

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2016.15072

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

陈红林^{1,2}, 田永胜¹, 刘峰^{1,2}, 李洪^{1,2}, 李祥孔^{1,3}, 宋莉妮^{1,2}, 陈松林¹

1. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 青岛海洋科学与技术国家实验室; 海洋渔业科学与食品产出过程功能实验室, 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东 青岛 266071;
2. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306;
3. 大连海洋大学 水产与生命学院, 辽宁 大连 116023

摘要: 以 8 月龄与 14 月龄的养殖牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)为研究对象, 分别测定体重(Y)和 22 个形态性状, 对各性状进行相关分析, 并建立多元回归方程, 对各形态性状对体重的影响效果进行通径分析。分别以进入回归方程的各形态性状作为自变量, 体重为因变量进行曲线模型拟合, 筛选最优拟合模型。结果显示: (1)在不同生长阶段, 相同形态性状与体重的相关性存在差异。(2)8 月龄阶段, X_{18} (腹鳍基部到背鳍终点的直线距离)、 X_4 (体宽)和 X_{11} (背鳍起点到臀鳍起点的直线距离)对体重的通径系数达到极显著水平($P < 0.01$), 14 月龄阶段, X_{18} 、 X_{14} (背鳍终点到臀鳍终点的直线距离)和 X_9 (尾柄长)对体重的通径系数达到显著水平($P < 0.05$), 由此可知, 不同生长阶段, 影响体重的形态性状不尽相同。8 月龄和 14 月龄牙鲆形态性状对体重的多元回归方程分别为: $Y = -119.541 + 7.191X_{18} + 10.135X_4 + 7.197X_{11}$; $Y = -484.931 + 31.959X_{18} + 81.928X_{14} - 17.899X_9$ 。(3)8 月龄阶段, 将回归模型中的 3 个自变量分别与体重进行模型拟合, 最优拟合模型均为线性模型, 分别为: $Y = -117.866 + 15.724X_{18}$; $Y = -94.579 + 24.763X_4$; $Y = -100.602 + 33.184X_{11}$; 14 月龄阶段, 将回归模型中的 3 个形态性状分别与体重进行模型拟合, 最优拟合模型均为幂函数模型, 分别为: $Y = 0.036X_{18}^{3.063}$; $Y = 0.095X_{14}^{2.587}$; $Y = 62.249X_9^{1.584}$ 。本次研究表明, 在牙鲆的不同生长时期, 影响体重的主要形态性状不同, 两阶段适用的最优拟合模型也不同, 这为牙鲆不同时期的选择育种工作提供了理论依据。

关键词: 牙鲆; 相关分析; 通径分析; 回归方程; 模型拟合

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2016)01-0064-13

牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)是一种名贵的海产鱼类, 为冷、温水性底栖生物, 广泛分布于中国渤海、黄海和东海沿岸^[1]。牙鲆肉质鲜美, 营养丰富, 自 20 世纪 50 年代中国开始牙鲆养殖以来, 一直深受消费者喜爱。然而, 随着牙鲆养殖业的迅猛发展, 近亲交配情况日益严重, 导致牙鲆养殖群体的遗传多样性降低, 并出现生长速度缓慢、繁殖力下降、抗病力降低等一系列种质退化现象^[2]。为了保证牙鲆养殖业的健康发展, 需要对牙鲆的重要经济性性状进行遗传改良。国内外已有许多学者使用数量遗传学、分子标记等方法对牙鲆的生

长、抗病、抗逆等一系列性状进行研究^[3-6], 并取得了一定的进展^[7-8]。陈松林等^[9]利用选择育种、家系间杂交等技术, 培育出了生长快、成活率高的牙鲆新品种“鲆优 1 号”。相关分析、多元回归分析等方法已经广泛应用于水产动物的选育工作, 如鱼类^[10-13]、虾类^[14-16]、蟹类^[17-18]、贝类^[19-21]等, 主要是通过构建目标性状与关联形态性状的最优化数学模型来提高选育的准确性和效率。体重作为牙鲆的重要经济性性状, 是进行遗传改良的目标性状, 然而牙鲆活体重的测量有一定的操作难度, 鱼体体表残留的海水、肠道内残留饲料对

收稿日期: 2015-02-12; 修订日期: 2015-04-17.

基金项目: 国家 863 计划项目(2012AA10A408); 国家自然科学基金项目(31372510, 30972244); 山东省泰山学者建设工程专项资助。

作者简介: 陈红林, 硕士研究生, 主要从事海洋动物遗传育种研究. E-mail: shmilyweight@126.com

通信作者: 田永胜, 研究员. Tel: 0532-85831605; E-mail: tianys@ysfri.ac.cn

测量结果影响较大, 可能导致分析结果出现偏差。因此, 对各形态性状与体重进行相关分析, 确定影响体重的主要形态性状, 通过这些形态性状对体重进行间接选择, 将获得较好的选育效果, 在牙鲆^[22]、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)^[23]等已展开相关研究。本研究对更容易准确测量的形态性状(22 个)与体重进行相关分析和通径分析, 分别比较 8 月龄(幼鱼期)、14 月龄(成鱼期)牙鲆的 22 个形态性状与体重的关系, 确定影响体重的主要形态性状以及这些性状对体重的直接与间接作用。分别建立幼鱼期和成鱼期形态性状对体重的多元回归方程, 并以回归方程中的形态性状为自变量, 体重为因变量进行模型拟合, 筛选最优拟合模型, 为牙鲆的选种工作提供更加便捷、可行的方法。

1 材料与方法

1.1 实验数据的采集

实验使用的牙鲆样本采集自山东省海阳市黄海水产有限公司的 2013 年自然产卵受精后形成的多亲本后代混合养殖群体。待个体生长至 8 月龄和 14 月龄时, 分别随机取样 52 尾和 31 尾, 准确测量体重(Y)(测量前停食 1 天, 测量时使用 5℃ 水进行冷休克处理, 并擦干体表海水, 测定体重(Y)、全长(X_1)、体长(X_2)、尾鳍长(X_3)、体宽(X_4)、体厚(X_5)、头长(X_6)、吻长(X_7)、口斜裂长(X_8)、尾柄长(X_9)、背鳍起点到胸鳍基部的直线距离(X_{10})、背鳍起点到臀鳍起点的直线距离(X_{11})、背鳍起点到背鳍终点的直线距离(X_{12})、背鳍起点到臀鳍终点的直线距离(X_{13})、背鳍终点到臀鳍终点的直线距离(X_{14})、胸鳍基部到背鳍终点的直线距离(X_{15})、臀鳍起点到臀鳍终点的直线距离(X_{16})、腹鳍基部到背鳍起点的直线距离(X_{17})、腹鳍基部到背鳍终点的直线距离(X_{18})、腹鳍基部到臀鳍起点的直线距离(X_{19})、腹鳍基部到臀鳍终点的直线距离(X_{20})、眼间距(X_{21})以及眼径(X_{22}), 图 1 是部分形态性状示意图。使用电子天平测量体重(精确到 0.02 g), 游标卡尺测量形态性状(精确到 0.01 cm)。

1.2 分析方法

使用 SPSS 19.0 对 8 月龄和 14 月龄牙鲆的各性状数据进行描述性统计, 包括各性状的平均数、标准差和变异系数; 分别对 8 月龄和 14 月龄的牙鲆各性状数据进行 Pearson 相关分析; 以形态性状为自变量, 体重为因变量, 分别建立两个生长阶段的多元回归方程(剔除 F 检验不显著的性状), 回归方程等式为:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_i$$

式中, Y 为因变量, b_0 为截距, x_i 为自变量, b_i 为相应的回归系数。

通过对回归系数进行标准化可获得各自变量对因变量(体重)的通径系数, 计算公式为:

$$P_{y,x_i} = b_i \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_y}$$

式中, P_{y,x_i} 为通径系数, b_i 为自变量的回归系数, σ_{x_i} 为自变量的标准差, σ_y 为因变量的标准差。

利用自变量之间的相关系数及对因变量的通径系数, 可计算获得各个自变量对因变量的间接通径系数, 计算公式为:

$$P_{x_ix_j} = r_{ij} P_{j,y} (i \neq j)$$

式中, $P_{x_ix_j}$ 为间接通径系数, r_{ij} 为两个性状间的相关系数, $P_{j,y}$ 为通径系数。

为了研究单个形态性状与体重的关系, 分别以回归模型等式中的形态性状作为自变量, 体重作为因变量绘制散点图并进行曲线模型拟合, 筛选最优拟合模型, 本次研究选用了 6 个曲线模型(表 1)。

2 结果与分析

2.1 表型统计

表 2 列出了 8 月龄和 14 月龄牙鲆的体重和形态性状的描述性统计结果。结果显示, 各性状的变异系数在不同月龄均表现出差异。所有性状中, 体重的均值和变异系数在两个生长阶段均为最高。8 月龄牙鲆体重的平均值为 61.235 g, 变异系数为 32.277%。14 月龄牙鲆的体重为 262.981 g,

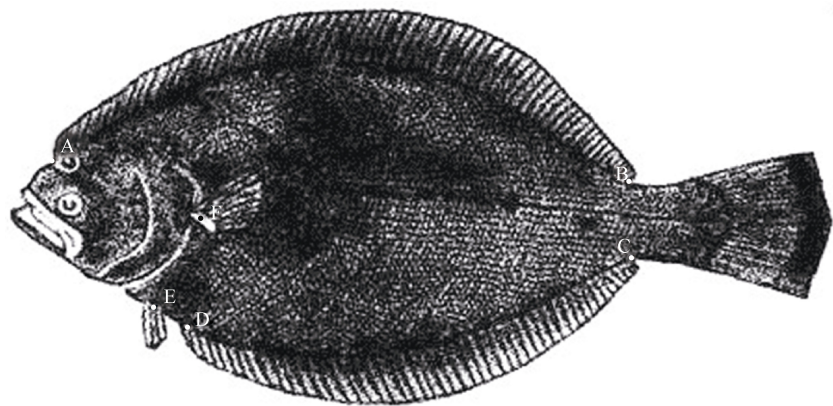


图 1 形态性状 $X_{10}\sim X_{20}$ 测量标准示意图

Fig. 1 The measurement criteria of morphological traits from X_{10} to X_{20}

A-F 是背鳍起点到胸鳍基部的直线距离(X_{10}); A-D 是背鳍起点到臀鳍起点的直线距离(X_{11}); A-B 是背鳍起点到背鳍终点的直线距离(X_{12}); A-C 是背鳍起点到臀鳍终点的直线距离(X_{13}); B-C 是背鳍终点到臀鳍终点的直线距离(X_{14}); F-B 是胸鳍基部到背鳍终点的直线距离(X_{15}); D-C 是臀鳍起点到臀鳍终点的直线距离(X_{16}); E-A 是腹鳍基部到背鳍起点的直线距离(X_{17}); E-B 是腹鳍基部到背鳍终点的直线距离(X_{18}); E-D 是腹鳍基部到臀鳍起点的直线距离(X_{19}); E-C 是腹鳍基部到臀鳍终点的直线距离(X_{20}).

A-F is the distance from the origin of dorsal fin to the base of pectoral fin (X_{10}); A-D is the distance from the origin of dorsal fin to the origin of anal fin (X_{11}); A-B is the distance of dorsal fin (from origin to the end) (X_{12}); A-C is the distance from the origin of dorsal fin to the end of anal fin (X_{13}); B-C is the distance from the end of dorsal fin to the end of anal fin (X_{14}); F-B is the distance from the base of pectoral fin to the end of dorsal fin (X_{15}); D-C is the distance from the origin to the end of anal fin (X_{16}); E-A is the distance from the base of pelvic fin to the origin of dorsal fin (X_{17}); E-B is the distance from the base of pelvic fin to the end of dorsal fin (X_{18}); E-D is the distance from the base of pelvic fin to the origin of anal fin (X_{19}); E-C is the distance from the base of pelvic fin to the end of anal fin (X_{20}).

表 1 拟合曲线模型公式

Tab. 1 Curve model and its formula used for model fitting

模型 model	公式 formula	模型 model	公式 formula
线性 linear	$y=b_0+b_1x$	生长 growth	$y=e^{(b_0+b_1/x)}$
对数 logarithmic	$y=b_0+b_1\ln x$	指数 exponential	$y=b_0e^{b_1x}$
幂函数 power	$y=b_0x^{b_1}$	逻辑斯蒂 logistic	$y=\frac{1}{[1/u+b_0(b_1^x)]}$

变异系数为 30.578%。在 8 月龄阶段, 变异系数最小的性状为 X_1 (全长), 在 14 月龄阶段则为 X_8 (口斜裂长)。

2.2 相关系数

表 3 和表 4 分别表示 8 月龄和 14 月龄时期牙鲆形态性状与与体重之间的相关关系分析结果。通过比较 8 月龄和 14 月龄牙鲆表型性状的相关系数可知, 8 月龄阶段, 与体重的相关系数达到 0.9 以上的性状为 X_1 、 X_2 、 X_4 、 X_{13} 、 X_{15} 、 X_{16} 、 X_{18} 、 X_{20} , 与体重的相关系数不显著的性状为 X_3 (表 3)。14 月龄阶段, 与体重的相关系数达到 0.9 以上的性状为 X_1 、 X_2 、 X_{14} 、 X_{15} 、 X_{16} 、 X_{17} 、 X_{18} 、 X_{20} , 与

体重的相关系数不显著的性状为 X_{22} (表 4)。综合以上结果可知, X_1 、 X_2 、 X_{15} 、 X_{16} 、 X_{18} 和 X_{20} 在幼鱼期和成鱼期均保持着与体重的高度相关性。同时, 这 6 个形态性状之间也表现出显著相关性 ($P<0.05$)。

2.3 直接与间接通径系数

根据相关分析的结果可知, 自变量数量较多, 各自变量之间的关系较为复杂, 因此, 本实验使用 SPSS19.0 分别对 8 月龄和 14 月龄阶段的各自变量与因变量进行通径分析。首先采用逐步法构建多元回归方程, 过程见表 5。从表中可以看出, 在 8 月龄时期剔除在回归方程中回归系数不显著

表 2 8 月龄和 14 月龄牙鲆体重与形态性状的描述性统计

Tab. 2 Descriptive statistics for the body weight and morphometric traits of 8 and 14 months old *Paralichthys olivaceus*

性状 trait	8 月龄 8 months			14 月龄 14 months		
	平均值 mean	标准差 SD	变异系数/% CV	平均值 mean	标准差 SD	变异系数/% CV
Y/g	61.235	19.764	32.277	262.981	80.415	30.578
X_1/cm	18.262	1.858	10.177	28.748	2.727	9.486
X_2/cm	15.567	1.711	10.990	24.447	2.484	10.160
X_3/cm	2.694	0.485	18.010	4.301	0.395	9.177
X_4/cm	6.292	0.763	12.127	10.272	1.407	13.693
X_5/cm	1.304	0.195	14.956	2.039	0.238	11.684
X_6/cm	4.421	0.465	10.527	6.352	0.827	13.024
X_7/cm	1.444	0.166	11.506	1.506	0.129	8.542
X_8/cm	1.940	0.235	12.130	2.903	0.237	8.152
X_9/cm	1.625	0.242	14.869	2.431	0.352	14.494
X_{10}/cm	3.404	0.407	11.965	5.688	0.577	10.138
X_{11}/cm	4.877	0.526	10.779	7.334	0.624	8.509
X_{12}/cm	12.335	1.393	11.294	20.468	2.801	13.687
X_{13}/cm	12.765	1.394	10.921	21.105	2.419	11.463
X_{14}/cm	1.662	0.226	13.597	2.593	0.310	11.948
X_{15}/cm	9.781	1.146	11.717	15.680	1.737	11.079
X_{16}/cm	10.131	1.102	10.876	16.266	1.799	11.058
X_{17}/cm	4.123	0.405	9.815	5.974	0.503	8.422
X_{18}/cm	11.390	1.208	10.604	18.116	1.893	10.447
X_{19}/cm	1.296	0.243	18.710	1.701	0.289	17.013
X_{20}/cm	11.173	1.193	10.677	17.663	1.920	10.869
X_{21}/cm	1.321	0.143	10.844	0.398	0.073	18.344
X_{22}/cm	0.590	0.066	11.255	1.034	0.126	12.195

注: Y 为体重、 X_1 为全长、 X_2 为体长、 X_3 为尾鳍长、 X_4 为体宽、 X_5 为体厚、 X_6 为头长、 X_7 为吻长、 X_8 为口斜裂长、 X_9 为尾柄长、 X_{10} 为背鳍起点到胸鳍基部的直线距离、 X_{11} 为背鳍起点到臀鳍起点的直线距离、 X_{12} 为背鳍起点到背鳍终点的直线距离、 X_{13} 为背鳍起点到臀鳍终点的直线距离、 X_{14} 为背鳍终点到臀鳍终点的直线距离、 X_{15} 为胸鳍基部到背鳍终点的直线距离、 X_{16} 为臀鳍起点到臀鳍终点的直线距离、 X_{17} 为腹鳍基部到背鳍起点的直线距离、 X_{18} 为腹鳍基部到背鳍终点的直线距离、 X_{19} 为腹鳍基部到臀鳍起点的直线距离、 X_{20} 为腹鳍基部到臀鳍终点的直线距离、 X_{21} 为眼间距、 X_{22} 为眼径。各形态性状对应的代码全文通用。

Note: Y is body weight; X_1 is total length; X_2 is body length; X_3 is tail fin length; X_4 is body width; X_5 is body thick; X_6 is the length of head; X_7 is snout length; X_8 is the length of mouth oblique crack; X_9 is the caudal peduncle length; X_{10} is the distance from the origin of dorsal fin to the base of pectoral fin; X_{11} is the distance from the origin of dorsal fin to the origin of anal fin; X_{12} is the distance of dorsal fin (from origin to the end); X_{13} is the distance from the origin of dorsal fin to the end of anal fin; X_{14} is the distance from the end of dorsal fin to the end of anal fin; X_{15} is the distance from the base of pectoral fin to the end of dorsal fin; X_{16} is the distance from the origin to the end of anal fin; X_{17} is the distance from the base of pelvic fin to the origin of dorsal fin; X_{18} is the distance from the base of pelvic fin to the end of dorsal fin; X_{19} is the distance from the base of pelvic fin to the origin of anal fin; X_{20} is the distance from the base of pelvic fin to the end of anal fin; X_{21} is interorbital distance; X_{22} is eye diameter. Codes corresponding to morphometric traits are universal in the full text.

的自变量性状后, 最终回归方程中只包括 3 个形态性状, 依次为 X_{18} 、 X_4 、 X_{11} , 这 3 个自变量的回归系数都是极显著($P<0.01$), 说明这 3 个性状对体重的影响是显著的, 而其他的形态性状对体重的影响不显著, 所以被全部剔除。8 月龄牙鲆形态性状与体重的多元线性回归方程等为: $Y=-119.541+7.191 X_{18}+10.135 X_4+7.197 X_{11}$ 。14 月龄

时期的回归方程同样只包含回归系数检验为显著的 3 个形态性状, 依次为 X_{18} 、 X_{14} 、 X_9 , 14 月龄的多元回归方程为: $Y=-484.931+31.959 X_{18}+81.928 X_{14}-17.889 X_9$ 。比较两个生长阶段各性状对体重的影响程度发现, X_{18} 对体重的影响在两个生长时期均为最显著。另外, 8 月龄的回归方程的相关指数为 0.965, 据此可以计算出剩余因子

表 3 8 月龄牙鲆各性状间的表型相关系数
Tab. 3 Phenotypic correlations between the studied traits of *Paralichthys olivaceus* at 8 months

性状 traits	Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁
X ₁	0.944**																					
X ₂	0.948**	0.966**																				
X ₃	0.273	0.423**	0.175																			
X ₄	0.956**	0.903**	0.921**	0.214																		
X ₅	0.675**	0.594**	0.641**	0.015	0.679**																	
X ₆	0.896**	0.936**	0.903**	0.403**	0.872**	0.604**																
X ₇	0.649**	0.611**	0.606**	0.203	0.623**	0.539**	0.642**															
X ₈	0.839**	0.877**	0.822**	0.459**	0.779**	0.590**	0.857**	0.620**														
X ₉	0.328*	0.442**	0.462**	0.065	0.315*	0.318*	0.349*	0.270	0.296*													
X ₁₀	0.826**	0.851**	0.838**	0.305*	0.793**	0.444**	0.831**	0.536**	0.802**	0.298*												
X ₁₁	0.883**	0.849**	0.833**	0.315*	0.829**	0.552**	0.798**	0.587**	0.825**	0.256	0.764**											
X ₁₂	0.825**	0.879**	0.832**	0.434**	0.799**	0.567**	0.853**	0.456**	0.807**	0.404**	0.736**	0.732**										
X ₁₃	0.929**	0.968**	0.938**	0.399**	0.894**	0.611**	0.917**	0.606**	0.849**	0.384**	0.857**	0.833**	0.894**									
X ₁₄	0.804**	0.751**	0.763**	0.186	0.783**	0.622**	0.771**	0.490**	0.705**	0.237	0.637**	0.716**	0.726**	0.758**								
X ₁₅	0.910**	0.917**	0.910**	0.301*	0.887**	0.551**	0.819**	0.503**	0.813**	0.347*	0.765**	0.838**	0.786**	0.894**	0.766**							
X ₁₆	0.946**	0.965**	0.955**	0.329*	0.918**	0.635**	0.905**	0.577**	0.831**	0.444**	0.832**	0.831**	0.867**	0.956**	0.810**	0.917**						
X ₁₇	0.574**	0.562**	0.645**	-0.120	0.575**	0.404**	0.500**	0.474**	0.466**	0.433**	0.522**	0.579**	0.402**	0.502**	0.422**	0.562**	0.540**					
X ₁₈	0.961**	0.964**	0.947**	0.353*	0.924**	0.617**	0.912**	0.580**	0.837**	0.353*	0.856**	0.835**	0.857**	0.964**	0.802**	0.928**	0.970**	0.529**				
X ₁₉	0.503**	0.402**	0.331*	0.371**	0.436**	0.340*	0.452**	0.316*	0.456**	-0.162	0.401**	0.499**	0.439**	0.388**	0.355**	0.394**	0.372**	0.129	0.442**			
X ₂₀	0.955**	0.978**	0.964**	0.346*	0.909**	0.625**	0.914**	0.617**	0.845**	0.414**	0.841**	0.854**	0.846**	0.963**	0.763**	0.927**	0.959**	0.568**	0.979**	0.429**		
X ₂₁	0.736**	0.706**	0.716**	0.177	0.714**	0.537**	0.675**	0.454**	0.602**	0.222	0.637**	0.618**	0.585**	0.618**	0.559**	0.641**	0.682**	0.577**	0.696**	0.375**	0.679**	
X ₂₂	0.408**	0.486**	0.447**	0.284*	0.366**	0.290*	0.527**	0.252	0.489**	0.272	0.480**	0.325*	0.419**	0.409**	0.275*	0.381**	0.438**	0.213	0.426**	0.278*	0.432**	0.434**

注: *表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$).

Note: * denotes significant correlation ($P<0.05$), ** denotes extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 4 14 月龄牙鲆各性状间的表型相关系数
Tab. 4 Phenotypic correlations between the studied traits of *Paralichthys olivaceus* at 14 months

性状 traits	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}	X_{21}
X_1	0.967**																					
X_2	0.967**	0.993**																				
X_3	0.598**	0.661**	0.566**																			
X_4	0.831**	0.864**	0.879**	0.438*																		
X_5	0.686**	0.602**	0.578**	0.524**	0.434*																	
X_6	0.427*	0.429*	0.436*	0.216	0.411*	0.219																
X_7	0.758**	0.775**	0.784**	0.419*	0.694**	0.419*	0.297															
X_8	0.860**	0.883**	0.878**	0.577**	0.827**	0.488**	0.415*	0.827**														
X_9	0.603**	0.721**	0.743**	0.311	0.724**	0.274	0.411*	0.574**	0.580**													
X_{10}	0.836**	0.775**	0.775**	0.478**	0.654**	0.779**	0.359*	0.610**	0.774**	0.354												
X_{11}	0.882**	0.901**	0.915**	0.461**	0.798**	0.601**	0.417*	0.727**	0.869**	0.680**	0.819**											
X_{12}	0.758**	0.724**	0.776**	0.119	0.675**	0.447*	0.316	0.592**	0.618**	0.586**	0.623**	0.725**										
X_{13}	0.872**	0.922**	0.921**	0.573**	0.767**	0.477**	0.362*	0.752**	0.758**	0.780**	0.577**	0.816**	0.727**									
X_{14}	0.938**	0.900**	0.884**	0.653**	0.758**	0.686**	0.473*	0.699**	0.840**	0.539**	0.784**	0.817*	0.678**	0.825**								
X_{15}	0.956**	0.979**	0.980**	0.596**	0.833**	0.600**	0.389*	0.732**	0.831**	0.715**	0.755**	0.874**	0.759**	0.901**	0.855**							
X_{16}	0.967**	0.967**	0.968**	0.592**	0.828**	0.618**	0.384*	0.681**	0.833**	0.656**	0.778**	0.863**	0.759**	0.886**	0.893**	0.978**						
X_{17}	0.901**	0.906**	0.916**	0.493**	0.804**	0.520**	0.512*	0.761**	0.882**	0.631**	0.803**	0.913**	0.744**	0.820**	0.872**	0.869**	0.886**					
X_{18}	0.978**	0.983**	0.985**	0.590**	0.846**	0.663**	0.392*	0.752**	0.849**	0.680**	0.816**	0.898**	0.752**	0.891**	0.883**	0.986**	0.978**	0.879**				
X_{19}	0.645**	0.687**	0.672**	0.516**	0.529**	0.546**	0.048	0.559**	0.622**	0.480**	0.682**	0.672**	0.491**	0.606**	0.554**	0.688**	0.631**	0.542**	0.707**			
X_{20}	0.974**	0.982**	0.981**	0.611**	0.849**	0.676**	0.390*	0.748**	0.857**	0.680**	0.813**	0.905**	0.753**	0.895**	0.889**	0.986**	0.977**	0.881**	0.994**	0.692**		
X_{21}	0.703**	0.644**	0.659**	0.298	0.575**	0.548**	0.365*	0.440*	0.550**	0.401*	0.545**	0.641**	0.594**	0.619**	0.750**	0.652**	0.679**	0.689**	0.654**	0.265	0.669**	
X_{22}	0.218	0.161	0.144	0.209	-0.065	0.582**	0.012	0.065	0.162	-0.145	0.545**	0.215	0.174	0.005	0.169	0.217	0.216	0.110	0.253	0.492**	0.250	0.048

注: *表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$).

Note: * donates significant correlation ($P<0.05$), ** donates extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 5 8 月龄和 14 月龄牙鲆偏回归系数和回归常数表
Tab. 5 Partial regression coefficient and regression constants of *Paralichthys olivaceus* at 8 and 14 month

生长阶段 growth stages	变量 variable	相关指数 <i>R</i> square	非标准化系数 unstandardized coefficient		t 统计量 t-stat	<i>P</i> .
			系数 <i>B</i>	标准误 <i>SE</i>		
8 月龄 8 months	常数 constant	0.965	-119.541	5.324	-22.454	0.000
	X_{18}		7.191	1.218	5.905	0.000
	X_4		10.135	1.895	5.349	0.000
	X_{11}		7.197	1.908	3.772	0.000
	常数 constant	0.984	-484.931	18.836	-25.745	0.000
14 月龄 14 months	X_{18}		31.959	2.575	12.413	0.000
	X_{14}		81.928	13.685	5.986	0.000
	X_9		-17.889	7.695	-2.325	0.028

注: X_{18} 为腹鳍基部到背鳍终点的直线距离, X_4 为体宽, X_{11} 为背鳍起点到臀鳍起点的直线距离, X_{14} 为背鳍终点到臀鳍终点的直线距离, X_9 为尾柄长。

Note: X_{18} is the distance from the base of pelvic fin to the end of dorsal fin; X_4 is body width; X_{11} is the distance from the origin of dorsal fin to the origin of anal fin; X_{14} is the distance from the end of dorsal fin to the end of anal fin; X_9 is caudal peduncle length.

$e=\sqrt{1-R^2}=0.187$, 而 14 月龄回归方程的相关指数为 0.984, 则 $e=0.126$, 从相关指数可以看出, 两个生长时期构建的回归方程具有较好的参考价值, 但是根据剩余因子的计算结果可以看出, 在 8 月龄和 14 月龄时期构建的回归方程虽然能够很好的解释体重, 但是都还存在一些因素未被纳入到回归方程中, 因此还需要开展更加深入的研究实现不同时期牙鲆体重影响因素的全面分析。

多元线性回归方程的回归系数经过标准化之后可获得各形态性状对体重的通径系数, 也称作直接通径系数。同时, 根据相关系数计算各性状对体重的间接通径系数, 结果见表 6。8 月龄和 14

月龄阶段均有 3 个性状对体重的直接通径系数达到显著水平。其中, X_{18} 在两个发育阶段均为直接通径系数最高的性状(8 月龄为 0.439, 14 月龄为 0.752), 同时, X_{18} 对体重的间接通径系数在两个发育阶段中均为最低(8 月龄为 0.522, 14 月龄为 0.226)。比较两个生长阶段可以发现, 随着牙鲆的生长, X_{18} 对体重的直接通径系数增大, 间接通径系数减小, 说明不同生长时期, 形态性状对体重的影响是在不断变化的。另外, 在 8 月龄时期, 3 个主要性状对体重的间接作用均大于直接作用, X_{11} 性状对体重的直接通径系数最小(0.191), 而间接通径系数最大(0.692), 说明 X_{11}

表 6 形态性状对体重的直接与间接通径系数
Tab. 6 Direct and indirect path coefficients of morphological trait to body weight

阶段 stage	性状 trait	相关系数 correlation coefficient	通径系数 path coefficient	间接通径系数 indirect path coefficient			
				总和 total	X_{18}	X_4	X_{11}
8 月龄 8 months	X_{18}	0.961**	0.439**	0.522	—	0.361	0.159
	X_4	0.956**	0.391**	0.565	0.406	—	0.158
	X_{11}	0.883**	0.191**	0.692	0.367	0.324	—
14 月龄 14 months	X_{18}	0.978**	0.752**	0.226	X_{18}	X_{14}	X_9
	X_{14}	0.938**	0.316**	0.622	0.664	—	-0.069
	X_9	0.603**	-0.078*	0.681	0.511	0.170	—

注: *表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$)。 X_{18} 为腹鳍基部到背鳍终点的直线距离, X_4 为体宽, X_{11} 为背鳍起点到臀鳍起点的直线距离, X_{14} 为背鳍终点到臀鳍终点的直线距离, X_9 为尾柄长。

Note: * donates significant correlation ($P<0.05$); ** donates extremely significant correlation ($P<0.01$). X_{18} is the distance from the base of pelvic fin to the end of dorsal fin; X_4 is body width; X_{11} is the distance from the origin of dorsal fin to the origin of anal fin; X_{14} is the distance from the end of dorsal fin to the end of anal fin; X_9 is caudal peduncle length.

主要是通过另外两个性状对体重实现间接作用。在 14 月龄时期, X_{18} 对体重的直接作用大于间接作用, 而 X_{14} 和 X_9 的表现与 8 月龄相同, 都是间接作用大于直接作用, 其中 X_9 对体重的直接作用为负值, 而间接作用为很高的正值, 说明 X_9 只能通过另外两个性状对体重起到间接的正向作用。在各形态性状对体重的间接影响中, 通过 X_{18} 所产生的间接作用均为最大。

2.4 模型拟合

以多元回归方程中的形态性状(8 月龄为 X_{18} 、 X_4 、 X_{11} , 14 月龄为 X_{18} 、 X_{14} 、 X_9)作为自变量, 体重作为因变量, 使用 6 种曲线模型进行拟合(表 7、表 8)。结果显示, 在 8 月龄阶段, X_{18} 、 X_4 和 X_{11} 与体重的最优拟合模型均为线性模型, 拟合优度(R^2)分别为 0.923、0.914 和 0.779, 拟合模型分别为: $Y = -117.866 + 15.724X_{18}$; $Y = -94.579 + 24.763 X_4$; 14 月龄阶段, X_{18} 、 X_{14} 和 X_9 与体重的最优拟合模型均为幂

函数模型, R^2 分别为 0.961、0.816 和 0.510, 拟合模型分别为: $Y = 0.036X_{18}^{3.063}$; $Y = 0.095X_{14}^{2.587}$; $Y = 62.249X_9^{1.584}$ 。

3 讨论

3.1 表型性状

对比不同月龄牙鲆的表型统计结果可以发现, 从 8 月龄到 14 月龄, 牙鲆的体重平均值从 61.235 g 增长到了 262.981g, 增长率为 330%, 说明牙鲆在这一阶段的生长非常迅速; 牙鲆体重的变异系数从 32.277% 降至 30.578%, 说明牙鲆在幼鱼期的个体差异大于成鱼期, 比成鱼期具有更高的选择潜力。

3.2 相关分析

相关分析是研究变量间密切程度的一种统计分析方法, 当分析多个事物之间的关系, 且这种关系又是变量之间的数量关系时, 可用双变量相

表 7 8 月龄牙鲆形态性状与体重 6 种模型拟合结果
Tab.7 Models curve estimation results of *Paralichthys olivaceus* at 8 months

回归 regression	模型 model	模型汇总 model summary		参数估计 parameter estimate	
		拟合优度 R^2	F 统计量 F-stat	常数 constant	系数 b_1
$X_{18}-Y$	线性 linear	0.923	602.640	-117.866	15.724
	对数 logarithmic	0.911	511.323	-361.119	174.016
	幂函数 power	0.916	543.890	0.021	3.268
	生长 growth	0.894	422.018	0.754	0.290
	指数 exponential	0.894	422.018	2.126	0.290
	逻辑斯蒂 logistic	0.894	422.018	0.470	0.748
X_4-Y	线性 linear	0.914	531.695	-94.579	24.763
	对数 logarithmic	0.902	461.178	-216.098	151.390
	幂函数 power	0.881	369.897	0.34	2.802
	生长 growth	0.862	313.367	1.22	0.451
	指数 exponential	0.862	313.367	3.388	0.451
	逻辑斯蒂 logistic	0.862	313.367	0.295	0.637
$X_{11}-Y$	线性 linear	0.779	176.187	-100.602	33.184
	对数 logarithmic	0.774	171.368	-189.341	158.723
	幂函数 power	0.773	170.299	0.530	2.971
	生长 growth	0.752	151.849	1.076	0.611
	指数 exponential	0.752	151.849	2.933	0.611
	逻辑斯蒂 logistic	0.752	151.849	0.341	0.543

注: X_{18} 为腹鳍基部到背鳍终点的直线距离, X_4 为体宽, X_{11} 为背鳍起点到臀鳍起点的直线距离, Y 为体重。
Note: X_{18} is the distance from the base of pelvic fin to the end of dorsal fin; X_4 is body width; X_{11} is the distance from the origin of dorsal fin to the origin of anal fin; Y is body weight.

表 8 14 月龄牙鲆形态性状与体重 6 种模型拟合结果
Tab. 8 Models curve estimation results of *Paralichthys olivaceus* at 14 months

回归 regression	模型 model	模型汇总 model summary		参数估计 parameter estimate	
		拟合优度 R^2	F -统计量 F -stat	常数 constant	系数 b_1
$X_{18}-Y$	线性 linear	0.956	627.213	-489.570	41.541
	对数 logarithmic	0.941	462.969	-1839.876	727.300
	幂函数 power	0.961	715.501	0.036	3.063
	生长 growth	0.955	620.398	2.386	0.173
	指数 exponential	0.955	620.398	10.874	0.173
	逻辑斯蒂 logistic	0.955	620.398	0.092	0.841
$X_{14}-Y$	线性 linear	0.761	92.331	-348.998	28.996
	对数 logarithmic	0.778	101.643	-1581.088	606.003
	幂函数 power	0.816	128.880	0.095	2.587
	生长 growth	0.783	104.717	2.935	0.123
	指数 exponential	0.783	104.717	18.813	0.123
	逻辑斯蒂 logistic	0.783	104.717	0.053	0.885
X_9-Y	线性 linear	0.364	16.609	-71.829	137.745
	对数 logarithmic	0.408	20.011	-35.609	340.285
	幂函数 power	0.510	30.161	62.249	1.584
	生长 growth	0.449	23.669	3.972	0.638
	指数 exponential	0.449	23.669	53.071	0.638
	逻辑斯蒂 logistic	0.449	23.669	0.019	0.529

注: X_{18} 为腹鳍基部到背鳍终点的直线距离, X_{14} 为背鳍终点到臀鳍终点的直线距离, X_9 为尾柄长, Y 为体重。
Note: X_{18} is the distance from the base of pelvic fin to the end of dorsal fin; X_{14} is the distance from the end of dorsal fin to the end of anal fin; X_9 is caudal peduncle length; Y is body weight.

关分析方法, 并做出统计学判断^[24]。刘贤德等^[25]对大黄鱼 13 月龄和 20 月龄的全长、体宽和体高与体重的相关性进行分析, 结果显示, 3 个性状与体重的相关系数在 0.800~0.977, 表明 3 个形态性状对体重的直接影响各不相同。在本次研究中, 8 月龄牙鲆各形态性状与体重的相关系数由高到低依次为 X_{18} 、 X_4 、 X_{20} 、 X_2 、 X_{16} 、 X_1 、 X_{13} 、 X_{15} , 14 月龄牙鲆各形态性状与体重的相关系数依次为 X_{18} 、 X_{20} 、 X_{16} 、 X_2 、 X_1 、 X_{15} 、 X_{14} 、 X_{17} (仅列出相关系数大于 0.90 的性状)。由此可见, 不同性状与体重的相关性也存在很大差异。并且, 在不同的生长阶段, 相同形态性状与体重的相关性也是不同的。因此, 分别研究幼鱼期和成鱼期各形态性状对体重的作用是十分必要的。本实验中, 在 8 月龄 X_1 、 X_2 、 X_{15} 、 X_{16} 、 X_{18} 、 X_{20} 与体重的相关系数在两个阶段中均较高, 说明这 6 个形态性状在幼鱼期与成鱼期均与体重高度相关, 通过这些形态性状对体重进行间接选择将获得较好的效果。

在两个生长阶段中, X_{18} 性状与牙鲆体重的相关系数均为最高(0.961 和 0.978), 说明 X_{18} 与体重保持着最高水平的相关性。这一结果与牙鲆的生物学特性相吻合, 因为牙鲆身体是扁平的, 鱼体的大小同时受到体长和体宽的共同影响, X_{18} 性状为腹鳍基部到背鳍终点的直线距离, 描述了牙鲆身体对角线的长度, 在一定程度上结合了体长和体宽两个性状。

3.3 多元回归分析

由于相关分析只能得到形态性状与体重之间的简单相关关系, 因此, 如果要探明各个形态性状对体重的作用和具体作用途径, 以及多性状之间的相互作用, 需采用通径分析的方法。何小燕等^[26]分析大口黑鲈(*Micropterus scolmoides*)形态性状对体重的影响, 发现体宽、体长和眼间距对体重的通径系数达到了极显著水平($P<0.01$), 其中体宽对体重的通径系数高达 0.599。本次研究中, 8 月龄和 14 月龄阶段, 分别有 3 个形态性状对体

重的直接通径系数达到显著水平, 两个生长阶段都是 X_{18} 对体重的通径系数最高, 分别为 0.439(8 月龄)和 0.752(14 月龄)。而且, 在两个生长阶段形态性状都是通过 X_{18} 对体重的间接作用最大。所以, X_{18} 是一个相当重要的形态性状, 在选种过程中可以对 X_{18} 进行选择, 从而实现对体重的间接选择。

在多元线性回归分析中, 相关指数表示利用回归方程进行预测的可靠程度, 只有相关指数大于或者等于 0.85 时, 才能表明影响因变量的主要自变量已经确定^[27]。詹炜等^[28]利用牙鲆全长、体长、头长、吻长、体高、尾柄高为自变量, 体重为因变量构建回归方程所得的相关指数为 0.949。刘峰等^[29]对半滑舌鲷全长、体高和体厚与体重的关系进行分析, 分别构建雌性和雄性样本的回归方程, 相关指数分别为 0.924 和 0.946。本研究的回归分析结果显示, 8 月龄的多元回归方程的相关指数为 0.965, 14 月龄的多元回归方程的相关指数为 0.984, 说明回归方程中所包含的自变量是影响体重的重要性状, 方程可以很好的预测体重。本研究所得相关指数都远远高于上述报道结果, 说明构建的多元回归方程优于上述报道结果, 能够更好的预测体重。

3.4 模型拟合

拟合优度越大, 自变量对因变量的解释程度越高, 自变量引起的变动占总变动的百分比越高。王凯等^[30]分析了 8 月龄牙鲆体重与 7 个形态性状之间的关系, 建立了形态性状与体重之间的多元线性关系, 进入多元回归方程的形态性状为体长、体高、尾柄高。本次研究中将 F 检验结果不显著的性状剔除, 在 8 月龄阶段, 对体重起主要作用的有 3 个形态性状(X_{18} 、 X_{11} 和 X_4), 这 3 个性状分别与体重的最优拟合模型都是线性模型; 在 14 月龄阶段, 对体重起主要作用的也有 3 个形态性状(X_{18} 、 X_{14} 和 X_9)。但是, 它们各自与体重的最优拟合模型为幂函数模型, 这一结果与刘峰等^[29]对 12 月龄半滑舌鲷的分析结果相同。本研究中, 幼鱼期和成鱼期形态性状与体重的最优拟合模型不同, 说明幼鱼期和成鱼期牙鲆的生

长模式不同, 适用的模型也不同, 分别对两个时期的牙鲆性状进行分析, 找到最优模型, 有利于不同时期选择育种工作的进行。另外, 在 8 月龄阶段的 X_{11} 、14 月龄阶段的 X_{14} 和 X_9 的 6 种拟合模型的拟合度均未超过 0.85, 表明这 3 个性状单独作为自变量不能很好地解释体重的变化。

参考文献:

- [1] Tian Y S, Xu T J, Chen S L, et al. Parent effects and estimation of genetic parameters for three Japanese flounder breeding populations[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(6): 119–128.[田永胜, 徐田军, 陈松林, 等. 三个牙鲆育种群体亲本效应及遗传参数估计[J]. 海洋学报, 2009, 31(6): 119–128.]
- [2] Xu T J, Chen S L, Tian Y S, et al. Comparative analysis of disease resistance among Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) families[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(1): 59–68.[徐田军, 陈松林, 田永胜, 等. 牙鲆抗鳃弧菌病家系筛选及其分析[J]. 中国水产科学, 2010, 17(1): 59–68.]
- [3] Shimada Y, Murakami N, Tsuzaki T, et al. Changes in growth, higher salinity tolerance and behavioral traits in Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* after repeated cross-breeding[J]. Fish Sci, 2007, 73(2): 364–370.
- [4] Park I S, Woo S R, Song Y C, et al. Effects of starvation on morphometric characteristics of olive flounder, *Paralichthys olivaceus*[J]. Ichthyol Res, 2007, 54(3): 297–302.
- [5] Liu Y G, Chen S L, Li J, et al. Genetic diversity in three Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) populations revealed by ISSR markers[J]. Aquaculture, 2006, 255(1): 565–572.
- [6] Tian Y, Xu T, Liang Y, et al. Estimates of genetic and phenotypic parameters for weight and length in *Paralichthys olivaceus* (Temminck et Schlegel)[J]. Acta Oceanol Sin, 2011, 30(6): 58–64.
- [7] Du M, Chen S L, Liang Y, et al. Polymorphism and balancing selection of MHC class II DAB gene in 7 selective flounder (*Paralichthys olivaceus*) families[J]. Evid-Based Complemen Altern Med, 2011, 2011: 613–629.
- [8] Tian Y S, Chen S L, Xu T J, et al. The comparison of growth performances of Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) families and selection of parents with good trait[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(6): 901–911.[田永胜, 陈松林, 徐田军, 等. 牙鲆不同家系生长性能比较及优良亲本选择[J]. 水产学报, 2009, 33(6): 901–911.]
- [9] Chen S L, Tian Y S, Xu T J, et al. Development and charac-

- terization for growth rate and disease resistance of disease-resistance population and family in Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(5): 665–673.[陈松林, 田永胜, 徐田军, 等. 牙鲆抗病群体和家系的建立及其生长和抗病性能初步测定[J]. 水产学报, 2008, 32(5): 665–673.]
- [10] Yuan M Y, Liu S F, Han Z Z, et al. Mathematical analysis of morphometric attribute effects on body weight for three-month-old *Acipenser schrenckii* Brandt[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(3): 507–513.[袁美云, 刘双凤, 韩志忠, 等. 3月龄施氏鲟形态性状对体质量的影响分析[J]. 中国水产科学, 2010, 17(3): 507–513.]
- [11] Dong Z J, Liang Z Y, Xu P, et al. Correlation between fillet yield and body measurements in Nile tilapia *Oreochromis niloticus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(2): 212–217.[董在杰, 梁政远, 徐跑, 等. 尼罗罗非鱼出肉率与可量性状的相关性[J]. 中国水产科学, 2010, 17(2): 212–217.]
- [12] Wang X A, Ma A J, Zhuang Z M, et al. Effects of morphometric attributes on body weight of *Takifugu rubripes* (Temminck et Schlegel)[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(1): 135–140.[王新安, 马爱军, 庄志猛, 等. 红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)形态性状对体重的影响效果[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(1): 135–140.]
- [13] You W W, Ke C H, Luo X, et al. Genetic correlations to morphological traits of small abalone *Haliotis diversicolor*[J]. J Shellfish Res, 2010, 29(3): 683–686.
- [14] Yang Y H, Huang G H, Yang C L, et al. Comparison of reproductive parameters in pacific white leg shrimp families[J]. Fisheries Science, 2014, 33(9): 574–577.[杨彦豪, 黄光华, 杨春玲, 等. 凡纳滨对虾不同家系间繁殖参数的比较[J]. 水产科学, 2014, 33(9): 574–577.]
- [15] Zhang C S, Li F H, Xiang J H. Path analysis of effects of morphometric attributes on body weight of *Exopalaemon carinicauda*[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(6): 809–815.[张成松, 李富花, 相建海. 脊尾白虾形态性状对体质量影响的通径分析[J]. 水产学报, 2013, 37(6): 809–815.]
- [16] Wang Z Z, Wu Y T, Yang L, et al. Effect of phenotypic and morphometric traits on body weight of *macrobrachium nipponensis*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(4): 612–618.[王志铮, 吴一挺, 杨磊, 等. 日本沼虾(*Macrobrachium nipponensis*)形态性状对体重的影响效应[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(4): 612–618.]
- [17] Wang C L, Wu D H, Cui Z X, et al. The effects of morphometric traits on body weight in F₂ population of swimming crab *Portunus trituberculatus*[J]. Marine Sciences, 2013, 37(7): 100–108.[王春琳, 吴丹华, 崔朝霞, 等. 三疣梭子蟹选育群 F₂S 表型性状对体质量影响的效果分析[J]. 海洋科学, 2013, 37(7): 100–108.]
- [18] Ping H L, Li Y Q. Path analysis between morphometric traits and body weight on *Helice tientsinensis* by multiple regression[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(5): 1353–1357.[平洪领, 李玉全. 逐步线性回归法实现天津厚蟹 (*Helice tientsinensis*)表型性状与体重的通径分析[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(5): 1353–1357.]
- [19] Li Z M, Liu Z G, Wang H, et al. Effects of main economic traits on body weight of *Pteria penguin*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(6): 798–803.[栗志民, 刘志刚, 王辉, 等. 企鹅珍珠贝 (*Pteria penguin*) 主要经济性状对体重的影响效果分析[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(6): 798–803.]
- [20] Zhang W J, Chang Y Q, Ding J, et al. Correlation and regression and regression of shell size and weight of *Dosinia japonica* reeve[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(3): 796–800.[张伟杰, 常亚青, 丁君, 等. 日本镜蛤 (*Dosinia japonica* Reeve) 壳尺寸与重量性状的相关与回归分析[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(3): 796–800.]
- [21] Zhang G F, Zhang W F, Fang A P, et al. Correlation and path analysis of quantitative traits of different-age *Lamprotula leai* in artificial breeding[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(5): 1115–1121.[张根芳, 张文府, 方爱萍, 等. 养殖条件下不同年龄背瘤丽蚌 (*Lamprotula leai*)数量性状的相关与通径分析[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(5): 1115–1121.]
- [22] Yan F S, Wang Z G, Liu X D, et al. Path analysis of the effects of morphometric traits on body weight for 3-month aged *Paralichthys olivaceus*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2010, 31 (2): 45–50.[严福升, 王志刚, 刘旭东, 等. 3月龄牙鲆形态性状对体质量的通径分析[J]. 渔业科学进展, 2010, 31 (2): 45–50.]
- [23] Wang X A, Ma A J, Xu K, et al. Relationship between morphometric attributes and body weight of juvenile turbot *Scophthalmus maximus*[J]. Acta Zoologica Sinica, 2008, 54(3): 540–545.[王新安, 马爱军, 许可, 等. 大菱鲆幼鱼表型形态性状与体重之间的关系[J]. 动物学报, 2008, 54(3): 540–545.]
- [24] Li Z H, Luo P. The Tutorial of Statistical Analysis of SPSS for Windows[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 213–216.[李志辉, 罗平. SPSS for Windows 统计分析教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 213–216.]
- [25] Liu X D, Cai M Y, Wang Z Y, et al. Correlation analysis of morphometric traits and body weight of large yellow croaker

- Pseudosciaena crocea* at different growth stage[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2011, 29(5): 159–163.[刘贤德, 蔡明夷, 王志勇, 等. 不同生长时期大黄鱼形态性状与体重的相关性分析[J]. 热带海洋学报, 2011, 29(5): 159–163.]
- [26] He X Y, Liu X L, Bai J J, et al. Mathematical analysis of effects of morphometric attribute on body weight of large-mouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(4): 597–603.[何小燕, 刘小林, 白俊杰, 等. 大口黑鲈形态性状对体重的影响效果分析[J]. 水产学报, 2009, 33(4): 597–603.]
- [27] Liu X L, Wu C G, Zhang Z H, et al. Mathematical analysis of effects of morphometric attributes on body weight for *Penaeus vannamei*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 857–862.[刘小林, 吴长功, 张志怀, 等. 凡纳对虾形态性状对体重的影响效果分析[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 857–862.]
- [28] Zhan W, Lou B, Mao G M, et al. Correlation and path analysis of growth traits of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J]. Journal of Quanzhou Normal University (Natural Science), 2010, 28(6): 29–32.[詹炜, 楼宝, 毛国民, 等. 褐牙鲆生长性状的相关与通径分析[J]. 泉州师范学院学报, 2010, 28(6): 29–32.]
- [29] Liu F, Chen S L, Liu X F, et al. Correlation and path coefficient analysis for body mass and morphometric traits in the half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*)[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(4): 94–102.[刘峰, 陈松林, 刘肖峰, 等. 半滑舌鳎 3 个形态性状与体质量的相关及通径分析[J]. 海洋学报, 2015, 37 (4): 94–102.]
- [30] Wang K, Liu H J, Liu Y X, et al. Mathematical analysis of effects of morphometric attributions on body weight for *Paralichthys Olivaceus*[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2009, 17(6): 655–660.[王凯, 刘海金, 刘永新, 等. 牙鲆形态性状对体重的影响效果分析[J]. 上海水产大学学报, 2009, 17(6): 655–660.]

Path analysis and curve estimates of morphometric traits and body weight of *Paralichthys olivaceus* at different growth stages

CHEN Honglin^{1,2}, TIAN Yongsheng¹, LIU Feng^{1,2}, LI Hong^{1,2}, LI Xiangkong^{1,3}, SONG Lini^{1,2}, CHEN Songlin¹

1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture; Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, National Lab for Ocean Science and Technology; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

Abstract: *Paralichthys olivaceus* is one of the most important aquaculture species in China. However, intensive breeding and many generations of inbreeding have resulted in poor disease resistance and slow growth. Therefore, it is necessary to improve the quality and productivity of *P. olivaceus* through selective breeding. To study the relationship between morphometric traits and body weight of *P. olivaceus* at different growth stages, 83 fish were selected randomly (8 months old, $n = 52$ and 14 months old, $n = 31$) to measure 22 morphometric traits and body weights. The data were statistically processed using correlation, path, and stepwise regression analyses, and multivariate regression equations were calculated. The traits were included in the equation as independent variables, and body weight was the dependent variable in six curve-fitting models to select the optimal model. The results showed that: (1) the correlation coefficients between body weight and each trait varied and differed at the two developmental stages. (2) The path coefficients of X_{18} , X_4 , and X_{11} for 8-month body weight were highly significant ($P < 0.01$). The path coefficients of X_{18} , X_{14} , and X_9 for 14-month body weight were also significant ($P < 0.05$). The multivariate regression equation was $Y = -119.541 + 7.191 X_{18} + 10.135 X_4 + 7.197 X_{11}$ for 8 months, and $Y = -484.931 + 31.959 X_{18} + 81.928 X_{14} - 17.889 X_9$ for 14 months. This result suggests that the vital morphometric traits that affected body weight at the two growth stages were different. (3) All optimal models at 8 months were linear, including $Y = -117.866 + 15.724 X_{18}$, $Y = -94.579 + 24.763 X_4$, and $Y = -100.602 + 33.184 X_{11}$. However, all optimal models at 14 months were power models, including $Y = 0.036 X_{18}^{3.063}$, $Y = 0.095 X_{14}^{2.507}$, and $Y = 62.249 X_9^{1.584}$. These results indicate that the growth rhythms between the two growth stages were different. The R^2 values for the multivariate regression equations at 8 and 14 months were 0.965 and 0.984, respectively, indicating that the equations can be used to predict *P. olivaceus* body weight. The R^2 values for the X_{11} linear model at 8 months and the X_9 and X_{14} power models at 14 months were all < 0.85 , indicating that X_{11} , X_9 , and X_{14} did not explain body weight as a single independent variable. The X_{18} path coefficient appeared in the multivariate regression equations at both growth stages, indicating that X_{18} is a predominant morphometric trait affecting body weight and can be regarded as an assisted selection trait for body weight. These results provide a theoretical basis for selective breeding of *P. olivaceus* at different developmental stages.

Key words: *Paralichthys olivaceus*; correlation analysis; path analysis; regression equation; model fitting

Corresponding author: TIAN Yongsheng. E-mail: tianys@ysfri.ac.cn