

室内循环水和池塘养殖四指马鲛的生长性能及形态性状与体质量的相关性研究

李俊伟¹, 区又君¹, 温久福¹, 胡瑞萍², 朱长波¹, 蓝军南¹, 李加儿¹, 周 慧¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所 / 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室 / 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300; 2. 广州市海威水产科技有限公司, 广东 广州 510300)

摘要: 采用相关性分析和通径分析研究了室内循环水和池塘养殖四指马鲛 (*Eleutheronema tetradactylum*) 的体质量和 12 个形态性状之间的关系。结果显示, 两个养殖群体的形态性状与体质量均呈极显著正相关 ($P<0.01$), 并且两个养殖群体各主要性状间的相关性达到极显著水平 ($P<0.01$)。与室内循环水养殖群体体质量相关程度较大的形态性状依次为叉长、体长、头长、尾柄高和全长; 与池塘养殖群体体质量相关程度较大的形态性状依次为全长、尾柄高、叉长、体长和体高。通径分析表明, 体长、体高、头长、体宽和眼径对室内循环水养殖四指马鲛体质量的直接作用达显著水平 ($P<0.05$), 以上形态性状的直接和间接决定系数总和为 1.418; 全长、尾柄高、体高、躯干长、头长对池塘养殖群体的体质量直接作用均达显著水平 ($P<0.05$), 以上形态性状的直接和间接决定系数总和为 0.968。结果表明, 池塘养殖环境鱼体的变异系数较大有利于良种选育, 而室内循环水养殖规格较均匀利于生产。不同养殖模式下, 四指马鲛形态性状与体质量的相关性分析可为其规模化养殖和选育技术优化提供理论依据。

关键词: 四指马鲛; 室内循环水养殖; 池塘养殖; 通径分析; 形态性状; 体质量

中图分类号: S 965.399

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Correlation among growth performance, morphological traits and body mass of *Eleutheronema tetradactylum* cultured in indoor circulating aquaculture system and aquaculture pond

LI Junwei¹, OU Youjun¹, WEN Jiufu¹, HU Ruiping², ZHU Changbo¹, LAN Junnan¹, LI Jia'er¹, ZHOU Hui¹

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecological Environment, Guangzhou 510300, China; 2. Guangzhou Haiwei Aquatic Science and Technology Co., Ltd., Guangzhou 510300, China)

Abstract: We applied correlation analysis and path analysis to explore the relationship between the body mass and the 12 morphological traits of *Eleutheronema tetradactylum* cultured in indoor circulating aquaculture system and aquaculture pond, which had significant correlation ($P<0.05$), and the correlation among the morphological traits of *E. tetradactylum* in the two systems was very sig-

收稿日期: 2019-08-13; 修回日期: 2019-09-24

资助项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项 (2018YFD0900200); 广东省“扬帆计划”引进创新创业团队项目 (2016YT03H038); 广东省省级科技计划项目 (2017B020204002); 广东省现代农业产业技术体系海水鱼产业创新项目 (2019KJ143)

作者简介: 李俊伟 (1982—), 男, 博士, 副研究员, 从事养殖生态学和水产养殖技术研究。E-mail: lijunwei303@163.com

通信作者: 区又君 (1964—), 女, 研究员, 从事鱼类生物学、发育生物学与水产养殖技术研究。E-mail: ouyoujun@126.com

nificant ($P<0.01$). The descending order of morphological traits which affected on the body mass of *E. tetradactylum* in indoor circulating aquaculture system and aquaculture pond were fork length>body length>head length>caudal peduncle height>total length, and total length>caudal peduncle height>fork length>body length>body height, respectively. The path analysis reveals that body length, body height, head length, body width and eye diameter had significant direct effects on the body mass of *E. tetradactylum* in indoor circulating aquaculture system ($P<0.05$). The total length, caudal peduncle height, body height, trunk length and head length had significant direct effects on the body mass of *E. tetradactylum* in aquaculture pond system ($P<0.05$). Besides, the total decision coefficients of those morphological traits to the body mass were 1.418 and 0.968 in indoor aquaculture system and aquaculture pond, respectively. The results reveal that larger variation coefficient of fish in aquaculture pond is conducive to the breeding of improved species, while more uniform specification of indoor circulating water culture is conducive to production. In different aquaculture environment, the correlation analysis of morphological traits and body mass of *E. tetradactylum* can provide theoretical basis for its large-scale cultivation and breeding technology optimization.

Key words: *Elentheronema tetradactylum*; Indoor circulating aquaculture system; Pond aquaculture; Path analysis; Morphological trait; Body mass

四指马鲛 (*Elentheronema tetradactylum*) 隶属于辐鳍鱼纲、鲈形目、马鲛亚目、马鲛科、四指马鲛属, 俗称午鱼、马友, 是一种暖温、广盐性鱼类, 主要分布于太平洋、印度洋西部以及澳大利亚西海岸, 在中国东海、南海均有分布^[1-2]。该鱼喜栖于近海、江河入海口, 捕食虾类、头足类、端足类以及小型鱼类等, 其生长速度快、肉质鲜美、无肋间刺, 具有较大的消费市场。四指马鲛野生群体的体延长, 侧扁, 形态优美, 观赏性和经济价值均较高。国内已经实现四指马鲛的全人工规模化繁育技术, 推动了其养殖业和科学研究进展。近年来国内外开展了四指马鲛的繁殖、发育和基础生物学^[3-7], 生长性状与生理变化^[8], 种群遗传结构^[9-10]和养殖技术^[11]等方面研究。

采用相关性分析和通径分析等方法可以确定不同养殖环境或不同养殖群体鱼的形态性状对体质量的影响。不同的养殖环境会影响水产养殖动物的形态性状、营养风味、规格均一性等^[12-13], 也会影响雌雄发育及优良性状的筛选^[14-15]。以往研究采用通径分析方法研究了不同养殖环境中的卵形鲳鲹 (*Trachinotus ovatus*)、褐点石斑鱼 (*Epinephelus fuscoguttatus*)、花鲈 (*Lateolabrax maculatus*)、黑鲷 (*Sparus macrocephalus*)、大泷六线鱼 (*Hexagrammos otakii*)、尖吻鲈 (*Lates calcarifer*) 等鱼体形态性状与体质量的相关性^[16-21], 也有研究比较分析了子代石斑鱼形态性状与亲本之间的相关性^[22]。因此, 形态性状与体质量的相关性研究可以指导鱼类选育技术和养殖模式优化。四指马鲛属于养殖新品种, 对外界声音、光线等环境因子变化应激强烈, 并且四指马鲛一直处于快速游泳状态, 在不同的养殖环

境中会表现出不同的生存和运动状态, 单一环境因子对四指马鲛体质量影响的研究尚未见报道。池塘和工厂化养殖模式的单一环境因子存在区别, 需要针对两种养殖模式中的综合影响进行研究分析。目前, 有关四指马鲛池塘养殖群体和工厂化养殖群体的生长性能、形态性状比较的研究报道较少见。

本研究比较了室内循环水养殖群体和池塘养殖群体四指马鲛的存活、生长情况, 并结合不同养殖群体的体质量和形态性状数据, 分析了主要形态性状指标对四指马鲛体质量的影响, 以及各形态性状指标之间的相关性, 并采用逐步回归分析方法建立室内循环水和池塘养殖四指马鲛群体的形态性状指标对体质量的多元回归方程, 以期对不同养殖模式或不同养殖环境下四指马鲛生长状况评估提供参考, 并为其规模化养殖和选育技术优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验动物和养殖

实验在南海水产研究所珠海试验基地进行, 采用人工繁殖同一批次产卵的四指马鲛鱼苗, 平均全长为 (1.23 ± 0.08) cm, 平均体质量为 $(0.001\ 4\pm 0.000\ 2)$ g。室内循环水养殖实验共用 6 个养殖桶 ($5\ \text{m}^3\cdot\text{个}^{-1}$), 放养密度为 $180\ \text{尾}\cdot\text{m}^{-3}$, 水体盐度为 10~13, pH 为 7.5~8.1, ρ (溶解氧) $\geq 6.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。池塘养殖密度为 $10\ \text{尾}\cdot\text{m}^{-3}$, 池塘面积为 $1\ 000\ \text{m}^2$, 水深 1 m, 池塘养殖水体盐度为 3~11, ρ (溶解氧) $\geq 5.0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2018 年 6 月放苗至 2019 年 1 月养殖实验结束, 养殖周期共 197 d。养殖实验第一周内投喂鳗鱼粉和丰年虫卵, 其他养殖过程投喂高级海水鱼饲料, 每

天投喂 2 次, 投喂量为鱼体质量的 5%~10%。实验结束时, 在两种养殖环境中分别选取 150 尾进行形态性状指标测定, 分别在每个养殖桶捕获 25 尾鱼作为室内循环水养殖样本。

1.2 测量性状与方法

鱼体形态性状指标包括四指马鲛的体质量(y)、全长(x₁)、叉长(x₂)、体长(x₃)、躯干长(x₄)、尾柄长(x₅)、头长(x₆)、吻长(x₇)、眼径(x₈)、体高(x₉)、尾柄高(x₁₀)、体宽(x₁₁)和眼间距(x₁₂)。采用电子天平称量鱼体质量, 精确到 0.01 g; 使用游标卡尺测量长度相关指标, 精确到 0.01 mm。

四指马鲛的成活率、饵料系数和特定生长率的计算公式为:

成活率 (SR)=实验结束时存活数量/实验初始时数量×100%

饲料系数 (FCR)=饲料投喂量/鱼体增质量

特定生长率 (SGR)=(ln 终末均质量-ln 初始均质量)/天数×100%

1.3 数据统计

运用软件 IBM SPSS Statistics 19.0 和 Excel 2010 对四指马鲛的形态性状指标和体质量等数据进行统计分析。采用 Excel 进行形态性状指标的描述性统计分析, 并应用 IBM SPSS 19.0 对两个养殖群体分别进行独立样本的 *t* 检验和 Duncan 多重比较, 通过相关分析确定形态性状指标之间的相关关系, 并运用通径分析方法确定各形态性状对四指马

鲛体质量的影响。数据分析和统计过程中, 每个养殖群体的样本量均为 150。

通过逐步回归分析, 建立形态性状指标对四指马鲛体质量(y)的多元回归方程: $y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+...+b_ix_i$, 式中 *y* 作为因变量, *b*₀ 为常数项, *b_i* 为因变量 *x_i* 对自变量的偏回归系数。通过对 *b_i* 的分子和分母分别除以 *x_i* 和 *y* 的标准差, 即 *x_i* 对 *y* 的直接通径系数: $Px_{i,y}=b_i \times \sigma_{x_i} / \sigma_y$ 。自变量 *x_i* 通过 *x_j* 对因变量 *y* 的间接通径系数公式为: $Px_{i,x_j}=r_{ij} \cdot P_{j,y}$ (*i*≠*j*), *P_{j,y}* 为自变量 *x_j* 对因变量 *y* 的直接通径系数, *r_{ij}* 为性状 *x_i* 和 *x_j* 之间的相关系数。直接决定系数 (*d_{ij}*) 计算公式为: $d_{ij}=2r_{ij}P_{i,y}P_{j,y}$, *P_{i,y}* 为自变量 *x_i* 对因变量 *y* 的直接通径系数, *P_{j,y}* 为自变量 *x_j* 对因变量 *y* 的直接通径系数, *r_{ij}* 为性状 *x_i* 和 *x_j* 之间的相关系数。间接决定系数 (*d_i*) 计算公式为: $d_i=P_{i,y}^2$, *P_{i,y}* 为自变量 *x_i* 对因变量 *y* 的直接通径系数。数据统计结果以 *P*<0.05 为差异显著, *P*<0.01 为差异极显著。

2 结果

2.1 不同养殖群体的生长性状比较

养殖实验结束时, 室内循环水和池塘养殖四指马鲛的成活率分别为 51% 和 55%, 特定生长率分别为 2.46% 和 2.16%, 饵料系数分别为 1.23 和 1.85, 单位面积产量分别为 2.34 kg·m⁻³ 和 0.10 kg·m⁻³ (表 1)。

表1 两种养殖环境下四指马鲛的生长特性

Table 1 Growth performance of *E. tetradactylum* in two aquaculture systems

养殖方式 Breeding method	成活率 SR/%	饵料系数 FCR	特定生长率 SGR/%	终末均质量 Final average mass/g	单位产量 Yield/(kg·m ⁻³)
室内循环水养殖 Indoor circulating aquaculture	51	1.23	2.46	127.64	2.34
池塘养殖 Pond culture	55	1.85	2.16	70.14	0.24

养殖实验结束时, 室内循环水养殖的鱼体质量介于 71.90~233.21 g, 平均质量为 127.64 g, 体长为 144.73~229.00 mm, 平均体长为 184.45 mm。室外池塘养殖的鱼体质量介于 22.06~287.00 g, 平均体质量为 70.14 g; 体长介于 111.20~247.50 mm, 平均体长为 152.54 mm (表 1)。室内循环水养殖与池塘养殖的四指马鲛在体质量以及全长和叉长等 12 个形态性状指标均呈极显著差异 (*P*<0.01); 室内循环水养殖情况下每月平均增长量为 21.27 g,

每月体长增长量为 30.74 mm。室外池塘养殖四指马鲛体质量平均每月增长 11.69 g, 体长平均每月增长 25.42 mm (表 2)。室内循环水养殖和池塘养殖四指马鲛体质量的变异系数分别为 26.03% 和 81.56%, 表明室内循环水养殖的四指马鲛体质量的均匀度高于池塘养殖。循环水养殖群体其他性状的平均值均大于池塘养殖群体, 可能与鱼体质量有较大关系。池塘养殖的鱼体形态指标变异系数均大于室内循环水养殖, 说明池塘养殖环境具有更高的

表2 两种养殖环境下四指马鲛的主要性状特征

Table 2 Charateristics of morphological traits of *E. tetradactyulum* cultured in two aquaculture systems

养殖方式 Breeding method	性状 Trait	体质量 y/g	全长 x ₁ /mm	叉长 x ₂ /mm	体长 x ₃ /mm	躯干长 x ₄ /mm	尾柄长 x ₅ /mm
室内循环水养殖 Indoor circulating aquaculture	平均值±标准差	127.64±33.22**	228.78±20.16**	199.96±17.60**	184.45±16.49**	43.09±4.80**	48.41±4.92**
	变异系数/%	26.03	8.81	8.80	8.94	11.14	10.17
	月平均增长量/g·月 ⁻¹ 或 mm·月 ⁻¹	21.27	38.13	33.32	30.74	7.18	8.07
池塘养殖 Pond culture	平均值±标准差	70.14±57.20**	194.63±42.96**	167.44±36.78**	152.54±34.12**	34.33±9.28**	38.60±8.27**
	变异系数/%	81.56	22.07	21.90	22.37	27.03	21.42
	月平均增长量/g·月 ⁻¹ 或 mm·月 ⁻¹	11.69	32.44	27.91	25.42	5.72	6.43

养殖方式 Breeding method	性状 Trait	头长 x ₆ /mm	吻长 x ₇ /mm	眼径 x ₈ /mm	体高 x ₉ /mm	尾柄高 x ₁₀ /mm	体宽 x ₁₁ /mm	眼间距 x ₁₂ /mm
室内循环水养殖 Indoor circulating aquaculture	平均值±标准差	48.99±4.06**	7.44±1.10**	10.33±1.16**	49.45±5.26**	22.86±2.37**	24.98±2.99**	15.60±1.82**
	变异系数/%	8.29	14.78	11.20	10.64	10.38	11.92	11.68
	月平均增长量/g·月 ⁻¹ 或 mm·月 ⁻¹	8.17	1.24	1.72	8.24	3.81	4.16	2.60
池塘养殖 Pond culture	平均值±标准差	41.15±8.04**	6.82±1.66**	8.57±1.38**	35.78±9.14**	17.67±5.56**	18.07±4.73**	12.84±3.13**
	变异系数/%	19.53	24.40	16.10	25.56	31.48	26.19	24.37
	月平均增长量/g·月 ⁻¹ 或 mm·月 ⁻¹	6.86	1.14	1.43	5.96	2.95	3.01	2.14

注：*. 显著差异 ($P<0.05$)；**. 极显著差异 ($P<0.01$)，下表同此

Note: y. Body mass; x₁. Total length; x₂. Fork length; x₃. Body length; x₄. Stem length; x₅. Caudal peduncle length; x₆. Head length; x₇. Snout length; x₈. Eye diameter; x₉. Body height; x₁₀. Caudal peduncle height; x₁₁. Body width; x₁₂. Eye distance; *. Significant difference ($P<0.05$); **. Very significant difference ($P<0.01$); the same cases in the following tables

选择潜力。

2.2 不同养殖群体形态性状之间的相关性分析

所测两个养殖群体四指马鲛的形态性状与体质量均呈正相关，且相关性达到极显著水平 ($P<0.01$)。池塘养殖群体的各形态性状与体质量的相关系数均大于室内循环水养殖群体形态性状与体质量的相关系数。室内循环水养殖群体的体质量与各形态性状相关关系中，相关程度最大的是叉长，其次是体长、头长、尾柄高、全长、体高、躯干长和体宽，相关程度最小的是吻长；而池塘养殖群体的体质量与形态性状相关性最大的是全长和尾柄高，其次为叉长、体长、体高、躯干长、头长和体宽，相关程度最小的为眼径。两个养殖群体各形态性状之间的相关系数均达到极显著水平 ($P<0.01$)，室内循环水养殖群体各性状之间相关性最大的是体长与叉长，池塘养殖群体的体长与叉长也具有最大的相关性；室内循环水养殖群体形态性状之间相关系数最小的是眼径与吻长，而池塘养殖群体形态性状之间相关系数最小的是体宽与眼径 (表 3)。

2.3 不同养殖群体形态性状对体质量的通径分析

室内循环水养殖四指马鲛的所有形态性状中，体长、头长、眼径、体高和体宽等 5 个形态性状对体质量的通径系数达到极显著水平。从直接作用系数来看，体长 (0.408)>体高 (0.337)>头长 (0.215)>体宽 (0.160)>眼径 (−0.096)，表明体长对四指马鲛体质量的直接作用最明显。眼径的直接作用系数为负值，表明眼径对体质量影响为负向作用，但眼径通过体长、体高、头长和体宽对体质量产生的间接作用分别为 0.218、0.124、0.200、0.09，其总的间接作用系数达 0.64，抵消了负向作用。从间接作用系数来看，头长 (0.642)>眼径 (0.64)>体宽 (0.583)>体高 (0.497)>体长 (0.471) (表 4)。

池塘养殖四指马鲛的所有形态性状中，全长、躯干长、头长、体高和尾柄高 5 个形态性状对体质量的通径系数达到极显著水平。从直接作用系数来看，全长 (0.417)>尾柄高 (0.391)>体高 (0.268)>躯干长 (0.122)>头长 (−0.206)，全长对体质量的直接作用最明显。头长对四指马鲛体质量的直接影响系

表3 不同四指马鲛养殖群体各形态性状间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients among morphological traits of <i>E. tetradactyululum</i> cultured in two aquaculture systems													
群体 Population	性状 Trait	体质量 y	全长 x ₁	叉长 x ₂	体长 x ₃	躯干长 x ₄	尾柄长 x ₅	头长 x ₆	吻长 x ₇	眼径 x ₈	体高 x ₉	尾柄高 x ₁₀	体宽 x ₁₁
室内循环水养殖 Indoor circulating aquaculture	x ₁	0.846**											
	x ₂	0.891**	0.937**										
	x ₃	0.880**	0.930**	0.987**									
	x ₄	0.770**	0.768**	0.806**	0.824**								
	x ₅	0.764**	0.753**	0.799**	0.835**	0.781**							
	x ₆	0.858**	0.877**	0.899**	0.890**	0.748**	0.740**						
	x ₇	0.531**	0.494**	0.499**	0.471**	0.449**	0.428**	0.595**					
	x ₈	0.545**	0.626**	0.586**	0.535**	0.521**	0.401**	0.579**	0.338**				
	x ₉	0.834**	0.707**	0.733**	0.681**	0.591**	0.553**	0.716**	0.518**	0.593**			
	x ₁₀	0.847**	0.755**	0.789**	0.777**	0.695**	0.693**	0.803**	0.501**	0.548**	0.839**		
	x ₁₁	0.744**	0.628**	0.662**	0.638**	0.659**	0.609**	0.588**	0.445**	0.614**	0.761**	0.705**	
	x ₁₂	0.615**	0.596**	0.628**	0.602**	0.595**	0.528**	0.597**	0.341**	0.617**	0.598**	0.658**	0.700**
池塘养殖 Pond culture	x ₁	0.975**											
	x ₂	0.973**	0.998**										
	x ₃	0.972**	0.998**	0.999**									
	x ₄	0.955**	0.971**	0.971**	0.972**								
	x ₅	0.928**	0.960**	0.960**	0.964**	0.927**							
	x ₆	0.954**	0.983**	0.983**	0.983**	0.949**	0.949**						
	x ₇	0.900**	0.913**	0.912**	0.908**	0.877**	0.873**	0.896**					
	x ₈	0.877**	0.898**	0.900**	0.894**	0.871**	0.861**	0.884**	0.871**				
	x ₉	0.970**	0.977**	0.976**	0.975**	0.945**	0.925**	0.969**	0.884**	0.876**			
	x ₁₀	0.975**	0.974**	0.972**	0.972**	0.947**	0.929**	0.958**	0.909**	0.883**	0.970**		
	x ₁₁	0.940**	0.943**	0.942**	0.943**	0.919**	0.913**	0.925**	0.865**	0.860**	0.947**	0.940**	
	x ₁₂	0.955**	0.969**	0.967**	0.968**	0.941**	0.937**	0.962**	0.877**	0.871**	0.964**	0.968**	0.919**

表4 室内循环水养殖四指马鲛形态性状对体质量的通径分析

Table 4 Path analysis of morphological traits to body mass of <i>E. tetradactyululum</i> in indoor circulating system								
性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect					
			合计 Σ	体长 x ₃	头长 x ₆	眼径 x ₈	体高 x ₉	体宽 x ₁₁
x ₃	0.880	0.408	0.471		0.191	−0.051	0.229	0.102
x ₆	0.858	0.215	0.642	0.363		−0.056	0.241	0.094
x ₈	0.545	−0.096	0.64	0.218	0.124		0.200	0.098
x ₉	0.834	0.337	0.497	0.278	0.154	−0.057		0.122
x ₁₁	0.744	0.160	0.583	0.260	0.126	−0.059	0.256	

数为负值,说明头长对体质量影响为负向作用,但头长通过全长、躯干长、体高和尾柄高产生较大的间接影响(分别为 0.410、0.116、0.260、0.375),其间接作用总和达到 1.161,完全抵消了其负向作

用。就间接作用系数来看,头长 (1.161)>躯干长 (0.833)>体高 (0.701)>尾柄 (0.585)>体宽 (0.559) (表 5)。

表5 池塘养殖四指马鲛形态性状对体质量的通径分析

性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect					
			合计 Σ	全长 x_1	躯干长 x_4	头长 x_6	体高 x_9	尾柄高 x_{10}
x_1	0.975	0.417	0.559		0.118	-0.202	0.262	0.381
x_4	0.955	0.122	0.833	0.405		-0.195	0.253	0.370
x_6	0.954	-0.206	1.161	0.410	0.116		0.260	0.375
x_9	0.970	0.268	0.701	0.407	0.115	-0.200		0.379
x_{10}	0.975	0.391	0.585	0.406	0.116	-0.197	0.260	

2.4 不同养殖群体形态性状对体质量的决定作用分析

将四指马鲛的形态性状与体质量的相关系数分成各形态性状直接影响及其通过其他形态性状的间接影响。室内循环水养殖四指马鲛的 5 个性状的决定与间接决定系数总和为 1.418 (表 6),表明体长、头长、眼径、体高和体宽是影响室内循环水养殖四指马鲛体质量的主要性状,且所选取的这 5 个性状对体质量的影响存在差异。从直接决定程度看,体宽对体质量的直接决定程度为 0.554,高于其他 4 个性状;从间接决定程度来看,体长、头长的共同影响对体质量的决定程度较高 (0.156)。

池塘养殖四指马鲛的 5 个形态性状直接决定作用系数与间接决定作用系数的总和为 0.968,说明全长、躯干长、头长、体高和尾柄高是影响室外池塘养殖四指马鲛体质量的主要形态性状;全长对四

指马鲛体质量的直接决定程度最大 (0.174),其次为尾柄高 (0.153),最小为躯干长 (0.015);从间接决定程度分析,全长和尾柄高共同作用对体质量的决定程度最大 (0.318) (表 7)。

表7 室外池塘养殖四指马鲛形态性状对体质量的决定作用系数

Table 7 Determinant coefficients of morphological traits to body mass of <i>E. tetradactylum</i> in aquaculture pond						
性状 Trait	全长 x_1	躯干长 x_4	头长 x_6	体高 x_9	尾柄高 x_{10}	合计 Σ
x_1	0.174	0.099	-0.169	0.218	0.318	
x_4		0.015	-0.048	0.062	0.090	
x_6			0.042	-0.107	-0.154	0.968
x_9				0.072	0.203	
x_{10}					0.153	

表6 室内循环水养殖四指马鲛形态性状指标对体质量的决定作用系数

Table 6 Determinant coefficients of morphological traits to body mass of <i>E. tetradactylum</i> in indoor circulating aquaculture system						
性状 Trait	体长 x_3	头长 x_6	眼径 x_8	体高 x_9	体宽 x_{11}	合计 Σ
x_3	0.166	0.156	-0.042	0.187	0.083	
x_6		0.046	-0.024	0.104	0.040	
x_8			0.009	-0.038	-0.019	1.418
x_9				0.114	0.082	
x_{11}					0.554	

2.5 多元回归方程的建立

通过多元回归方法,分别建立室内循环水养殖 (y_a)、池塘养殖 (y_b) 四指马鲛形态性状与鱼体质量的多元回归方程:

$$y_a = -231.439 + 0.823x_3 + 1.756x_6 - 2.771x_8 + 2.13x_9 + 1.788x_{11}$$
$$y_b = -134.385 + 0.555x_1 + 0.751x_4 - 1.467x_6 + 1.677x_9 + 4.020x_{10}$$

方程式中, y 为体质量, x_1 为全长, x_3 为体长, x_4 为躯干长, x_6 为头长, x_8 为眼径, x_9 为体高, x_{10} 为尾柄高, x_{11} 为体宽。

室内循环水养殖和池塘养殖的多元回归方程的回归关系均达极显著水平 ($F=234.27$, $P=0.000$;

$F=1\ 051.96$, $P=0.000$), R^2 分别为 0.891 和 0.968。室内循环水养殖所选的 x_3 、 x_6 、 x_8 、 x_9 、 x_{11} 对四指马鲛体质量的偏回归系数达到显著或极显著水平 ($x_3: t=6.367$, $P=0.000<0.01$; $x_6: t=3.211$, $P=0.002<0.01$; $x_8: t=-2.575$, $P=0.011<0.05$; $x_9: t=6.781$, $P=0.000<0.01$; $x_{11}: t=3.418$, $P=0.001<0.01$); 池塘养殖所选的性状 x_1 、 x_4 、 x_6 、 x_9 和 x_{10} 对四指马鲛体质量的偏回归系数达到极显著水平 ($x_1: t=3.538$, $P=0.001<0.01$; $x_4: t=2.120$, $P=0.035<0.05$; $x_6: t=-2.668$, $P=0.008<0.01$; $x_9: t=3.796$, $P=0.000<0.01$; $x_{10}: t=5.979$, $P=0.000<0.01$)。经过分析, 实验所得两个回归方程计算出的估测值与观测值无显著差异, 表明该多元线性回归方程可以准确反映两种养殖环境下四指马鲛形态性状与体质量之间的相互关系。

3 讨论

不同养殖环境会影响养殖鱼类的生长性能。不同养殖环境下, 养殖水体在水温、溶解氧、水体流速以及饵料等方面均不相同, 导致养殖鱼类生长性能出现差异。由于室内工厂化养殖的水温、天然饵料均低于池塘养殖模式, 造成室内养殖驼背鲈 (*Chromileptes altivelis*) 生长速度较慢^[23]; 美济礁内水温较高、病原微生物少、溶解氧含量较高、天然饵料丰富, 并且水体流速适合鱼的摄食和消化, 因此美济礁网箱养殖的尖吻鲈生长性能高于工厂化养殖^[15]。池塘内循环高密度养殖模式下, 养殖水体溶解氧充足、投料充分等因素, 使大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 生长性能明显高于常规池塘养殖^[24]。本研究中, 室内循环水养殖的四指马鲛生长速度、饵料系数、单位面积产量均高于池塘养殖, 并且鱼体规格均匀。室内循环水养殖和池塘养殖环境下四指马鲛体质量的变异系数分别为 26.02% 和 81.56%, 表明室内循环水养殖产品规格更加均匀。室内循环水养殖具有可控性强、高密度、易管理, 养殖鱼类摄食效率高, 生长速度较快, 规格均匀等优点^[25], 而池塘养殖容易受气候及环境因子影响, 如溶解氧降低、水温、盐度变化等, 养殖鱼体生长也受到一定影响。本实验中, 四指马鲛应激性较强, 室内循环水养殖系统中稳定的环境因子、足够的饵料等因素减轻了其应激强度, 鱼的摄食效率高, 可能是室内循环水养殖四指马鲛生长性能较好的主要原因。此外, 池塘养殖水体较大并且养殖期

间未分池, 容易形成比较明显的生长差异。室内循环水养殖模式中四指马鲛的成活率略较低, 其主要原因可能是: 1) 养殖桶水体较小, 四指马鲛的游泳速度快, 鱼的吻部与桶壁易发生碰撞而受伤感染; 2) 四指马鲛的驯化程度不够高。本实验中采用的四指马鲛为养殖新品种, 随着驯化程度的提升, 开展室内循环水养殖四指马鲛具有较大的应用前景。

形态性状是生物进化形成的特性, 主要由遗传基因决定, 同时也受到环境因子的影响而造成形态性状的差异。一般情况下, 相同体型的鱼类影响其体质量的主要形态性状具有相似性。侧扁型鱼类 (如卵形鲳鲹) 的体质量主要由体长、体高和体宽决定^[26]。圆筒型鱼类, 如叉斑狗母鱼 (*Synodus macrops*) 的体质量主要受体长、体高和体宽的影响^[27]。纺锤形鱼类 (如尖吻鲈) 体质量主要受体长 (全长) 和体高的影响^[15]。本实验中室内循环水养殖模式下影响四指马鲛体质量的主要形态性状包括叉长、体长、头长、尾柄高、全长、体高、躯干长和体宽, 而池塘养殖模式下影响四指马鲛体质量的主要形态性状包括全长、尾柄高、叉长、体长、体高、躯干长、头长和体宽, 均包含 8 个主要的形态指标, 而这些形态性状指标与以往研究影响侧扁体型鱼类体质量的形态性状相近。本研究中, 两种养殖环境下影响四指马鲛体质量的形态性状指标相关系数和重要性有所不同, 表明室内循环水养殖环境和池塘养殖环境在一定程度上造成了四指马鲛在形态性状方面的区别。

采用通径分析方法可以确定影响鱼类体质量的主要形态指标^[28], 进而分析影响鱼体形态性状的环境因素。同一批鱼苗在不同养殖环境下的形态性状会表现出明显差别, 陆基养殖环境中尖吻鲈的体质量主要受全长和体高的影响, 而离岸养殖条件下鱼体质量主要受体长、体高和尾柄长的影响, 分析其主要原因可能是由于深水网箱内水温较高、水体流动性强, 尖吻鲈的躯干和尾部运动量增加, 因此深水网箱养殖尖吻鲈的体长、体高和尾柄长是影响体质量的主要形态性状^[15]。本研究经过通径分析并确认回归曲线自变量后, 发现两种养殖模式下均有 5 个形态性状对体质量的通径系数显著相关。本研究通径分析发现, 影响室内循环水养殖四指马鲛体质量的主要指标为体长、体高、头长和体宽, 而影响池塘养殖鱼体质量的主要指标是全长、尾柄高、

体长、躯干长。四指马鲛在室内养殖桶中一直处于快速游泳过程,并且连续发生转弯动作,需要头部和尾部转动方向以及提供动力,可能造成头长、尾柄较为发达,成为影响鱼体质量的主要影响因子;而池塘内四指马鲛的游泳范围较广,速度可能更快,不需要经常变动方向,因此头长对体质量的影响系数较小。在不同的养殖环境中,四指马鲛均具有快速游泳的状态,因此叉长、体长、全长均是这两种养殖模式中体质量的主要影响因子。体长、体高和头长是对室内循环水养殖四指马鲛体质量影响的直接作用较大,而全长、尾柄高和体高对池塘养殖四指马鲛体质量的直接影响较大,不同的养殖环境影响了鱼的形态性状,从而对鱼的体型和生长产生影响。本研究发现,不同的养殖环境影响鱼的生物行为和游泳特征,进而对鱼的体型和生长产生影响。

4 结论

室内循环水系统中水温、盐度等环境因子稳定,并且饵料投喂等均充足,是四指马鲛生长性能优于池塘养殖的主要原因。四指马鲛的游泳速度快,而室内养殖桶水体较小限制了其游泳,鱼的吻部碰撞桶壁后容易受伤感染,这可能与四指马鲛的驯养程度还不够高有关。随着四指马鲛的驯化程度增强,开展室内循环水养殖四指马鲛具有较大的应用前景。本研究两种养殖模式影响四指马鲛体质量的主要形态性状均包括叉长、体长、头长、尾柄高、全长、体高、躯干长和体宽,只是相关系数和重要性略有不同。不同的养殖环境影响鱼的生物行为和游泳特征,进而对鱼的体型和生长产生影响,从而表现出不同作用系数和相关性。结合不同养殖环境中的生长性状表现,可以选择不同的性状指标进行良种选育或者养殖生产。通过多元回归分析,剔除偏回归系数不显著的形态性状指标,分别建立室内循环水养殖、池塘养殖四指马鲛形态性状与鱼体质量的多元回归方程:

$$y_a = -231.439 + 0.823x_3 + 1.756x_6 - 2.771x_8 + 2.13x_9 + 1.788x_{11}$$

$$y_b = -134.385 + 0.555x_1 + 0.751x_4 - 1.467x_6 + 1.677x_9 + 4.020x_{10}$$

参考文献:

- [1] WANG J J, SUN P, YIN F. Low mtDNA Cytb diversity and shallow population structure of *Eleutheronema tetradactylum* in the East China Sea and the South China Sea[J]. *Biochem Syst Ecol*, 2014, 55: 268-274.
- [2] MOORE B R, STAPLEY J, ALLSOP Q, et al. Stock structure of blue threadfin *Eleutheronema tetradactylum* across northern Australia, as indicated by parasites[J]. *J Fish Biol*, 2011, 78(3): 923-936.
- [3] 油九菊, 柳敏海, 傅荣兵, 等. 四指马鲛仔稚鱼发育及生长特征的初步研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2014, 29(6): 577-581.
- [4] 谢木娇, 区又君, 李加儿, 等. 不同发育阶段的四指马鲛消化道组织学比较研究[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(2): 51-58.
- [5] 罗俊标, 骆明飞, 汤清亮, 等. 四指马鲛池塘养殖试验[J]. *海洋与渔业*, 2016(8): 54-55.
- [6] 区又君, 谢木娇, 李加儿, 等. 广东池塘培育四指马鲛亲鱼初次性成熟和苗种规模化繁育技术研究[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(4): 97-104.
- [7] 周慧, 李加儿, 区又君, 等. 四指马鲛视网膜早期发育的组织学研究[J]. *动物学杂志*, 2017, 52(3): 458-467.
- [8] 齐明, 侯俊利, 楼宝, 等. 一龄四指马鲛形态性状对体重的影响分析[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2014, 33(2): 134-139.
- [9] NEWMAN S J, PEMBER M B, ROME B M, et al. Stock structure of blue threadfin *Eleutheronema tetradactylum* across northern Australia as inferred from stable isotopes in sagittal otolith carbonate[J]. *Fish Manag Ecol*, 2011, 18(3): 246-257.
- [10] 林少珍, 王丹丽, 王亚军, 等. 基于 CO I 序列分析东海区四指马鲛 (*Eleutheronema tetradactylum*) 的种群遗传结构[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(6): 1261-1265.
- [11] ABU HENA M K, IDRIS M H, WONG S K, et al. Growth and survival of Indian salmon *Eleutheronema tetradactylum* (Shaw, 1804) in brackish water pond[J]. *J Fish Aquat Sci*, 2011, 6(4): 479-484.
- [12] PARMA L, BADIANI A, BONALDO A, et al. Farmed and wild common sole (*Solea solea* L.): comparative assessment of morphometric parameters, processing yields, selected nutritional traits and sensory profile[J]. *Aquaculture*, 2019, 502: 63-71.
- [13] 赵旺, 江森, 陈明强, 等. 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[J]. *海洋学报*, 2018, 40(8): 53-62.
- [14] 郑尧, 陈家长, 邴旭文, 等. 不同养殖模式下雌核发育彭泽鲫雌雄鱼性别分化相关基因的表达差异[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(5): 986-993.
- [15] GJEDREM T. Genetic improvement for the development of efficient global aquaculture: a personal opinion review[J]. *Aquaculture*, 2012, 344: 12-22.
- [16] 区又君, 吉磊, 李加儿, 等. 卵形鲳鲹不同月龄选育群体主要形态性状与体质量的相关性分析[J]. *水产学报*, 2013, 37(7): 961-969.
- [17] 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[J]. *水产学报*, 2017, 41(7): 1105-1115.
- [18] 胡彦波, 温海深, 张美昭, 等. 花鲈形态性状对体质量的影响效果[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(2): 38-48.

- [19] 王雪, 李莉, 刘元文, 等. 3 月龄黑鲷形态性状对体质量的影响效果分析 [J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(2): 233-238.
- [20] 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 [J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(1): 58-66.
- [21] 陈红林, 田永胜, 刘峰, 等. 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 [J]. 中国水产科学, 2016, 23(1): 64-76.
- [22] 吴水清, 郑乐云, 罗辉玉, 等. 杂交石斑鱼 (斜带石斑鱼♀×赤点石斑鱼♂) 与其亲本形态性状比较研究 [J]. 南方水产科学, 2017, 13(5): 47-54.
- [23] 杨明秋, 刘金叶, 王永波, 等. 不同养殖模式对驼背鲈生长的影响 [J]. 热带生物学报, 2014, 5(2): 132-135.
- [24] 原居林, 刘梅, 倪蒙, 等. 不同养殖模式对大口黑鲈生长性能, 形体指标和肌肉营养成分影响研究 [J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(6): 1276-1285.
- [25] 王峰, 雷霖霖, 高淳仁, 等. 国内外工厂化循环水养殖研究进展 [J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1100-1111.
- [26] 程大川, 郭华阳, 马振华, 等. 3 月龄卵形鲳鲹形态性状对体质量的影响分析 [J]. 海洋渔业, 2016, 37(1): 26-34.
- [27] 谈佳玉, 徐文其, 欧阳杰, 等. 叉斑狗母鱼形态性状的相关性及通径分析 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(5): 71-75.
- [28] 赵旺, 胡静, 马振华, 等. 尖吻鲈幼鱼形态性状对体质量影响的通径分析及生长曲线拟合 [J]. 南方农业学报, 2017, 48(9): 1700-1707.