

DOI: 10.12264/JFSC2021-0133

叶尔羌高原鳅形态性状与体重的通径分析及曲线拟合

李艳慧^{1,3}, 陈生熬^{2,3}, 程勇^{1,3}

1. 塔里木大学生命科学学院, 新疆 阿拉尔 843300;
2. 塔里木大学动物科学学院, 新疆 阿拉尔 843300;
3. 塔里木大学塔里木珍稀鱼类研究中心, 新疆 阿拉尔 843300

摘要: 本研究基于叶尔羌高原鳅(*Triplophysa yarkandensis*)体重(Y)及形态变量($X_1 \sim X_9$) 10 个性状, 运用相关性分析、回归分析、通径分析等开展各形态性状与体重间的相关性及各形态性状间的相关性研究, 量化计算各形态性状对体重的影响, 确定影响其体重的主要形态性状, 进一步确定了 3 个主要形态性状与体重的最佳拟合模型。研究发现, 叶尔羌高原鳅各形态性状与体重之间呈极显著正相关($P < 0.01$), 与体重(Y)相关性最大的是体长(X_2), 相关系数为 0.960; 尾柄长(X_5)、眼径(X_7)与眼间距(X_8)之间无显著相关性($P > 0.05$), 其他形态性状之间均呈显著正相关($P < 0.05$)。通径分析量化形态性状对体重(Y)的作用, 直接影响最大的是头长(X_4)(0.470), 体长(X_2)通过头长(X_4)对体重的间接作用最大(0.447); 通过回归分析并计算决定系数发现, 头长(X_4)对体重的直接决定系数最大(0.221), 体长(X_2)和头长(X_4)的共同决定系数最大(0.341)。3 个形态性状与体重的多元回归方程为 $Y = -2.8 + 2.94X_2 + 0.764X_4 + 0.906X_5$ ($R^2 = 0.958$)。3 个主要形态性状与体重的最佳拟合模型: 体长(X_2)与体重(Y)的最佳拟合模型为指数函数方程 $Y = 2.739e^{0.158X_2}$ ($R^2 = 0.936$); 头长(X_4)与体重的最佳拟合模型为幂函数方程 $Y = 4.946X_4^{1.100}$ ($R^2 = 0.931$); 尾柄长(X_5)与体重的最佳拟合模型为对数函数方程 $Y = 9.582 + 8.876\ln X_5$ ($R^2 = 0.807$)。研究结果表明, 叶尔羌高原鳅在选育时, 应以体长(X_2)和头长(X_4)为主要选择性状, 同时辅以尾柄长(X_5)。

关键词: 叶尔羌高原鳅; 形态性状; 体重; 通径分析; 曲线拟合

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)01-0049-09

叶尔羌高原鳅[*Triplophysa yarkandensis* (Day, 1877)]为中国特有种, 属鲤形目(Cypriniformes), 鳅科(Cobitidae), 条鳅亚科(Nemacheilinae), 高原鳅属, 主要分布于塔里木河水系, 是塔里木河最具代表性的土著鱼之一^[1]。目前叶尔羌高原鳅研究多集中于遗传多样性、基础生物学、形态学、生理学等方面^[2-9], 而对叶尔羌高原鳅形态性状与体重之间的多元分析报道较少^[3,10]。近年来, 随着人类活动加剧, 叶尔羌高原鳅野生群体小型化趋势加剧, 数量锐减, 2019 年已被列为新疆 II 级

保护水生野生动物^[11-12]。开展叶尔羌高原鳅形态性状和体重关系的研究, 明确各性状之间的相互关系, 通过形态性状对体重进行间接选择, 对叶尔羌高原鳅高效养殖和选择育种具有重要意义。

评价鱼类生长状况, 形态性状与体重是重要指标, 国内外学者对此进行了诸多研究。杨贵强^[13]研究发现不同月龄哲罗鲑(*Hucho taimen*)对体重产生影响的形态指标不同; 李哲等^[14]研究长吻鲃(*Leiocassis longirostris*)形态性状对体质量的影响, 结果显示 11 个形态性状与体重之间的相关性达

收稿日期: 2021-04-08; 修订日期: 2021-06-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31360635); 华中农业大学-塔里木大学联合基金项目(HNLH202006); 新疆生产建设兵团塔里木盆地生物资源保护利用重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地开放基金课题项目(BRYB1801); 塔里木大学校长基金项目(TDZKQN201801).

作者简介: 李艳慧(1988-), 女, 讲师, 研究方向为渔业资源保护与利用. E-mail: 15569353668@163.com

通信作者: 陈生熬, 教授, 研究方向为渔业资源与环境. E-mail: chenshengao@163.com

到了极显著水平。通径分析和相关性分析方法能够反映出各性状对目标性状影响的程度,对动物育种工作具有重要指导意义,在鱼类形态学研究中运用广泛。张新明等^[15]研究星康吉鳗(*Conger myriaster*)形态性状与体重关系,结果表明星康吉鳗的体重主要受肛长、眼径、眼后头长和头宽这 4 个性状的影响;陈红林等^[16]运用了通径分析和回归分析研究了不同时期牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)形态性状与体重的关系;袁美云等^[17]研究发现施氏鲟(*Acipenser schrencki*)在选育过程中体重受体长、体宽、体高 3 个形态性状的影响,董义超等^[18]发现 5 月龄花鲈(*Lateolabrax japonicus*)体重受体高影响最大,全长、眼径、体宽对体重也有较大影响。

本研究以野生叶尔羌高原鳅群体为研究对象,采用传统的形态测量方法获得包括体重在内的 10 个性状数据,运用通径分析和相关性分析,获得影响体重的主要形态性状,建立回归方程,筛选最优拟合模型,为叶尔羌高原鳅的选育工作提供参考。

1 材料方法

1.1 样品采集

2020 年 7 月于新疆车尔臣河且末段(84°25'E, 37°30'W),采用地笼与刺网(网目 2a=2.0 cm)相结合的方法采集野生叶尔羌高原鳅样本,从中随机挑选 97 尾用于本研究,所用样品均在新鲜活体状态下运回实验室进一步测量所需实验数据。

1.2 实验方法

参考张新明等^[15]、陈红林等^[16]、袁美云等^[17]和董义超等^[18]的测量方法,与冷水中(5℃)进行休克处理,并迅速擦干鱼体表面水分,用游标卡尺测量全长(X_1)、体长(X_2)、体高(X_3)、头长(X_4)、尾柄长(X_5)、吻长(X_6)、眼径(X_7)、眼间距(X_8)和口裂宽(X_9) 9 组形态数据,所测量形态数据均精确到 0.1 mm,以电子天平测量体重(Y),精确到 0.01 g。

1.3 分析方法

应用 Excel 对所收集的叶尔羌高原鳅的形态数据进行初步描述统计,并进行平均数、标准差、变异系数的计算。结果以平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)

表示。

应用 SPSS 21.0 对所搜集到的形态数据进行相关性分析、通径分析、回归分析,为了消除加权对结果的影响,对所有原始数据经对数转换后再进行统计分析。

运用 Pearson 相关性分析对各性状之间的相关性进行分析;以体重为因变量,各形态数据为自变量进行逐步线性回归分析,计算主要形态性状对体重增长的通径系数、决定系数并拟合主要形态性状与体重的最佳方程。

2 结果与分析

2.1 叶尔羌高原鳅形态性状分布特征

叶尔羌高原鳅形态性状统计值见表 1。从表中可以看出平均体重为(13.43±6.59) g,从形态性状数据来看,全长(X_1)最大为(12.13±2.20) cm,其次依次为体长(X_2)、尾柄长(X_5)、头长(X_4),眼径(X_7)最小,为(0.30±0.11) cm。

从变异系数可看出体重(Y)最大,为 49%,说明对叶尔羌高原鳅来说选择潜力最大的性状是体重(Y),其次是尾柄长(X_5),眼间距(X_8)的选择潜力最小。

表 1 叶尔羌高原鳅各性状的描述统计结果
Tab. 1 Descriptive statistics of the traits of *Triplophysa yarkandensis*

参数 parameter	平均数/cm mean	标准差 SD	变异系数/% CV
体重 body weight, Y	13.43	6.59	0.49
全长 total length, X_1	12.13	2.2	0.18
体长 body length, X_2	9.67	1.79	0.19
体高 body height, X_3	1.83	0.37	0.2
头长 head length, X_4	2.42	0.57	0.24
尾柄长 tail stalk length, X_5	1.6	0.63	0.39
吻长 snout length, X_6	0.97	0.31	0.32
眼径 eye length, X_7	0.3	0.11	0.36
眼间距 interorbital space, X_8	1.06	0.16	0.15
口裂宽 slit width, X_9	0.89	0.22	0.24

2.2 叶尔羌高原鳅各性状相关性分析

相关性分析结果如表 2 所示,叶尔羌高原鳅

表 2 叶尔羌高原鳅各性状间的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients among the traits of *Triplophysa yarkandensis*

性状 trait	体重 Y	全长 X_1	体长 X_2	体高 X_3	头长 X_4	尾柄长 X_5	吻长 X_6	眼径 X_7	眼间距 X_8	口裂宽 X_9
体重 Y	1	0.937**	0.960**	0.498**	0.964**	0.861**	0.714**	0.621**	0.374**	0.670**
全长 X_1		1	0.976**	0.522**	0.934**	0.830**	0.726**	0.664**	0.406**	0.712**
体长 X_2			1	0.520**	0.950**	0.824**	0.736**	0.627**	0.386**	0.718**
体高 X_3				1	0.510**	0.353**	0.239*	0.388**	0.331**	0.381**
头长 X_4					1	0.821**	0.683**	0.651**	0.373**	0.678**
尾柄长 X_5						1	0.578**	0.649**	0.136	0.469**
吻长 X_6							1	0.448**	0.232*	0.572**
眼径 X_7								1	0.060	0.317**
眼间距 X_8									1	0.405**
口裂宽 X_9										1

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

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

形态性状均与体重(Y)之间呈极显著正相关($P<0.01$), 其中头长(X_4)与体重(Y)的相关系数(0.964)最大, 体长(X_2)与体重(Y)的相关系数(0.960)次之, 眼间距(X_8)与体重(Y)的相关系数(0.374)最小; 从各形态性状的相互关系来看, 尾柄长(X_5)、眼径(X_7)与眼间距(X_8)之间相关性不显著($P>0.05$), 其他形态性状之间均有显著正相关($P<0.05$), 其中全长(X_1)和体长(X_2)相关系数最大(0.976), 吻长(X_6)和眼间距(X_8)之间相关系数最小(0.232)。

2.3 叶尔羌高原鳅形态性状对体重的通径分析

对叶尔羌高原鳅体重(Y)进行正态性检验, 结果见表 3, 选择 Kolmogorov-Smirnov Test 检验方法进行正态性检验, 经检验体重(Y)服从正态分布($P>0.05$), 可进行正常回归分析。

表 3 叶尔羌高原鳅体重正态检验结果

Tab. 3 Normal test result of body weight of *Triplophysa yarkandensis*

性状 trait	Kolmogorov-Smirnov 检验 Kolmogorov-Smirnov test			Shapiro-Wilk 检验 Shapiro-Wilk test		
	统计值 statistic value	df	P	统计值 statistic value	df	P
体重 body weight	0.078	97	0.166	0.975	97	0.063

由表 4 可知, 影响叶尔羌高原鳅体重(Y)变化的主要形态性状为体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5), 经检验体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5)与体重(Y)均呈极显著正相关($P<0.01$)。3 个形态性状影响体

表 4 叶尔羌高原鳅形态性状对体重通径分析结果

Tab. 4 The result of path analysis of morphological traits on body weight of *Triplophysa yarkandensis*

性状 trait	相关系数 correlation coefficient	直接作用 direct effect	间接作用 indirect effect		
			体长 X_2	头长 X_4	尾柄长 X_5
体长 X_2	0.960**	0.382**		0.447	0.132
头长 X_4	0.964**	0.470**	0.363		0.132
尾柄长 X_5	0.861**	0.160**	0.315	0.386	

注: **表示极显著相关($P<0.01$).

Note: ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

重(Y)变化的直接作用均小于间接作用。从 3 个形态性状对体重(Y)影响的直接作用来看, 头长(X_4)的直接作用最大(通径系数 0.470), 尾柄长(X_5)最小(通径系数 0.160)。从 3 个形态性状对体重(Y)影响的间接作用来看, 体长(X_2)的间接作用总和最大(0.578), 头长(X_4)的间接作用总和最小(0.494)。在 3 个形态性状两两相互作用中, 体长(X_2)通过头长(X_4)对体重的间接影响最大(0.447), 体长(X_2)、头长(X_4)通过尾柄长(X_5)对体重的间接影响最小(0.132)。

2.4 叶尔羌高原鳅形态性状对体重的决定系数

如表 5 所示, 决定系数总和为 0.958, 表明影响叶尔羌高原鳅体重的主要形态性状为体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5), 其他形态性状对其影响较小。从 3 个形态性状对体重的直接决定系数来看, 头长(X_4)最大(直接决定系数为 0.221), 体长次之

表 5 叶尔羌高原鳅形态性状对体重的决定系数
Tab. 5 The determination coefficients of morphological traits on body weight of *Triplophysa yarkandensis*

性状 trait	体长 X_2	头长 X_4	尾柄长 X_5	Σ
体长 X_2	0.146	0.341	0.101	0.588
头长 X_4		0.221	0.123	0.344
尾柄长 X_5			0.026	0.026
Σ	0.146	0.562	0.250	0.958

(直接决定系数为 0.146), 尾柄长(X_5)最小(直接决定系数 0.026)。从 3 个形态性状相互作用对体重的决定系数来看, 体长(X_2)和头长(X_4)的共同决定作用最大(决定系数为 0.341), 头长(X_4)和尾柄长(X_5)的共同决定作用次之(决定系数为 0.123), 体长(X_2)和尾柄长(X_5)的共同决定作用最小(决定系数为 0.101), 由此可见, 决定叶尔羌高原鳅体重变化的主要形态性状为体长(X_2)和头长(X_4)。

2.5 构建多元回归方程

运用逐步线性回归的方法, 以体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5) 3 个形态性状为自变量, 体重(Y)为因变量建立多元回归方程。

$$Y = -2.8 + 2.94X_4 + 0.764X_2 + 0.906X_5$$

式中, Y 代表体重, X_2 、 X_4 、 X_5 分别代表体长、头长、尾柄长。

如表 6 所示, 由相关系数可见, 随着 3 个自变量逐渐引入, 回归方程相关系数由 0.964 逐渐增大到 0.979, 说明随着自变量引入增多, 对体重作用持续增加, 3 个形态性状对叶尔羌高原鳅体重选择具有较好的参考价值。根据回归方程的相关系数可以计算出剩余因子 e , $e = \sqrt{1 - R^2} = 0.204$,

表 6 叶尔羌高原鳅形态性状模型摘要
Tab. 6 Summary of regression models between morphological traits and body weight of *Triplophysa yarkandensis*

模型 model	R	R^2	调整后 R^2 adjusted R^2	标准估算的误差 standard estimate error
1	0.964	0.93	0.929	0.95515
2	0.975	0.95	0.949	0.80976
3	0.979	0.958	0.957	0.74744

注: 1. 预测变量: 头长(X_4). 2. 预测变量: 头长(X_4), 体长(X_2). 3. 预测变量: 头长(X_4), 体长(X_2), 尾柄长(X_5).

Note: 1. Predictive variable: head length (X_4). 2. Predictive variable: head length (X_4), body length (X_2). 3. Predictive variable: head length (X_4), body length (X_2), tail stalk length (X_5).

该值较大, 说明除了体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5) 3 个形态性对叶尔羌高原鳅体重有较大影响作用以外, 还有其他对体重影响较大的因素未考虑到, 有待进一步研究。如表 7 所示, 体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5) 3 个变量的回归系数均达到了极显著水平($P < 0.01$)。从 3 个形态性状对体重的回归系数看, 对体重变化影响作用最大的是头长(X_4)(0.47), 尾柄长(X_5)的决定作用最小(0.16), 该结论与通径分析结果一致。

表 7 回归方程系数显著性检验
Tab. 7 The significance test of coefficients in regression equation

模型 model		非标准化回归系数 unstandardized coefficient		回归系数 standardized coefficient	t 统计量 t -stat	P
		B	标准误 SE	Beta		
1	(常量 constant)	-1.44	0.422		-3.409	0.001
	X_4	6.031	0.170	0.964	35.505	0.000
2	(常量 constant)	-3.696	0.511		-7.227	0.000
	X_4	3.328	0.461	0.532	7.226	0.000
	X_2	0.91	0.147	0.455	6.179	0.000
3	(常量 constant)	-2.8	0.519		-5.395	0.000
	X_4	2.94	0.435	0.470	6.756	0.000
	X_2	0.764	0.14	0.382	5.443	0.000
	X_5	0.906	0.218	0.16	4.163	0.000

2.6 拟合模型筛选结果

运用通径分析和回归分析挑选的 3 个形态性状为自变量, 拟合与因变量体重(Y)的最佳方程模型(表 8)。由 5 种方程拟合结果可以看出, 叶尔羌高原鳅体长(X_2)与体重(Y)的最佳拟合模型为指数函数, 模型方程为 $Y = 2.739e^{0.158X_2}$ ($R^2 = 0.936$)、头长(X_4)与体重的最佳拟合模型为幂函数, 模型方程为 $Y = 4.946X_4^{1.100}$ ($R^2 = 0.931$), 尾柄长(X_5)与体重的最佳拟合模型为对数函数, 模型方程为 $Y = 9.582 + 8.876\ln X_5$ ($R^2 = 0.807$)。

3 讨论

3.1 体重及形态性状的变异系数

在动物的表型特征对比中, 通常选择变异系

表 8 叶尔羌高原鳅 3 个形态性状与体重的模型拟合结果

Tab. 8 The result of curve model fitting of 3 morphological traits on body weight of *Triplophysa yarkandensis*

回归 regression	模型 model	模型汇总 sum of model			参数估计 parameter estimate	
		R^2	F	P	常数 constant	系数 B coefficient B
X_2 - Y	线性 linear	0.922	1130.483	0.000	-5.415	1.92
	对数 logarithmic	0.871	639.014	0.000	-23.949	16.490
	幂函数 power	0.923	1133.271	0.000	0.557	1.387
	s	0.872	646.332	0.000	3.743	-11.202
	指数 exponential	0.936	1394.170	0.000	2.739	0.158
X_4 - Y	线性 linear	0.930	1260.539	0.000	-1.440	6.031
	对数 logarithmic	0.893	791.653	0.000	1.912	13.181
	幂函数 power	0.931	1263.452	0.000	4.946	1.100
	s	0.878	685.095	0.000	3.490	-2.160
	指数 exponential	0.920	1091.463	0.000	3.858	0.490
X_5 - Y	线性 linear	0.741	271.502	0.000	5.344	4.878
	对数 logarithmic	0.807	398.152	0.000	9.582	8.876
	幂函数 power	0.750	284.933	0.000	9.536	0.699
	s	0.778	332.024	0.000	3.296	-1.068
	指数 exponential	0.654	179.528	0.000	6.936	0.375

数作为对比多个性状变异程度的统计量。通常认为水产动物选育过程中, 变异系数越大的性状, 其遗传选育潜力越大, 可为选育目标性状。研究选育黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)^[19]、花鲈^[18]、长吻鮠^[14]、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)^[20]、大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)^[21]、哲罗鲑^[13]等鱼类时, 发现鱼类选育潜力与体重变异系数成正比。本研究中, 叶尔羌高原鳅的 10 个性状中, 体重变异系数最大, 作为选育目标性状潜力最优, 且 97 尾叶尔羌高原鳅体重(Y)符合正态分布, 说明本研究所选用样本为随机样本, 该结果具有一定的实践指导意义。除了体重的变异系数为 49%, 尾柄长、吻长、眼径变异系数则分别达到了 39%、32%、36%, 相对较高, 也表现出较大的选育潜力, 说明叶尔羌高原鳅选育中以体重为目标性状时, 会受尾柄长、吻长、眼径等性状影响, 这也增大了叶尔羌高原鳅后期选育的困难。陈生熬等^[10]在研究叶尔羌高原鳅养殖群体不同年龄阶段形态性状对体重的影响时也得出相似结论。除此以外, 在对星康吉鳗^[15]、施氏鲟^[17]、牙鲆^[16]、小黄鱼(*Pseudosciaena polyactis*)^[22]等鱼类的研究中, 认为体重在作为水产经济动物选育的目标性状时, 选育效果易受客观因素干扰, 但可以通过选择形态性状间接达到

选育目的。

3.2 确定影响叶尔羌高原鳅体重变化的形态性状

在水产经济动物选育研究中, 体重通常是主要的选育目标之一, 但在实际生产中体重易受内在或外在因素干扰, 影响选育效果。学者在研究鱼类、虾类、蟹类、贝类^[23-26]等水产经济动物时一致认为动物的体重与某些形态性状之间存在较大的相关性, 可通过选择形态性状间接达到体重选育目的。从本研究相关性分析结果来看, 叶尔羌高原鳅各形态性状均与体重(Y)呈极显著正相关($P<0.01$), 说明叶尔羌高原鳅体重变化与形态性状之间有极大的联系, 相关性越大, 在遗传选育过程中, 利用形态性状直观、易测的优点间接达到体重选育目的的结果越可靠; 较强的相关性也造成了信息的重叠, 单从相关性分析结果很难确定对体重有较大影响的形态性状, 本研究各性状之间相关性结果也印证了该结论, 各性状相关性中, 除尾柄长(X_5)、眼径(X_7)变化与眼间距(X_8)没有显著相关之外, 其他各性状之间均存在显著相关性($P<0.05$), 说明各形态性状与体重之间存在多重共线关系, 很难从相关性分析中找出对体重影响较大的形态变量, 学者在研究不同年龄组^[10]及不同性别叶尔羌高原鳅^[3] 及野生群体形态性

状与体重的相关性中均得出相似的结论。学者们应用相关性分析对尼罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[23]、口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)^[24]、解放眉足蟹(*Blepharipoda liberate*)^[25]、翘嘴鲌(*Siniperca chuatsi*)^[26]等不同水生动物进行研究时也发现,形态性状与体重之间存在多重共线联系,需要进一步分析确定对体重影响较大的主要形态因素。

相关性分析仅能反映两两性状之间综合相关性,用相关系数去描述两性状之间的关系相对比较笼统。通径分析和回归分析可用于分析多个自变量与因变量之间的多重共线关系,可以处理较为复杂的变量关系,在水生经济动物如黄鳍金枪鱼^[19]、大口黑鲈^[21]、尖吻鲈(*Lates calcarifer*)^[27]、珍珠鳖(*Apalone ferox*)^[28]研究中均有应用。经过通径分析将复杂的相关系数分解为直接作用(通径系数)和间接作用,同时辅以决定系数大小、回归分析验证,从而确定影响体重变化的主要形态性状,达到提高选育效率的目的。在本研究中,虽然各形态性状与体重(Y)均有极显著正相关($P<0.01$),但通径分析结果显示仅体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5) 3 个形态性状与体重(Y)之间的通径系数达到了显著水平,其他 6 个形态性状在通径分析中均被剔除,通过通径分析的直接作用和间接作用结果可以看出,体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5) 3 个形态性状对体重(Y)的直接作用和间接作用总和均大于 0.85,说明影响叶尔羌高原鳅体重变化的形态性状已经确定,该结果与叶尔羌高原鳅外形相吻合,该鱼体细长,体长、头长、尾柄长均描述了叶尔羌高原鳅纵向特征。通过对比 3 个形态性状与体重(Y)通径作用发现,体长(X_2)和头长(X_4)对体重(Y)的间接作用略大于直接作用,尾柄长(X_5)对体重(Y)的间接作用(0.701)远远大于直接作用(0.160),说明对体长(X_2)和头长(X_4)是影响叶尔羌高原鳅体重变化的主要因素,而尾柄长(X_5)对体重的影响更多是与体长(X_2)和头长(X_4)共同作用,是影响体重变化的次要因素。

决定系数计算结果显示,体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5) 3 个形态性状对体重(Y)的决定系数总和为 0.958,表明体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5) 3 个形态性状对叶尔羌高原鳅体重变化有较大决

定作用,该结论与通径分析结果一致。

为了验证通径分析的结论,采用回归分析方法,将各形态变量引入回归方程,逐步确定多重变量与自变量之间的关系。结果显示,经过回归分析,去除了对体重变化影响较小的性状,保留了体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5) 3 个形态性状。由回归方程相关系数可以看出,随着 3 个自变量逐渐引入,回归方程的相关系数逐渐增大,说明随着自变量引入增多,对体重的作用在增加,选择的 3 个形态性状对叶尔羌高原鳅体重选择具有较好的参考价值,与通径分析结论一致,对叶尔羌高原鳅的选育具有一定的参考意义。根据回归方程的相关系数计算剩余因子 $e=0.204$,该值较大,说明除了挑选出的 3 个主要形态性状对叶尔羌高原鳅体重有较大影响作用以外,还有其他对体重影响较大的因素未考虑到,还需要进行更深入的研究。3 个形态性状对体重(Y)的决定系数总和为 0.958,可以解释 95.8%的变异,表明挑选的体长(X_2)、头长(X_4)、尾柄长(X_5) 3 个形态性状对叶尔羌高原鳅体重变化有较大影响,但仍有 4.2%的变异可能是由一些未测定性状或随机误差引起,需要进一步验证。陈生熬等^[10]在研究叶尔羌高原鳅养殖群体不同年龄组形态性状对体重影响时发现,1 年龄组体重主要受体长、体高、吻长和尾柄长 4 个形态性状影响,2 年龄组影响体重的变量主要是体长、体高;3 年龄组保留性状为全长、体长、体高和吻长^[26];宋勇等^[3]在研究叶尔羌高原鳅野生群体时发现,叶尔羌高原鳅雌性组对体重影响较大的形态性状为头长、尾长和体高,雄性组体重受叉长和眼间隔的影响较大^[4]。结合本研究结论,认为同一种鱼类不同年龄阶段、不同性别、不同生长环境等外部性状将对体重影响也有所不同。

3.3 拟合模型的筛选结果

根据自变量和因变量散点图实测点的分布趋势拟合曲线,选择符合动物规律、拟合度高的曲线方程来表达两个变量之间的关系,该方法可动态预测动物生长规律,对控制动物生长发育及提高育种结果的准确性均有一定的实践指导意义。渔业方面通常用简单易测的表型特征去预测体重增长规律,拟合形态性状与体重之间的曲线模型,

提高育种结果准确率^[15-16,20,24,28]。本研究分别拟合了 3 个主要形态性状与体重之间的曲线模型, 从结果可以看出 3 个形态性状与体重拟合曲线模型均差异极显著($P < 0.01$), 说明拟合模型有效, 可以用于指导实践(表 8)。如表 8 所示, 体长(X_2)与体重(Y)拟合的指数方程及头长(X_4)与体重(Y)拟合的线性方程, 其相关系数 R^2 在拟合的 5 种方程中最大, 且 R^2 均大于 0.85, 说明体长(X_2)和头长(X_4)单独作为自变量时可以较好地反映体重变化情况, 虽然尾柄长(X_5)与体重(Y)拟合的最优曲线模型为对数函数, 但 $R^2 = 0.807 < 0.85$, 说明尾柄长不是影响体重变化的主要形态因素, 作为唯一变量时不能很好地解释体重的变化情况, 再次验证了通径分析和回归分析结果, 选择体长和头长作为主要的选育目标同时辅以尾柄长, 以达到叶尔羌高原鳅体重增加的目的是可行的。

致谢: 感谢四川律贝生物科技有限公司在样品采集中提供的帮助。

参考文献:

- [1] Ma Y W, Guo Y, Zhang R M, et al. Fauna composition and distribution of aboriginal fish in the Tarim River of Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(6): 949-956. [马燕武, 郭焱, 张人铭, 等. 新疆塔里木河水系土著鱼类区系组成与分布[J]. 水产学报, 2009, 33(6): 949-956.]
- [2] Chen S G, Ya N, Xie C X, et al. Complete mitochondrial genome of the *Triplophysa (Hedinichthys) yarkandensis* (Day)[J]. Mitochondrial DNA Part B, 2016, 1(1): 235-236.
- [3] Song Y, Cheng Y, Luo L L, et al. Correlation analysis between morphometrics and body weight of *Triplophysa yarkandensis* of wild populations[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2018, 39(11): 25-29. [宋勇, 程勇, 罗磊磊, 等. 叶尔羌高原鳅野生群体形态性状与体重的相关分析[J]. 家畜生态学报, 2018, 39(11): 25-29.]
- [4] Nie Z L, Wu H, Wei J, et al. Length-weight relationship and morphological studies in the Kashgarian loach *Triplophysa yarkandensis* (Day, 1877) from the Tarim River, Tarim River Basin, North-West China[J]. Indian Journal of Fisheries, 2013, 60(1): 15-19.
- [5] Gong X L, Xu H B, Xiang W, et al. Complete mitochondrial genome of Kashgarian loach, *Triplophysa yarkandensis* (Day, 1877) in the Tarim River[J]. Mitochondrial DNA Part A, 2016, 27(5): 3192-3193.
- [6] Ning X, Zhang Y Z, Sui Z H, et al. The complete mitochondrial DNA sequence of Kashgarian loach (*Triplophysa yarkandensis*) from Bosten Lake[J]. Mitochondrial DNA Part B, 2020, 5(1): 821-823.
- [7] Chen S G, Hou J L, Yao N, et al. Comparative transcriptome analysis of *Triplophysa yarkandensis* in response to salinity and alkalinity stress[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics, 2020, 33: 100629.
- [8] Wang L, Wei J, Nie Z L, et al. Oxygen consumption and ammonia excretion of Kashgarian loach *Triplophysa yarkandensis* (Day, 1877) under different body weights[J]. International Journal of Innovative Studies in Aquatic Biology and Fisheries, 2016, 2(5): 5-9.
- [9] Chen S A, Xie C X, Li D P, et al. Length-weight relationships of five *Triplophysa* species from the northwest of China[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2017, 33(6): 1234-1236.
- [10] Chen S A, Yao N, Song Y, et al. Effects of morphological traits on body mass of *Triplophysa (Hedinichthys) yarkandensis* (Day)[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(3): 546-556. [陈生熬, 姚娜, 宋勇, 等. 塔里木河叶尔羌高原鳅形态性状对体质量的影响[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(3): 546-556.]
- [11] Hu Q L, Yang Y H, Han S M, et al. Degradation of agricultural drainage water quantity and quality due to farmland expansion and water-saving operations in arid basins[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 185-192.
- [12] Xiao J, Jin Z D, Wang J. Geochemistry of trace elements and water quality assessment of natural water within the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 136: 118-126.
- [13] Yang G Q. The relationship between main morphometric and body weight of Taimen (*Hucho taimen*) at the different months[J]. Chinese Journal of Zoology, 2016, 51(5): 876-886. [杨贵强. 不同月龄哲罗鲑主要形态性状与体重的关系[J]. 动物学杂志, 2016, 51(5): 876-886.]
- [14] Li Z, Jing T S, Li Y, et al. Effects of morphological traits on the body mass of *Leiocassis longirostris*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(4): 98-105. [李哲, 敬庭森, 李雨, 等. 长吻鮠形态性状对体质量的影响[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(4): 98-105.]
- [15] Zhang X M, Cheng S F. Path analysis and growth curve fitting of the morphological traits and body weight of *Conger myriaster*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(10): 1167-1175. [张新明, 程顺峰. 星康吉鳗形态性状与体重的通径分析及生长曲线拟合[J]. 中国水产科学, 2020, 27(10): 1167-1175.]

- [16] Chen H L, Tian Y S, Liu F, et al. Path analysis and curve estimates of morphometric traits and body weight of *Paralichthys olivaceus* at different growth stages[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(1): 64-76. [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.]
- [17] 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.]
- [18] Dong Y C, Sheng W B, Yu H G, et al. Path coefficient analysis of relationship between morphometric traits and body weight of juvenile Japanese sea perch *Lateolabrax maculatus*[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2021, 34(1): 29-34, 39. [董义超, 盛伟博, 于会国, 等. 花鲈幼鱼形态性状与体质量影响关系的通径分析[J]. 水产学杂志, 2021, 34(1): 29-34, 39.]
- [19] Fang W, Zhou S J, Zhao W, et al. Correlation and path analysis of morphological traits to body mass of juvenile *Thunnus albacores*[J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(1): 52-58. [方伟, 周胜杰, 赵旺, 等. 黄鳍金枪鱼 5 月龄幼鱼形态性状对体质量的相关性及通径分析[J]. 南方水产科学, 2021, 17(1): 52-58.]
- [20] Liu Y, Yu C Y, Yu D D, et al. Path coefficient analysis and curve estimates for body mass and morphometric traits of *Scophthalmus maximus* at different growth stages[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2018, 34(3): 181-190. [刘莹, 于超勇, 于道德, 等. 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[J]. 广西科学院学报, 2018, 34(3): 181-190.]
- [21] Jiang X, Lin X Q, Ma H, et al. Correlation and path analysis on body weight and morphometric traits of 5-month-old *Micropterus salmoides*[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(5): 124-129. [姜绪, 林香青, 马惠, 等. 5月龄大口黑鲈形态性状与体重的相关及通径分析[J]. 山东农业科学, 2020, 52(5): 124-129.]
- [22] Liu F, Chen L, Lou B, et al. Correlation and path coefficient analysis on body weight and morphometric traits of small yellow croaker *Pseudosciaena polyactis*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(3): 655-662. [刘峰, 陈琳, 楼宝, 等. 小黄鱼 (*Pseudosciaena polyactis*) 形态性状与体质量的相关性及通径分析[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(3): 655-662.]
- [23] Xiao W, Li D Y, Zou Z Y, et al. Effects analysis of morphometric attributes on body weight for Egyptian strain of *Oreochromis niloticus* in different growth phases[J]. Freshwater Fisheries, 2014, 44(2): 14-19, 42. [肖炜, 李大宇, 邹芝英, 等. 埃及品系尼罗罗非鱼不同生长阶段形态性状与体重的相关性[J]. 淡水渔业, 2014, 44(2): 14-19, 42.]
- [24] Zhang X M, Cheng S F. Effect and curve fitting of morphological traits to body weight between male and female *Mantis shrimp (Oratosquilla oratoria)*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(6): 82-91. [张新明, 程顺峰. 不同性别口虾蛄形态性状对体重的影响分析及曲线拟合[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(6): 82-91.]
- [25] Zhang X M, Cheng S F, Zhang M. Analysis of the influence of the morphological characteristics on the weight characteristics of *Blepharipoda liberate* Shen[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(1): 62-74. [张新明, 程顺峰, 张敏. 解放眉足蟹形态性状对重量性状影响的效果分析[J]. 中国水产科学, 2020, 27(1): 62-74.]
- [26] Dong J J, Sun C F, Tian Y Y, et al. Correlation analysis of the main morphological traits and body weight of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) and morphological traits between males and females[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(2): 76-84. [董浚键, 孙成飞, 田园园, 等. 翘嘴鲌主要形态性状与体重的相关性及其雌雄形态性状差异分析[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(2): 76-84.]
- [27] Zhao W, Hu J, Ma Z H, et al. Path analysis and growth curve fitting of morphological traits to body weight of juvenile *Lates calcarifer*[J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(9): 1700-1707. [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.]
- [28] Yuan X C, He X Y, Zhang L, et al. Study on the relationship between body weight and morphometrics of *Apalone ferox*[J]. Freshwater Fisheries, 2013, 43(4): 8-12. [袁显春, 何小燕, 张黎, 等. 珍珠鳖体重与形态性状的相关性研究[J]. 淡水渔业, 2013, 43(4): 8-12.]

Path analysis and growth curve fitting of morphological traits and body weight of *Triplophysa yarkandensi*

LI Yanhui^{1,3}, CHEN Sheng'ao^{2,3}, CHENG Yong^{1,3}

1. College of Life Science, Tarim University, Alar 843300, China;

2. College of Animal Science, Tarim University, Alar 843300, China;

3. Tarim Rare Fish Research Center, Tarim University, Alar 843300, China

Abstract: *Triplophysa yarkandensi* is an indigenous fish in the Tarim River in Xinjiang Province. To accumulate theoretical breeding data for *T. yarkandensi*, the effects of morphological traits on body weight were explored. Body weight (Y) and nine morphological traits were measured, including the total length (X_1), body length (X_2), body height (X_3), head length (X_4), tail stalk length (X_5), snout length (X_6), eye length (X_7), interorbital space (X_8), and slit width (X_9). Correlation analysis, path analysis, and regression analysis were used to determine the three main morphological traits that affect body weight (Y). The best-fitting model for the three main morphological characters and body weight was determined by curve fitting. Overall, there was a significant positive correlation between body weight and morphological traits ($P < 0.01$); the length of the tail stalk, eye diameter, and eye distance were not related to each other ($P > 0.05$). There were multiple collinear relationships between other traits and body weight; head length had the most direct effect on body weight (0.470), and body length had the most indirect effect on body weight (0.447), although head length and body length were the main variables that affected body weight. Head length was the largest direct determinant of body weight (0.221), and the largest co-determination coefficient of body length and head length was 0.341. The sum of the determinants of body weight (Y) for the three morphological traits was 0.958, which explained 95.8% of the variation. The linear equation for the three main morphological traits and body weight was $Y = -2.8 + 2.94X_2 + 0.764X_4 + 0.906X_5$ ($R^2 = 0.958$). The optimal model equations for the three main morphological traits and body weight contained exponential functions, a power function, and a linear function, and the model equations were $Y = 2.739e^{0.158X_2}$ ($R^2 = 0.936$), $Y = 4.946X_4^{1.100}$ ($R^2 = 0.931$), and $Y = 9.582 + 8.876\ln X_5$ ($R^2 = 0.807$) for the curve equation for the tail stalk length and body weight (Y). This indicated that the tail stalk length was not a main morphological factor and was the only variable that could not explain the change in body weight. Body length and head length were the main selection traits, and tail stalk length was an auxiliary trait, which could be used to guide *T. yarkandensi* breeding.

Key words: *Triplophysa yarkandensi*; morphological trait; body weight; path analysis; curve fitting

Corresponding author: CHEN Sheng'ao. E-mail: chenshengao@163.com