头高(L_5)、吻长(L_6)、尾柄长(L_7)、尾柄高(L_8)、背鳍前距(L_9)、胸鳍前距(L_{10})、腹鳍前距(L_{11})、臀鳍前距(L_{12})、眼径(L_{13})等 13 个形态性状(mm)的准确测定。采用相关系数、决定系数、通径系数和回归方程等统计方法分析两种状态下眼斑双锯鱼幼鱼的形态性状对体质量的影响。结果显示,两个实验组 14 个性状间均存在极显著相关关系($P < 0.01$);剔除共线性影响后,通径分析筛选出了对照组对体质量影响显著的 4 个形态性状,直接作用由大到小排序: $L_3 > L_2 > L_6 > L_5$,间接作用由大到小排序: $L_5 > L_6 > L_2 > L_3$,单独决定系数由大到小排序: $L_3 > L_2 > L_5 > L_6$;饥饿组筛选出 5 个形态性状,直接作用由大到小是 $L_3 > L_2 > L_{12} > L_6 > L_7$,间接作用由大到小是 $L_7 > L_{12} > L_2 > L_6 > L_3$,单独决定系数由大到小为 $L_3 > L_2 > L_{12} > L_7 > L_6$;对照组和饥饿组体质量与形态性状的多元回归方程分别为: $W = -0.819 + 0.106L_3 + 0.027L_2 + 0.006L_6 - 0.050L_5$, $R^2 = 0.94$; $W = -0.778 + 0.078L_3 + 0.016L_{12} + 0.015L_2 - 0.055L_7 + 0.018L_6$, $R^2 = 0.930$ 。结果表明,饥饿影响了形态性状与体质量的相关性,但饥饿和非饥饿状态下体高、体长和吻长都是影响体质量的关键因子,其中体高是最主要的因子,该结果可在眼斑双锯鱼的选育工作中对选育指标的确定提供理论支持。

关键词: 眼斑双锯鱼;饥饿;形态性状;相关分析;通径分析

Effect of starvation on the correlation between morphological characters and body weight in *Amphiprion ocellaris*

YE Le^{1,2,*}, WANG Haishan^{1,2}, YANG Chaojie^{1,2}, CHEN Zhi^{1,2}, HU Qingyu^{1,2}

1 Key laboratory of Utilization and Conservation for Tropical Marine Bioresources (Hainan Tropical Ocean University), Ministry of Education, Sanya 572022, China

2 Hainan Key laboratory for Conservation and Utilization of Tropical Marine Fishery Resources, Sanya 572022, China

Abstract: *Amphiprion ocellaris* is one of the most popular marine ornamental fish species. Its growth performance has been degraded during artificial culture, so selective breeding programs aiming to improve growth is necessary. Some individuals of *A. ocellaris* may be starved for a relatively long period by some factors during artificial culturing. However, it remains unclear whether starvation has an effect on selecting suitable breeding index. In this study, multivariate path analysis was used to describe the relationship between body weight and morphological characteristics of juvenile *A. ocellaris* after 7 days of starvation (starvation group) and non-starvation (control group). Body weight (g) and 13 morphological characters

基金项目:海南省重点研发计划(ZDYF2019101);海南热带海洋学院科研启动资助项目(RHDXB201616)

收稿日期:2020-03-26; 网络出版日期:2020-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yele2008@163.com

(mm) such as total length (L_1), standard length (L_2), body depth (L_3), head length (L_4), head depth (L_5), snout length (L_6), caudal-peduncle length (L_7), caudal-peduncle depth (L_8), pre dorsal length (L_9), pre pectoral length (L_{10}), pre pelvic length (L_{11}), pre anal length (L_{12}), and eye diameter (L_{13}) were measured accurately. The statistical methods such as correlation coefficient, determination coefficient, path coefficient and regression equation were used to analyze the effects of morphological characteristics on body weight under two conditions. The results showed that there was a significant correlation between the 14 personality traits of the two experimental groups ($P < 0.01$); after removing the collinearity effect, the path analysis selected four morphological traits of the control group that had a significant impact on the body weight. The direct effect was ranked from large to small in the order of $L_3 > L_2 > L_6 > L_5$, and the indirect effect was ranked from large to small $L_5 > L_6 > L_2 > L_3$, and the order of independent determination coefficient was $L_3 > L_2 > L_5 > L_6$. For the starvation group, 5 morphological characters were selected, and the direct effect was $L_3 > L_2 > L_{12} > L_6 > L_7$, the indirect effect was $L_7 > L_{12} > L_2 > L_6 > L_3$, and the independent determination coefficient was $L_3 > L_2 > L_{12} > L_7 > L_6$. The maximum collaborative coefficient of determination to body weight was body height and body length both in the control group and the starvation group. For the control group and the starvation group, the multiple regression equations of body weight and morphological characters were $W = -0.819 + 0.106L_3 + 0.027L_2 + 0.006L_6 - 0.050L_5$, $R^2 = 0.941$; $W = -0.778 + 0.078L_3 + 0.016L_{12} + 0.015L_2 - 0.055L_7 + 0.018L_6$, $R^2 = 0.930$. The results showed that starvation affected the correlation between morphological traits and body weight, but body depth, body length and snout length were the key factors affecting body weight under starvation and non-starvation conditions, among which body depth was the most important factor. The results could provide theoretical support for the determination of breeding indexes in the selection and breeding work of *A. ocellaris*.

Key Words: *Amphiprion ocellaris*; starvation; morphometric traits; correlation analysis; path analysis

鱼类的形态特征信息是鱼类重要的分类依据之一,也是鱼类育种品种持续改良、利用和保护的前提^[1],因此,采集鱼类形态特征信息是鱼类育种的重要基础工作。由于体质量是揭示生长性能最直接的指标,因而成为鱼类育种中重要的目标性状,但在实际操作中,特别是对于个体较小的鱼类,体质量的测定需要精确的仪器且对操作环境也有比较严格的要求,另外,由于体表水分的影响测量误差较大,所以,寻找更为准确快捷又与体质量密切相关的指标成为许多研究工作的目标。通径分析可以将基本变量的相关性分解成直接和间接影响,从而更好地理解这些性状之间关联的原因^[2],为育种指标选取提供更可靠的依据。最近的研究表明,运用多元统计分析和通径分析,可以阐明菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)^[3]、凡纳滨对虾(*Penaeus vannamei*)^[4]、克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)^[5]、红蟹(*Charybdis feriata*)^[6]、牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)^[7]、小黄鱼(*Pseudosciaena polyactis*)^[8]、斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)^[9]和尖吻鲈(*Lates calcarifer*)^[10]的形态性状与体质量的相关性,因而可以选择形态性状替换体质量指标达到选育的目的。研究表明,鱼类形态信息存在着种内差异,与生境^[11-12]、性别^[13]、生长发育阶段^[7, 14-15]相关。在自然生境中,鱼类常受到饥饿的胁迫,因此,饥饿引起鱼类生长、组织生理、代谢、行为等方面的影响研究是目前热点研究领域^[16-18],而饥饿对鱼类形态特征影响方面的研究相对匮乏^[19]。

眼斑双锯鱼(*Amphiprion ocellaris*)俗称公子小丑,是海葵鱼亚科(*Amphiprioninae*)即小丑鱼家族的一员,是重要的海水观赏鱼种类之一。小丑鱼人工繁殖已经可以量产,但许多研究工作尚待开展,目前国内对于眼斑双锯鱼的报道仅见胚胎发育^[20]、营养^[21-22]和药物应激生理^[23]等方面,国外则多聚焦于性转化^[24]、领域行为^[25]和热应激^[26]等问题。在小丑鱼生产中已经出现种质退化生长缓慢现象,有必要开展快速生长品系的选育工作。由于个体差异和人为因素,养殖过程中某些个体可能会较长时间处于饥饿状态,目前,饥饿对眼斑双锯鱼形态性状与体质量相关性的影响未见报道,是否对选育指标的选择有影响也尚未可知。因此,本研究通过表型相关的通径分析,研究饥饿对眼斑双锯鱼幼鱼形态性状与体质量的相关性影响,旨在评估饥饿和非饥饿状态下影响眼斑双锯鱼体质量的主要形态性状,及其各性状对体质量的直接作用、间接作用和决定作用,得

出两种状态下体质量与形态性状的多元回归方程,为眼斑双锯鱼的选择育种工作提供参考资料、奠定理论基础,同时为眼斑双锯鱼生理生态学的研究积累基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料与方法

实验于 2019 年 12 月在海南热带海洋学院实验室进行。实验鱼购自海南万宁小丑鱼繁殖场,选取同一批亲鱼产卵孵化培育的 60d 健康幼鱼,打包充氧带回实验室,在实验室暂养 7d 后随机分到实验养殖缸中。实验设饥饿组 and 对照组,每组 3 个平行,每组 30 尾。养殖缸为 60 cm×40 cm×40 cm 玻璃缸,对照组正常投喂,每日投喂 2 次,饥饿组不投喂,其余养殖条件一致,循环水养殖,每天采用 7w 全光谱 Led 灯光照 12h,水温 25—26℃。实验进行 7d,实验结束后全部取样,然后采用 MS-222 麻醉剂进行麻醉后拍照和测量体质量。

1.2 数据测量和分析方法

用吸水纸吸干实验鱼体表水分后用精度为 0.001 g 的电子天平测量体质量(W, g),接着在体视显微镜下对每条鱼进行正反面拍照,在电脑上用 Image-Pro plus 6.0 软件准确测量每一尾幼鱼的形态性状(mm),包括全长(L_1)、体长(L_2)、体高(L_3)、头长(L_4)、头高(L_5)、吻长(L_6)、尾柄长(L_7)、尾柄高(L_8)、背鳍前距(L_9)、胸鳍前距(L_{10})、腹鳍前距(L_{11})、臀鳍前距(L_{12})、眼径(L_{13})等 13 个指标,精确至 0.001 mm。

测量的形态性状指标如图 1 所示,为减少操作误差,所有样品鱼的形态指标由两人分别测定,每人对鱼体左右侧所有指标各测定一次,综合两人测定的 4 组数据取平均值作为最后数值用于统计分析。

运用 IBM SPSS statistics 25 软件对数据进行统计分析。计算各性状的平均值和标准差。各性状变异系数(CV)的计算公式:

$$CV = (\text{标准差} / \text{平均值}) \times 100\%$$

先对因变量(体质量)进行正态性检验,检验合格后采用 Pearson 法对各形态性状与体质量进行相关分析;在此基础上运用逐步引入-剔除法建立形态性状与体质量的多元线性回归方程,通过形态性状对体质量的通径系数和间接通径系数,分析各形态性状对体质量的直接作用和间接作用。

决定系数计算公式:

$$d_i = P_i^2; d_{ij} = 2r_{ij} \times P_i \times P_j$$

式中, d_i 是单个性状*i*对体质量的影响, d_{ij} 是性状*i*和*j*对体质量的影响, r_{ij} 是性状*i*和*j*之间的相关系数, P_i, P_j 分别是单个性状*i, j*对体质量的通径系数。

2 结果

2.1 数据正态性验证

对因变量 W (体质量)进行正态性检验,结果显示 Shapiro-Wilk 显著性大于 0.05, Kolmogorov-Smirnov 显著性为 0.200(真显著性下限),数据服从正态分布,可以对体质量与形态特征进行回归分析。

2.2 表型数据描述性统计

对眼斑双锯鱼幼鱼体质量和形态性状数据进行描述性统计,结果见表 1。对照组和饥饿组变异系数最大

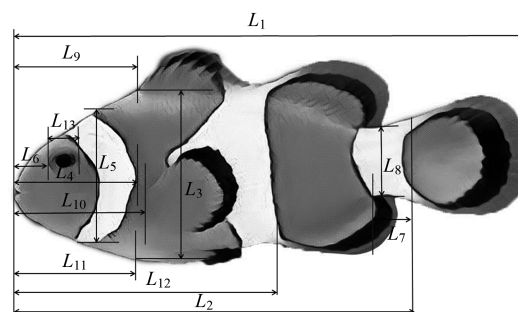


图 1 形态指标测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of morphological index measurement

L_1 : 全长, Total length; L_2 : 体长, Standard length; L_3 : 体高, Body depth; L_4 : 头长, Head length; L_5 : 头高, Head depth; L_6 : 吻长, Snout length; L_7 : 尾柄长, Caudal-peduncle length; L_8 : 尾柄高, Caudal-peduncle depth; L_9 : 背鳍前距, Pre dorsal length; L_{10} : 胸鳍前距, Pre pectoral length; L_{11} : 腹鳍前距, Pre pelvic length; L_{12} : 臀鳍前距, Pre anal length; L_{13} : 眼径, eye diameter

的均为 W (体质量) 参数 (32.651% 和 34.063), 而形态性状中变异系数最大的是 L_6 (吻长, 25.486% 和 20.689%), 最小的是 L_{13} (眼径, 8.708% 和 7.339%)。

表 1 表型性状的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of measurement phenotypic traits

性状 Traits	对照组 Control group			饥饿组 Starvation group		
	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%
W/g	0.459	0.150	32.651	0.389	0.133	34.063
L_1/mm	27.490	3.186	11.590	26.118	2.769	10.601
L_2/mm	22.039	2.404	10.909	21.399	2.241	10.474
L_3/mm	8.928	1.015	11.367	8.483	0.973	11.475
L_4/mm	6.308	0.675	10.692	6.218	0.645	10.366
L_5/mm	7.589	0.830	10.935	7.340	0.783	10.674
L_6/mm	1.431	0.365	25.486	1.531	0.317	20.689
L_7/mm	2.691	0.386	14.351	2.690	0.432	16.052
L_8/mm	4.120	0.590	14.308	3.997	0.444	11.106
L_9/mm	6.994	0.746	10.663	6.675	0.735	11.009
L_{10}/mm	7.306	0.882	12.077	7.367	0.832	11.295
L_{11}/mm	8.163	1.009	12.365	8.329	1.122	13.474
L_{12}/mm	14.361	1.870	13.025	12.807	1.510	11.793
L_{13}/mm	2.052	0.179	8.708	1.991	0.146	7.339

L_1 : 全长, Total length; L_2 : 体长, Standard length; L_3 : 体高, Body depth; L_4 : 头长, Head length; L_5 : 头高, Head depth; L_6 : 吻长, Snout length; L_7 : 尾柄长, Caudal-peduncle length; L_8 : 尾柄高, Caudal-peduncle depth; L_9 : 背鳍前距, Pre dorsal length; L_{10} : 胸鳍前距, Pre pectoral length; L_{11} : 腹鳍前距, Pre pelvic length; L_{12} : 臀鳍前距, Pre anal length; L_{13} : 眼径, eye diameter

2.3 各性状间的相关性分析

对饥饿组和对照组眼斑双锯鱼幼鱼表型数据进行相关性分析, 结果表明, 各性状间均存在显著相关关系, 达到极显著水平 ($P < 0.01$) (表 2), 说明形态性状对体质量以及这些性状之间存在线性相关。对照组形态性状对体质量相关系数的大小顺序 (r) 为 $L_3 > L_2 > L_1 > L_9 > L_5 > L_{10} > L_8 > L_{12} > L_{11} > L_4 > L_{13} > L_6 > L_7$, 饥饿组形态性状对体质量相关系数的大小顺序 (r) 为 $L_3 > L_1 > L_2 > L_5 > L_8 > L_4 > L_{10} > L_{12} > L_{11} > L_9 > L_{13} > L_6 > L_7$ 。对照组和饥饿组中与体质量相关系数最高的性状均为体高, 而其它形态性状与体质量相关系数排序两个组间存在一定的差别。

表 2 表型性状之间的相关性分析及显著性检验

Table 2 Correlation analyses and significance test on phenotypic traits

性状 Traits	W	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}	L_{11}	L_{12}	L_{13}
W	1.000	0.919	0.928	0.947	0.874	0.908	0.682	0.413	0.902	0.911	0.902	0.885	0.893	0.833
L_1	0.932	1.000	0.985	0.921	0.915	0.957	0.704	0.374	0.932	0.903	0.947	0.938	0.927	0.829
L_2	0.922	0.980	1.000	0.915	0.910	0.947	0.691	0.466	0.905	0.924	0.937	0.932	0.919	0.839
L_3	0.938	0.926	0.909	1.000	0.862	0.928	0.617	0.341	0.912	0.894	0.900	0.866	0.890	0.830
L_4	0.867	0.880	0.904	0.858	1.000	0.921	0.825	0.385	0.882	0.929	0.960	0.926	0.874	0.798
L_5	0.901	0.907	0.897	0.926	0.830	1.000	0.745	0.337	0.925	0.893	0.935	0.903	0.879	0.819
L_6	0.705	0.712	0.732	0.642	0.820	0.642	1.000	0.252	0.743	0.726	0.796	0.756	0.684	0.592
L_7	0.544	0.675	0.701	0.667	0.659	0.667	0.520	1.000	0.228	0.460	0.340	0.352	0.274	0.450
L_8	0.887	0.864	0.858	0.914	0.811	0.885	0.596	0.589	1.000	0.839	0.923	0.883	0.903	0.773
L_9	0.831	0.834	0.859	0.796	0.939	0.767	0.825	0.592	0.739	1.000	0.930	0.907	0.869	0.814
L_{10}	0.844	0.856	0.867	0.797	0.900	0.772	0.833	0.570	0.741	0.943	1.000	0.961	0.911	0.823
L_{11}	0.833	0.804	0.817	0.790	0.861	0.757	0.738	0.526	0.742	0.886	0.927	1.000	0.910	0.777
L_{12}	0.839	0.799	0.815	0.753	0.763	0.741	0.650	0.453	0.722	0.758	0.810	0.820	1.000	0.733
L_{13}	0.829	0.827	0.829	0.828	0.811	0.792	0.700	0.583	0.793	0.758	0.757	0.738	0.688	1.000

对角线右上方数值为对照组, 左下方数值为饥饿组; 所有相关性均为极显著 $P < 0.01$

2.4 通径分析结果

对照组和饥饿组形态性状对体质量的通径系数见表 3。剔除经共线性诊断共线性严重的变量和对体质量影响不显著的变量,对照组结果保留了 L_3 、 L_2 、 L_6 和 L_5 等 4 个形态性状变量,饥饿组结果保留了 L_3 、 L_{12} 、 L_2 、 L_7 和 L_6 等 5 个形态性状变量,所选性状对体质量的影响达到极显著水平($P<0.01$)。根据成分效应,相关系数可分为直接作用(通径系数)和间接作用(间接通径系数)两部分。对照组直接作用由大到小排序依次为: $L_3>L_2>L_6>L_5$,间接作用排序为: $L_5>L_6>L_2>L_3$;饥饿组直接作用由大到小排序依次为: $L_3>L_2>L_{12}>L_6>L_7$,间接排序为: $L_7>L_{12}>L_2>L_6>L_3$ 。可见,对照组和饥饿组中体高的直接作用均为最大(分别为 0.718 和 0.574),间接作用均为最小,也是所筛选出的形态性状中唯一的间接作用小于直接作用的性状;第二大直接作用均为体长(分别为 0.432 和 0.314);对照组直接作用最小为头高(-0.276),对体质量影响呈负向作用,但其间接作用最大(1.184),饥饿组直接作用最小为尾柄长(-0.178),同样呈负向作用,其间接作用也最大(0.730)。

表 3 相关系数分解

Table 3 Decomposition of correlation coefficient

组别 Group	性状 Traits	相关系数 Correlation coefficient	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect						合计 Total
				L_3	L_2	L_6	L_5	L_{12}	L_7	
对照组 Control group	L_3	0.947	0.718		0.395	0.090	-0.256			0.229
	L_2	0.928	0.432	0.657		0.101	-0.262			0.496
	L_6	0.682	0.146	0.443	0.299		-0.206			0.536
	L_5	0.908	-0.276	0.666	0.409	0.109				1.184
饥饿组 Starvation group	L_3	0.965	0.574		0.286	0.057		0.135	-0.119	0.359
	L_2	0.944	0.314	0.522		0.065		0.146	-0.125	0.607
	L_6	0.760	0.088	0.368	0.230			0.116	-0.093	0.622
	L_{12}	0.951	0.179	0.432	0.256	0.057			-0.081	0.665
	L_7	0.898	-0.178	0.383	0.220	0.046		0.081		0.730

2.5 形态性状对体质量的决定程度

对照组和饥饿组各形态性状对体质量的决定系数分别见表 4。表中,相同性状对应的数值为其对体质量的单独决定系数,两个不同性状对应的数值为它们对体质量的共同决定系数。从表中可看出,对体质量的单独决定系数由大到小排序对照组分别为 $L_3>L_2>L_5>L_6$,饥饿组为 $L_3>L_2>L_{12}>L_7>L_6$,可见,对照组和饥饿组单独决定系数最大均为体高,其次为体长,单独决定系数最小均为吻长。对照组和饥饿组共同决定系数最大的均为 L_3L_2 ,即体高和体长对体质量的共同决定作用最大。共同决定系数最小的对照组为 L_3L_5 (体高和头高)(-0.368),饥饿组为 L_3L_7 (体高和尾柄长)(-0.136),均为负向作用。两组体高的单独决定系数和与其它性状共同决定系数总和均为最高,说明不管鱼体饥饿状态如何,体高都是决定体质量最主要的因素。所有单独决定系数和两性状共同决定系数的总和为所筛选性状的总决定系数,对照组为 0.930,饥饿组为 0.941。由总决定系数计算剩余因子,对照组 $e=0.2638$,饥饿组 $e=0.2310$,说明两个实验组体质量决定因子除了筛选出的上述形态性状外,还有其它影响较小的因子。

2.6 多元回归方程构建

通过多元回归分析,剔除经共线性诊断共线性严重的变量和对体质量影响不显著的变量,分别建立了对对照组和饥饿组形态性状与体质量关系的多元回归方程:

$$W = -0.819 + 0.106L_3 + 0.027L_2 + 0.006L_6 - 0.050L_5 \quad (R^2 = 0.941, F = 267.294, P = 0.000);$$

$$W = -0.778 + 0.078L_3 + 0.016L_{12} + 0.015L_2 - 0.055L_7 + 0.018L_6 \quad (R^2 = 0.930, F = 267.294, P = 0.000)。$$

上述回归方程多重相关系数(R^2)均大于 0.85,表明所选的形态性状分别是影响对照组和饥饿组眼斑双锯鱼幼鱼体质量的关键因子。 F 检验结果显示,上述回归方程的回归关系均达极显著水平($P=0.000<0.01$);

t 检验结果显示,上述回归方程的形态性状对体质量的偏回归系数均达显著或极显著水平 ($P < 0.01$ 或 ($P < 0.05$) (表 5),所以总体回归方程是显著的。预测标准残差平均值及其标准差对照组为 0.000 ± 0.967 ,饥饿组为 0.000 ± 0.976 ,表明建立的多元回归方程较好的拟合了样本观测值。

表 4 形态性状对体质量的决定系数

Table 4 The determinant coefficient of the morphometric traits on the body weight

组别 Group	性状 Traits	决定系数 Determination coefficient					
		L_3	L_2	L_6	L_5	L_{12}	L_7
对照组 Control group	L_3	0.516	0.568	0.129	-0.368		
	L_2		0.187	0.087	-0.226		
	L_6			0.021	-0.060		
	L_5				0.076		
饥饿组 Starvation group	L_3	0.329	0.328	0.065		0.155	-0.136
	L_2		0.099	0.041			-0.078
	L_6			0.008			
	L_{12}		0.092	0.021		0.032	-0.029
	L_7			-0.016			0.032

表 5 模型的系数及其 t 检验结果

Table 5 The coefficient value of the model and its t-test results

组别 Group	指标 Index	系数 B	标准误	t	P
		Regression coefficient B	Standard error		
对照组 Control group	常量	-0.788	0.045	-17.350	0.000
	L_3	0.106	0.013	8.299	0.000
	L_2	0.027	0.006	4.469	0.000
	L_6	0.060	0.019	3.153	0.002
	L_5	-0.050	0.021	-2.331	0.022
饥饿组 Starvation group	常量	-0.778	0.038	-20.262	0.000
	L_3	0.078	0.011	7.409	0.000
	L_{12}	0.016	0.004	3.582	0.001
	L_2	0.015	0.004	3.499	0.001
	L_7	-0.055	0.012	-4.396	0.000
	L_6	0.037	0.018	2.101	0.039

3 讨论

相关性分析表明,所测量的 13 个眼斑双锯鱼幼鱼形态性状与体质量均存在极显著相关关系 ($P < 0.01$),显然,仅用相关分析不能客观描述性状间的相互关系,不能把最重要的表型性状筛选出来。所以为了剔除不必要的指标,有必要进行途径分析,最终找出影响幼鱼体质量的主要关键性状。途径分析可以将自变量对因变量的总影响分为直接影响和间接影响,并能充分反映性状之间关联的原因^[2]。一般来说,只有当自变量的表型相关系数达到因变量的显著水平时,才可以选择该自变量,否则,应将其排除在外^[27]。在途径分析和决定系数分析中,当相关性决定系数的总和 (R^2) 大于或等于 0.85 时,表明找到主要自变量^[28]。本研究未饥饿对照组和饥饿组分别筛选出 4 和 5 个形态性状,它们对体质量总的决定系数均大于 0.85,表明眼斑双锯鱼体质量变异主要是由这些形态性状决定的,它们分别代表未饥饿和饥饿状态下直接或间接影响眼斑双锯鱼体质量的关键因子。

本研究发现,饥饿胁迫影响着眼斑双锯鱼幼鱼形态性状与体质量的相关性,在非饥饿状态下体高、体长、吻长和头高等 4 个形态性状是决定鱼类体质量的主要性状,而饥饿状态下体高、臀鳍前距、体长、尾柄长和吻

长等 5 个形态性状是体质量主要的影响因子。此前研究表明,鱼类形态性状对体质量的影响存在种间差异,如对于二龄草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)体宽是最主要因素^[27];转基因鲤则是体长和体高^[28];野生小黄鱼体长对体质量的影响最大^[8];而对于 4 月龄斜带石斑鱼,全长是最主要因素^[9]。种内不同生长阶段也存在明显差异,如 6 月龄大菱鲂(*Scophthalmus maximus*),全长、体高、体厚和头长对体质量影响最大,而 14 月龄为全长、体厚和尾柄宽^[14];大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)6 月龄为体长、头长、体高和体宽,而 18 月龄则为全长、体高、尾柄高和体宽^[15]。另外,种内形态性状还表现群体差异和两性异形,如罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[11]和丽体鱼属的 *Cichlasoma festae*^[12]的野生群体和人工养殖群体之间的形态性状均存在显著差异;鲶鱼(*Silurus asotus*)和胡子鲶(*Clarias fuscus*)形态特征存在两性异形^[13],这些种内形态性状差异对其与体质量的相关性也可能有影响。目前已经证实环境因子对鱼类形态性状有影响,如曾令清等(2017)^[29]研究发现鳊幼鱼表型特征之间存在关联,且受环境条件的影响。由于生存环境和人为因素常导致鱼类处于饥饿的胁迫状态,对其能量代谢和行为^[18, 30]、鱼体成分^[31]、生理生化^[32]、游泳能力^[17, 33]等产生显著影响。鱼类形态结构与机能是相协调的,因此饥饿状态下可能存在鱼体形态变化适应策略。研究发现,中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)仔鱼随着饥饿程度增加,体长和体高均显著下降^[34],而鲤幼鱼饥饿后体高变化较其他参数明显,导致体高/体长明显下降,体型变得更加“细长”^[19]。这种体型的变化可能是饥饿状态下肌肉营养物质大量消耗以维持生命造成的,但这种变化也可能有利于降低鱼类游泳过程中能量消耗^[35],体现了鱼类对饥饿胁迫的形态适应。而本研究证实眼斑双锯鱼幼鱼对饥饿胁迫的形态适应,影响了其形态性状与体质量的相关性,但饥饿和非饥饿状态下的幼鱼也有共同的体质量决定因子,即体高、体长和吻长,其中体高在两种状态下都是最主要的决定因子。

为尽可能减少人为误差,许多形态测量研究取样的样本量都比较大,几百甚至几千尾,这样增加了工作量,另外形态测定时间过长难免造成鱼类死亡,本研究对常规测量方法做了改进,不采用游标卡尺现场测定,而是在使用麻醉剂麻醉后拍照,再用电脑软件测量,精确度高,而且对于同一批实验样本,采用 2 人测定正反面数据取平均值再统计,更进一步消除了人为误差,使得结果更为可信。同时可以减少取样量,实验鱼在拍照和测量体质量后即可放回水体中,用时极短,很大程度上减少测量操作造成鱼类的损伤。

4 结论与建议

本研究应用通径分析技术探索了饥饿和非饥饿状态下 13 个形态性状之间及其与体质量的相互依赖关系,有助于比较客观地分析和解释这些性状之间的相关模式。研究证实饥饿胁迫影响了眼斑双锯鱼幼鱼形态性状与体质量的相关性,但饥饿和非饥饿状态下体高、体长和吻长都是影响体质量的关键因子,因此不论眼斑双锯鱼幼鱼饥饿程度如何,可以均选择它们作为该鱼选育快速生长品系的重要参考性状,当然,这些形态计量性状应与遗传研究相结合,提供这些变量与体质量的遗传力和遗传相关性的信息。

参考文献(References):

- [1] Yakubu A, Muhammed M M, Ari M M, Musa-Azara I S, Omeje J N. Correlation and path coefficient analysis of body weight and morphometric traits of two exotic genetic groups of ducks in Nigeria. *Bangladesh Journal of Animal Science*, 2015, 44(1): 1-9.
- [2] Neto R V R, de Freitas R T F, Serafini M A, Costa A C, Freato T A, Rosa P V, Allaman I B. Interrelationships between morphometric variables and rounded fish body yields evaluated by path analysis. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 2012, 41(7): 1576-1582.
- [3] Huo Z M, Wu Y A, Gao Z Y, Chu G N, Yan X W, Yang F, Zhang G F. Effects of shell morphological traits on the weight trait of the orange strain of the Manila clam. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 75-78.
- [4] 刘小林, 吴长功, 张志怀, 黄皓, 李斌, 张愚夫, 孙成波, 相建海. 凡纳对虾形态性状对体重的影响效果分析. *生态学报*, 2004, 24(4): 857-862.
- [5] 张龙, 石林林, 李艳和. 克氏原螯虾形态与体重的通径分析. *中国农学通报*, 2019, 35(18): 148-153.
- [6] Zou X, Ma H Y, Lu J X, Gong Y Y, Xia L J. Mathematical analysis of morphological traits and their effects on body weight in the red crab (*Charybdis feriata*). *African Journal of Agricultural Research*, 2017, 12(6): 429-434.

- [7] 陈红林, 田永胜, 刘峰, 李洪, 李祥孔, 宋莉妮, 陈松林. 不同时期牙鲆形态性状对体重影响的通径分析及曲线拟合研究. 中国水产科学, 2016, 23(1): 64-76.
- [8] 刘峰, 陈琳, 楼宝, 詹炜, 陈睿毅, 徐冬冬, 王立改, 徐麒翔, 马涛, 毛国民. 小黄鱼(*Pseudosciaena polyactis*)形态性状与体质量的相关性及通径分析. 海洋与湖沼, 2016, 47(3): 655-662.
- [9] 赵旺, 杨蕊, 胡静, 马振华, 于刚, 王理. 斜带石斑鱼形态性状与体质量的相关性和通径分析. 水产科学, 2017, 36(5): 591-595.
- [10] 赵旺, 江森, 陈明强, 林凤昊, 杨蕊, 于刚, 孟祥君, 马振华. 离岸养殖与陆基养殖尖吻鲈形态性状与体质量的相关性研究. 海洋学报, 2018, 40(8): 53-62.
- [11] Ikpe E, Ekerette E, Udensi O, Ozoje M. Assessment of morphological variation in wild and cultured populations of tilapia Fish (*Oreochromis niloticus*). Journal of Advances in Biology & Biotechnology, 2017, 13(2): 1-10.
- [12] González M A, Rodríguez J M, Angón E, Martínez A, García A, Peña F. Characterization of morphological and meristic traits and their variations between two different populations (wild and cultured) of *Cichlasoma festae*, a species native to tropical Ecuadorian rivers. Archives Animal Breeding, 2016, 59(4): 435-444.
- [13] 樊晓丽, 林植华, 丁先龙, 朱吉峰. 鲶鱼和胡子鲶的两性异形与雌性个体生育力. 生态学报, 2014, 34(3): 555-563.
- [14] 刘莹, 于超勇, 于道德, 宋静静, 宋宗诚, 赵文溪, 刘洪军, 官曙光. 不同生长时期大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)形态性状与体质量的通径分析及曲线拟合研究. 广西科学院学报, 2018, 34(3): 181-190.
- [15] 李莉, 王雪, 菅玉霞, 刘元文, 高凤祥, 潘雷, 郭文, 胡发文. 不同月龄大鲢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.
- [16] 庞旭, 付世建, 曹振东, 张耀光. 饥饿和温度驯化对中华倒刺鲃静止代谢和游泳能力的影响. 生态学报, 2016, 36(7): 1854-1860.
- [17] 彭韩柳依, 曹振东, 付世建. 饥饿对鲫鱼幼鱼游泳能力的影响. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2756-2760.
- [18] 王蕾, 唐金玉, 覃英莲, 曾令清, 彭姜岚, 付世建. 饥饿对中华倒刺鲃幼鱼代谢、个性和集群的影响. 生态学报, 2019, 39(3): 1095-1104.
- [19] 李秀明, 韦艳洋, 付世建, 张耀光. 饥饿对鲤幼鱼体型特征的影响. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2016, 33(5): 24-28.
- [20] 张薇, 孙志宾, 马爱军, 夏丹丹, 王婷, 于宏. 双锯鱼属(*Amphiprion*)四种鱼种比较胚胎学研究和进化探讨. 海洋与湖沼, 2018, 49(3): 671-681.
- [21] 叶乐, 胡静, 赵旺, 王雨, 吴开畅. 饲料蛋白水平对眼斑双锯鱼幼鱼生长性能和体成分的影响. 水产科学, 2017, 36(1): 1-7.
- [22] 胡静, 叶乐, 赵旺, 王雨, 吴开畅. 饲料脂肪水平对眼斑双锯鱼幼鱼生长性能和体成分的影响. 中国饲料, 2016, (6): 25-28.
- [23] 高鸿伟, 胡静, 杨蕊, 周胜杰, 于刚, 马振华. 恩诺沙星对眼斑双锯鱼生理生化的影响. 天津农学院学报, 2019, 26(3): 62-67.
- [24] Thuong N P, Sung Y Y, Ambak M A, Abol-Munafi A B. The hormone 17 β -estradiol promotes feminization of juveniles protandrous hermaphrodite false clownfish (*Amphiprion ocellaris*). Marine and Freshwater Behaviour and Physiology, 2017, 50(3): 195-204.
- [25] Iwata E, Manbo J. Territorial behaviour reflects sexual status in groups of false clown anemonefish (*Amphiprion ocellaris*) under laboratory conditions. Acta Ethologica, 2013, 16(2): 97-103.
- [26] Madeira C, Madeira D, Diniz M S, Cabral H N, Vinagre C. Comparing biomarker responses during thermal acclimation: A lethal vs non-lethal approach in a tropical reef clownfish. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2017, 204: 104-112.
- [27] 李玺洋, 白俊杰, 樊佳佳, 于凌云, 梁旭方. 二龄草鱼形态性状对体质量影响效果的分析. 上海海洋大学学报, 2012, 21(4): 535-541.
- [28] 刘春雷, 常玉梅, 梁利群, 徐丽华, 刘金亮, 池炳杰, 吴学工. 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.
- [29] 曾令清, 付成, 奚露, 彭姜岚, 付世建. 鳊幼鱼能量代谢和个性行为的个体变异及表型关联. 生态学报, 2017, 37(14): 4807-4816.
- [30] 吴青怡. 饥饿和捕食胁迫对中华倒刺鲃幼鱼行为策略的影响[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2016.
- [31] Bjørnevik M, Hansen H, Roth B, Foss A, Vikingstad E, Solberg C, Imsland A K. Effects of starvation, subsequent feeding and photoperiod on flesh quality in farmed cod (*Gadus morhua*). Aquaculture Nutrition, 2017, 23(2): 285-292.
- [32] Park I S, Gil H W, Kim B S, Park K H, Oh S Y. Starvation-induced physiological responses and RNA/DNA ratios in rock bream, *Oplegnathus fasciatus*, and Olive Flounder, *Paralichthys olivaceus*. Development & Reproduction, 2017, 21(3): 249-257.
- [33] Yu X M, Chen L, Cui W D, Xing B B, Zhuang X, Zhang G S. Effects of acute temperature and salinity changes, body length and starvation on the critical swimming speed of juvenile tiger puffer, *Takifugu rubripes*. Fish Physiology and Biochemistry, 2018, 44(1): 311-318.
- [34] 黄洪贵, 胡振禧, 黄种持, 叶小军, 黄柳婷, 吴妹英. 饥饿对中华倒刺鲃仔鱼摄食、存活与生长发育的影响. 江西农业大学学报, 2010, 32(2): 231-235.
- [35] 王芳, 曹振东, 付世建, 陈波见. 中华倒刺鲃幼鱼的快速启动与逃逸行为. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2181-2186.