

DOI: 10.12264/JFSC2021-0113

北极茴鱼形态性状对体重影响效果分析

马凯^{1,2}, 佟广香^{1,2}, 匡友谊¹, 尹家胜^{1,2}, 张永泉^{1,2}

1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 黑龙江 哈尔滨 150076;

2. 黑龙江省冷水性鱼类种质资源及增养殖重点开放实验室, 黑龙江 哈尔滨 150076

摘要: 为探明北极茴鱼(*Thymallus arcticus*)形态性状与体重的关系, 以 1⁺~3⁺龄北极茴鱼为研究对象, 测定了体重(Y)和体厚(X_1)、眼间距(X_2)、体长(X_3)、体高(X_4)、头长(X_5)、眼径(X_6)、吻长(X_7)、尾柄长(X_8)、尾柄高(X_9)等 9 个形态性状, 利用相关分析、通径分析和多元回归分析等方法, 筛选出影响北极茴鱼体重的主要形态性状, 并建立回归方程。结果显示: (1) 不同年龄阶段, 与北极茴鱼体重显著相关($P<0.05$)的形态性状种类不同, 且数量也随着年龄的增加而降低。(2) 通径分析在 1⁺~3⁺龄北极茴鱼中分别保留了 4、4 和 2 个形态性状, 1⁺龄北极茴鱼中体长(X_3)的直接作用最大(0.345), 尾柄高(X_9)的间接作用最大(0.745); 2⁺龄北极茴鱼中体高(X_4)的直接作用最大(0.473), 体厚(X_1)的间接作用最大(0.378); 3⁺龄北极茴鱼中体厚(X_1)的直接作用最大(0.635), 尾柄高(X_9)的间接作用最大(0.344)。(3) 通径分析保留的形态性状对 1⁺~3⁺龄北极茴鱼体重的总决定系数较高, 分别为 0.943、0.778 和 0.997。(4) 多元回归分析拟合出 1⁺龄北极茴鱼形态性状(X_i)与体重(Y)回归方程为 $Y=-90.510+15.345X_1+3.638X_3+10.473X_4+16.884X_9$, 2⁺龄北极茴鱼形态性状(X_i)与体重(Y)回归方程为 $Y=-142.449+29.023X_1+81.082X_2+27.126X_4-47.376X_7$, 3⁺龄北极茴鱼形态性状(X_i)与体重(Y)回归方程为 $Y=-228.922+75.063X_1+107.864X_9$ 。本研究丰富了北极茴鱼基础生物学数据, 同时为将来人工养殖利用过程中北极茴鱼的选择育种提供待选形态性状。

关键词: 北极茴鱼; 形态性状; 体重; 相关分析; 通径分析; 回归分析

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)06-0825-09

北极茴鱼(*Thymallus arcticus*)隶属于鲑科(Salmonidae), 茴鱼属(*Thymallus*), 我国境内主要分布于额尔齐斯河流域, 在黑龙江支流呼玛河和额木尔河也有零星分布^[1]。北极茴鱼为名贵冷水性鱼类, 为额尔齐斯河流域渔民主要渔猎对象, 但过度捕捞及生境破坏已使其自然资源量濒临枯竭, 分别于 2004 年和 2021 年被列为新疆维吾尔自治区Ⅱ级和国家Ⅱ级保护野生动物, 亟需开展基础研究, 加深对北极茴鱼生物学特性的了解, 丰富其保护生物学研究数据。迄今为止, 国内外对北极茴鱼研究较少, 向伟等^[2-3]对其采捕运输技术和个体生物学进行了研究, 高萌^[4]对其遗传多样性进行了分析, Palace 等^[5]对其进行了毒理学

研究, Brix 等^[6]研究了水质对其受精率的影响, Sushchik 等^[7]对其肌肉脂肪酸的季节性变化进行了研究。体重是鱼类最重要的生长特征之一, 鱼类的形态性状与体重密切相关^[8], 运用统计分析方法研究形态性状与体重之间的关联, 进而拟合出回归方程, 对丰富鱼类的形态学和生长特性研究都具有重要意义, 目前尚未有北极茴鱼形态性状与体重关联的研究。本研究以 1⁺~3⁺龄北极茴鱼为研究对象, 该年龄区间囊括其幼鱼和成鱼阶段, 通过相关性分析、通径分析和多元回归分析, 筛选出不同年龄阶段与北极茴鱼体重显著相关的主要形态性状, 并建立相应的回归方程, 旨在充实北极茴鱼保护生物学研究, 同时为将来人工养殖利

收稿日期: 2021-3-22; 修订日期: 2021-5-27.

基金项目: 农业农村部财政专项; 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2020TD56).

作者简介: 马凯(1994-), 男, 硕士, 研究实习员, 研究方向为冷水性鱼类繁育技术. E-mail: makai@hrfri.ac.cn

通信作者: 张永泉, 副研究员, 研究方向为鱼类遗传育种. E-mail: atai0805@163.com

用过程中北极茴鱼的选择育种提供待选形态性状。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用北极茴鱼为 2019 年额尔齐斯河鱼类资源调查采捕的野生群体, 捕获的活体样本现场使用 40 mg/L MS-222 麻醉, 经快速测量、拍照和采集必要的生物材料后, 摘取少量背部鳞片用于年龄鉴定, 随后放生, 死亡样本冰冻运至实验室测量。共采集北极茴鱼 115 尾, 其中 1⁺龄 52 尾、2⁺龄 47 尾、3⁺龄 16 尾, 详细采样信息见表 1。

表 1 样品采集信息
Tab. 1 Sample collection information

采样地点 sampling location	年龄 age		
	1 ⁺	2 ⁺	3 ⁺
哈巴河 Haba River	14	18	5
布尔津河 Burqin River	22	15	7
喀依尔特河 Kayit River	4	2	1
库依尔特河 Kuirt River	0	1	0
喀拉额尔齐斯河 Kalaerzis River	11	9	3
克兰河 Crane River	1	2	0
体重/g body weight	60.18±13.88	156.43±22.13	253.38±22.07
体长/cm body length	15.93±1.32	22.22±1.03	25.48±0.87

1.2 数据测量

使用精确度为 0.01 g 电子天平测量体重(Y),

使用游标卡尺测量体厚(X₁)和眼间距(X₂), 然后使用数码相机对鱼体拍照, 使用 Motic Image Plus 2.0 软件参照标尺对试验鱼体长(X₃)、体高(X₄)、头长(X₅)、眼径(X₆)、吻长(X₇)、尾柄长(X₈)和尾柄高(X₉)等生长性状进行测量, 精确度为 0.01 mm。

1.3 统计分析

参考杜家菊等^[9]的分析方法, 使用 SPSS 20.0 软件首先对 3 个年龄阶段北极茴鱼的体重按照“分析→描述统计→探索”命令进行正态分布检验, 以确定其是否符合回归分析条件。然后按照“分析→回归→线性”命令, 以体重为因变量, 形态性状为自变量进行多元回归分析。通径分析和决定系数的计算分别参考陈红林等^[10]和张永泉等^[11]的方法。

2 结果与分析

2.1 北极茴鱼生长性状表型参数统计

不同年龄阶段北极茴鱼表型性状参数见表 2。1⁺龄北极茴鱼体重(Y)的变异系数最大, 为 23.06%, 眼径(X₆)的变异系数最小, 为 7.87%; 2⁺龄北极茴鱼体重(Y)的变异系数最大, 为 14.15%, 体长(X₃)的变异系数最小, 为 4.64%; 3⁺龄北极茴鱼头长(X₅)的变异系数最大, 为 28.24%, 体长(X₃)的变异系数最小, 为 3.41%。

2.2 北极茴鱼体重正态分布检验

北极茴鱼体重正态分布检验结果见表 3, 使用 Kolmogorov-Smirnov 和 Shapiro-Wilk 等 2 种方

表 2 不同年龄阶段北极茴鱼表型性状参数统计
Tab. 2 Parameter statistics of phenotypic traits in *Thymallus arcticus*

年龄 age	参数 parameter	Y/g	X ₁ /cm	X ₂ /cm	X ₃ /cm	X ₄ /cm	X ₅ /cm	X ₆ /cm	X ₇ /cm	X ₈ /cm	X ₉ /cm
1 ⁺	平均值 mean	60.18	2.03	0.91	15.93	3.76	3.18	0.89	0.62	1.55	1.32
	标准差 SD	13.88	0.20	0.08	1.32	0.40	0.26	0.07	0.07	0.21	0.13
	变异系数/% CV	23.06	9.85	8.79	8.29	10.64	8.18	7.87	11.29	13.55	9.85
2 ⁺	平均值 mean	156.43	2.85	1.21	22.22	5.73	4.13	1.14	0.91	2.21	1.82
	标准差 SD	22.13	0.22	0.10	1.03	0.39	0.34	0.12	0.11	0.21	0.11
	变异系数/% CV	14.15	7.72	8.26	4.64	6.81	8.23	10.53	12.09	9.50	6.04
3 ⁺	平均值 mean	253.38	3.41	1.39	25.48	6.82	1.31	1.21	1.07	2.35	2.10
	标准差 SD	22.07	0.19	0.09	0.87	0.29	0.37	0.08	0.13	0.19	0.10
	变异系数/% CV	8.71	5.57	6.47	3.41	4.25	28.24	6.61	12.15	8.09	4.76

注: Y 为体重, X₁ 为体厚, X₂ 为眼间距, X₃ 为体长, X₄ 为体高, X₅ 为头长, X₆ 为眼径, X₇ 为吻长, X₈ 为尾柄长, X₉ 为尾柄高。
Note: Y. body weight; X₁. body thickness; X₂. eyes interval; X₃. body length; X₄. body height; X₅. head length; X₆. eye diameter; X₇. proboscis length; X₈. caudal peduncle length; X₉. caudal peduncle height.

表 3 北极茴鱼体重正态分布检验
Tab. 3 The normal distribution test of body weight in *Thymallus arcticus*

年龄 age	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	统计量 statistic	自由度 df	P	统计量 statistic	自由度 df	P
1 ⁺	0.092	52	0.200	0.974	52	0.319
2 ⁺	0.076	47	0.200	0.987	47	0.881
3 ⁺	0.191	16	0.124	0.900	16	0.081

法对 3 个年龄阶段北极茴鱼体重进行正态分布检验, 获得的显著性水平均大于 0.05, 表明 3 个年

龄阶段北极茴鱼体重均服从正态分布, 满足回归分析条件。

2.3 不同年龄阶段北极茴鱼表型性状相关性分析

不同年龄阶段北极茴鱼 45 对性状间相关系数见表 4, 结果显示 1⁺龄北极茴鱼除体厚(X_1)与吻长(X_7)不存在相关性外, 其余 44 对表型性状之间均呈显著相关性($P<0.05$), 全部 9 个形态性状均与体重呈极显著相关($P<0.01$); 2⁺龄北极茴鱼有 31 对表型性状之间存在显著相关性($P<0.05$), 形态性状中体厚(X_1)、眼间距(X_2)、体长(X_3)、体高

表 4 北极茴鱼表型性状相关性分析
Tab. 4 Correlation analysis of phenotypic traits in *Thymallus arcticus*

年龄 age	形态性状 trait	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
1 ⁺	X_1	0.870**								
	X_2	0.808**	0.723**							
	X_3	0.930**	0.802**	0.800**						
	X_4	0.921**	0.785**	0.725**	0.880**					
	X_5	0.757**	0.643**	0.688**	0.810**	0.749**				
	X_6	0.632**	0.504**	0.540**	0.652**	0.612**	0.665**			
	X_7	0.369**	0.225	0.317*	0.410**	0.492**	0.415**	0.445**		
	X_8	0.647**	0.537**	0.521**	0.741**	0.663**	0.603**	0.558**	0.398**	
	X_9	0.894**	0.806**	0.753**	0.855**	0.848**	0.737**	0.552**	0.385**	0.613**
2 ⁺	X_1	0.667**								
	X_2	0.672**	0.314*							
	X_3	0.703**	0.374**	0.706**						
	X_4	0.745**	0.569**	0.528**	0.659**					
	X_5	0.358**	0.100	0.458**	0.623**	0.525**				
	X_6	0.221	0.071	0.223	0.246*	0.346**	0.617**			
	X_7	0.114	0.055	0.240	0.280*	0.451**	0.654**	0.480**		
	X_8	0.213	0.117	0.411**	0.472**	0.216	0.346**	0.337*	0.215	
	X_9	0.690**	0.489**	0.491**	0.756**	0.575**	0.408**	0.151	-0.010	0.237
3 ⁺	X_1	0.748**								
	X_2	0.743	0.409							
	X_3	0.802	0.480	0.719						
	X_4	0.876**	0.743**	0.722	0.739					
	X_5	0.650	0.348	0.670	0.734	0.625				
	X_6	0.425	0.315	0.456	0.461	0.475	0.714**			
	X_7	0.461	0.258	0.499	0.549*	0.501	0.802	0.523		
	X_8	0.377	0.150*	0.356	0.482	0.342	0.261	0.254	0.278	
	X_9	0.793**	0.541	0.668	0.737	0.764**	0.561*	0.399*	0.345	0.341

注: **表示相关极显著($P<0.01$), *表示相关显著($P<0.05$). Y 为体重, X_1 为体厚, X_2 为眼间距, X_3 为体长, X_4 为体高, X_5 为头长, X_6 为眼径, X_7 为吻长, X_8 为尾柄长, X_9 为尾柄高。

Note: ** indicates extremely significant effect ($P<0.01$), * indicates significant effect ($P<0.05$). Y. body weight; X_1 . body thickness; X_2 . eyes interval; X_3 . body length; X_4 . body height; X_5 . head length; X_6 . eye diameter; X_7 . proboscis length; X_8 . caudal peduncle length; X_9 . caudal peduncle height.

(X_4)、头长(X_5)和尾柄高(X_9)均与体重呈极显著相关性($P<0.01$), 眼径(X_6)、吻长(X_7)和尾柄长(X_8)与体重无显著相关性($P>0.05$); 3⁺龄北极茴鱼 9 对形态性状存在显著相关性($P<0.05$), 仅有体厚(X_1)、体高(X_4)和尾柄高(X_9)与体重呈极显著相关性($P<0.01$), 其余 6 项形态性状与体重无显著相关性($P>0.05$)。综合分析表明北极茴鱼的体厚(X_1)、体高(X_4)和尾柄高(X_9)等形态性状在幼鱼期和成鱼期均与体重具有高的相关性。

2.4 北极茴鱼形态性状与体重的通径分析

根据相关性分析结果, 对北极茴鱼的形态性状与体重进行通径分析(表 5), 1⁺龄北极茴鱼分析后保留的对体重影响较大的形态性状分别为体厚(X_1)、体长(X_3)、体高(X_4)和尾柄高(X_9), 4 个形态

性状对体重的直接作用大小依次为体长(X_3)>体高(X_4)>体厚(X_1)>尾柄高(X_9), 间接作用大小依次为尾柄高(X_9)>体厚(X_1)>体高(X_4)>体长(X_3); 2⁺龄北极茴鱼保留的形态性状分别为体厚(X_1)、眼间距(X_2)、体高(X_4)和吻长(X_7), 对体重的直接作用大小依次为体高(X_4)>眼间距(X_2)>体厚(X_1)>吻长(X_7), 间接作用大小依次为体厚(X_1)>吻长(X_7)>眼间距(X_2)>体高(X_4), 间接作用分析表明虽然 2⁺龄北极茴鱼的吻长(X_7)与体重无显著相关性, 但吻长(X_7)通过间接作用却对体重产生了重要影响, 因此在通径分析中被予以保留; 3⁺龄北极茴鱼保留的形态性状分别为体厚(X_1)和尾柄高(X_9), 对体重的直接作用大小为体厚(X_1)>尾柄高(X_9), 间接作用大小依次为尾柄高(X_9)>体厚(X_1)。

表 5 北极茴鱼形态性状对体重的通径分析
Tab. 5 Path analysis of morphological traits on body weight in *Thymallus arcticus*

年龄 age	形态性状 trait	相关系数 correlation coefficient	直接作用 direct effect	间接作用 indirect effect			
1 ⁺				X_1	X_3	X_4	X_9
							Σ
	X_1	0.870**	0.225		0.277	0.239	0.128
	X_3	0.930**	0.345	0.180		0.268	0.136
2 ⁺	X_4	0.921**	0.305	0.177	0.304		0.135
	X_9	0.894**	0.159	0.181	0.305	0.259	
				X_1	X_2	X_4	X_7
							Σ
3 ⁺	X_1	0.667**	0.289		0.120	0.269	-0.011
	X_2	0.672**	0.381	0.091		0.250	-0.050
	X_4	0.745**	0.473	0.164	0.201		-0.093
	X_7	0.114	-0.207	0.016	0.091	0.213	
3 ⁺				X_1	X_9		Σ
	X_1	0.748**	0.635		0.271		0.271
	X_9	0.793**	0.500	0.344			0.344

注: **表示相关极显著($P<0.01$). Y 为体重, X_1 为体厚, X_3 为体长, X_4 为体高, X_9 为尾柄高.
Note: ** indicates extremely significant effect ($P<0.01$). Y. body weight; X_1 . body thickness; X_3 . body length; X_4 . body height; X_9 . caudal peduncle height.

2.5 北极茴鱼形态性状对体重的决定系数

不同年龄阶段北极茴鱼形态性状对体重的决定系数见表 6, 不同年龄阶段, 形态性状对北极茴鱼体重的决定作用不同。1⁺龄北极茴鱼体长(X_3)对体重的决定作用最大, 为 0.119, 2 种形态性状联合条件下, 体长(X_3)和体高(X_4)对体重的决定作用最大, 为 0.185, 远远高于其他形态性状组合;

2⁺龄北极茴鱼体高(X_4)对体重的决定作用最大, 为 0.224, 2 种形态性状联合条件下, 体高(X_4)和吻长(X_7)对体重的决定作用最大, 为 0.190; 3⁺龄北极茴鱼体厚(X_1)对体重的决定作用最大, 为 0.403, 甚至高于 2 种形态性状联合条件下的决定作用, 表明体厚(X_1)为影响 3⁺龄北极茴鱼体重的最重要的形态性状。

表 6 北极茴鱼形态性状对体重的决定系数
Tab. 6 Determination coefficients of morphological traits on body weight in *Thymallus arcticus*

年龄 age	形态性状 trait				
1 ⁺	X ₁	X ₃	X ₄	X ₉	Σ
	X ₁	0.051			0.943
	X ₃	0.125	0.119		
	X ₄	0.108	0.185	0.093	
	X ₉	0.058	0.097	0.082	0.025
2 ⁺	X ₁	X ₂	X ₄	X ₇	Σ
	X ₁	0.084			0.778
	X ₂	0.069	0.145		
	X ₄	0.156	0.190	0.224	
	X ₇	-0.007	-0.038	-0.088	0.043
3 ⁺	X ₁	X ₉			Σ
	X ₁	0.403			0.997
	X ₉	0.344	0.250		

注: Y 为体重, X₁ 为体厚, X₃ 为体长, X₄ 为体高, X₉ 为尾柄高。
Note: Y. body weight; X₁. body thickness; X₃. body length; X₄. body height; X₉. caudal peduncle height.

2.6 北极茴鱼形态性状对体重的回归分析

将不同年龄阶段北极茴鱼在通径分析时保留的形态性状作为自变量, 采用逐步回归的分析方法, 依次在回归方程中引入新变量, 不断建立新的回归分析模型, 直至获得最优回归方程。不同回归分析模型的复相关分析结果见表 7, 随着新变量被引入回归分析模型, 每个年龄阶段的复相

关系数 R 均逐渐增大, 3 个年龄阶段北极茴鱼的形态性状被完全引入回归分析模型时, 复相关系数 R 分别为 0.970、0.882 和 0.942, 误差概率 P 分别为 0.049、0.019 和 0.000, 均达到显著性水平, 具有统计学意义, 充分说明保留的变量为影响该年龄阶段北极茴鱼体重的主要形态性状。

根据复相关分析结果, 对引入全部形态性状的回归分析模型的偏回归系数和回归常数进行显著性检验(表 8), 1⁺和 2⁺龄北极茴鱼均达到显著性水平($P<0.05$), 3⁺龄北极茴鱼达到了极显著水平($P<0.01$)。比较回归分析模型中不同形态性状的回归系数发现, 不同年龄阶段, 北极茴鱼体重受到不同形态性状的影响, 1⁺龄北极茴鱼形态性状回归系数由大到小依次为体长(X₃)、体高(X₄)、体厚(X₁)、尾柄高(X₉), 2⁺龄北极茴鱼形态性状回归系数由大到小依次为体高(X₄)、眼间距(X₂)、体厚(X₁)、吻长(X₇), 3⁺龄北极茴鱼形态性状回归系数由大到小依次为体厚(X₁)、尾柄高(X₉), 说明 1⁺龄北极茴鱼体重受体长(X₃)影响的权重最高, 2⁺龄北极茴鱼体重受体高(X₄)影响的权重最高, 3⁺龄北极茴鱼体重受体厚(X₁)影响的权重最高, 该结果与通径分析和决定系数分析结果相同。根据不同形态性状的偏回归系数, 建立不同年龄阶段北极茴鱼形态性状与体重的多元回归方程。

表 7 北极茴鱼形态性状与体重的复相关分析
Tab. 7 Multiple-correlation analysis of the morphometric traits to the body weight in *Thymallus arcticus*

年龄 age	模型中引入的参数 parameters introduced in the model	R	R ²	调整 R ² adjusted R ²	标准估计的误差 standard estimate error	P
1 ⁺	X ₃	0.930	0.865	0.863	5.146	0.000
	X ₃ , X ₄	0.955	0.911	0.908	4.217	0.000
	X ₁ , X ₃ , X ₄	0.967	0.935	0.931	3.655	0.000
	X ₁ , X ₃ , X ₄ , X ₉	0.970	0.940	0.935	3.543	0.049
2 ⁺	X ₄	0.745	0.555	0.545	14.919	0.000
	X ₂ , X ₄	0.814	0.663	0.647	13.139	0.001
	X ₁ , X ₂ , X ₄	0.864	0.746	0.728	11.534	0.001
	X ₁ , X ₂ , X ₄ , X ₇	0.882	0.778	0.756	10.921	0.019
3 ⁺	X ₁	0.819	0.670	0.647	13.118	0.000
	X ₁ , X ₉	0.942	0.887	0.869	7.985	0.000

注: Y 为体重, X₁ 为体厚, X₃ 为体长, X₄ 为体高, X₉ 为尾柄高。
Note: Y. body weight; X₁. body thickness; X₃. body length; X₄. body height; X₉. caudal peduncle height.

表 8 偏回归系数和回归常数的显著性检验
Tab. 8 Significance test of partial regression coefficient and regression constant

年龄 age	模型 model	偏回归系数 partial regression coefficient		回归系数 regression coefficient	t	P
		B	标准误差 SE			
1 ⁺	(常量 constant)	-90.510	6.218		-14.557	0.000
	X ₃	3.638	0.904	0.345	4.023	0.000
	X ₄	10.473	2.838	0.305	3.691	0.001
	X ₁	15.345	4.486	0.225	3.420	0.001
	X ₉	16.884	8.364	0.159	2.019	0.049
2 ⁺	(常量 constant)	-142.449	27.021		-5.272	0.000
	X ₄	27.126	6.414	0.473	4.229	0.000
	X ₂	81.082	18.249	0.381	4.443	0.000
	X ₁	29.023	9.235	0.289	3.143	0.003
	X ₇	-47.376	16.947	-0.207	-2.442	0.019
3 ⁺	(常量 constant)	-228.922	48.553		-4.715	0.000
	X ₁	75.063	11.869	0.635	6.324	0.000
	X ₉	107.864	21.667	0.500	4.978	0.000

注: Y 为体重, X₁ 为体厚, X₃ 为体长, X₄ 为体高, X₉ 为尾柄高。
Note: Y. body weight; X₁. body thickness; X₃. body length; X₄. body height; X₉. caudal peduncle height.

1⁺龄: $Y=-90.510+15.345X_1+3.638X_3+10.473X_4+16.884X_9$
2⁺龄: $Y=-142.449+29.023X_1+81.082X_2+27.126X_4-47.376X_7$
3⁺龄: $Y=-228.922+75.063X_1+107.864X_9$
式中, Y 代表体重, X₁、X₂、X₃、X₄、X₇ 和 X₉ 分别代表体厚、眼间距、体长、体高、吻长和尾柄高。

3 讨论

3.1 北极茴鱼表型性状的生长特征

研究表明, 鱼类发育过程中表型性状的生长并不完全是等比例的, 即身体各部分生长速度不一致, 造成不同年龄阶段的同种鱼类在表型性状上略有差异, 称之为异速生长^[12], 如牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)^[10]、真鲷(*Pagrus pagrus*)^[13]、金眼短鲷(*Nannacara anomala*)^[14]、奥比尼亚石脂鲤(*Brycon orbignyanus*)^[15]、江鳕(*Lota lota*)^[16]及大鳞副泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus*)^[17]等。部分鱼类在不同生长阶段表型性状的差异甚至能达到亚种以上的水平, 如胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)幼鱼的眼径与成鱼差异显著, 超出亚种水平^[18]。对比不同年龄阶段北极茴鱼表型性状统计结果, 发现北极茴鱼从 1⁺龄生长至 3⁺龄时, 表现为异速

生长, 仅有体重呈现等速生长特征, 其年平均绝对增长率分别为 96.25 g/a 和 96.95 g/a, 这种个别性状呈现出等速生长特征的现象在青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii*)幼鱼中也有发现^[19], 而其他形态性状均表现为异速生长。体重和体长是衡量鱼体规格最重要也是最常用的 2 个指标, 在鱼类生物学和生态学研究中的应用广泛^[20]。分析发现, 随着年龄的增长, 年龄相同的北极茴鱼个体间的体重和体长趋于统一, 变异系数呈收敛趋势, 体重的变异系数由 23.06%逐渐降低至 8.71%, 体长的变异系数从 8.29%逐渐降低为 3.41%。原因可能是北极茴鱼体长和体重的生长受到基因和环境的共同影响, 幼鱼期体长、体重的生长受基因影响较大, 具有基因优势的个体体长和体重的增长速度远高于其他个体, 导致个体间体长和体重的变异系数较大; 随着年龄的增长, 环境因素对北极茴鱼体长和体重的影响超越了基因的影响, 相同的生存环境使北极茴鱼个体间体长和体重均一化, 表现为变异系数降低。同时也提示, 在将来的北极茴鱼人工育种工作中, 选育时间应尽量安排在基因优势被环境因素覆盖前的幼年时期。

3.2 北极茴鱼形态性状与体重的相关性

相关性分析是厘清多个变量之间相互关系的

有效手段, 有利于剔除无关变量, 帮助做出准确的统计学判断^[21]。刘贤德等^[22]研究了13和20月龄大黄鱼的形态性状与体重的相关性, 表明不同年龄阶段, 体重与形态性状的相关系数不同。陈红林等^[10]分析了8和14月龄牙鲆形态性状与体重的相关性, 结果显示2个时期与牙鲆体重相关的形态性状不同, 且相同形态性状在不同时期与体重的相关性也有差异, 相似的研究结果也发现于洛氏鲮(*Phoxinus lagowskii* Dybowskii)^[11]中。由于北极茴鱼生长方式为异速生长, 造成不同年龄阶段形态性状各有差异, 因此不同年龄阶段的北极茴鱼与体重相关的形态性状不同, 且随着年龄增长, 与体重显著相关的形态性状逐渐变少($P < 0.05$), 从1⁺龄的9个形态性状降低为3⁺龄的3个形态性状, 其中的体厚、体高和尾柄高在不同年龄阶段始终与体重保持极显著的相关性($P < 0.01$), 以北极茴鱼体长为x轴、体厚为y轴、体高为z轴建立三维坐标系, 说明北极茴鱼体重的增长在y轴和z轴方向上表现得更为明显。

3.3 影响北极茴鱼体重的主要形态性状

通径分析于1921年由数量遗传学家 Sewall Wright 首次提出, 通过将自变量与因变量之间的表面直接相关性拆分成直接作用和间接作用, 为统计分析提供更直观、可靠的依据^[9]。相关分析在处理多元变量时无法全面反映变量间的相互作用关系, 因而具有局限性^[23]。通过通径分析, 不仅可以有效克服相关分析的局限性, 而且在通径分析的基础上进行多元回归分析, 可使建立的回归方程更加可靠^[11]。通过对北极茴鱼形态性状与体重进行通径分析, 排除了与体重显著相关($P < 0.05$)但实际作用却很小的形态性状, 如排除了1⁺龄北极茴鱼的眼间距、头长、眼径、吻长和尾柄长等形态性状, 保留了与体重不相关但间接作用却很大的形态性状, 如保留了2⁺龄北极茴鱼的吻长。决定系数可用于判定通径分析中保留的形态性状是否为影响北极茴鱼体重的主要影响因子, 齐明等^[24]认为独立性状和双性状之间决定系数的总和 $\Sigma \geq 0.850$, 表明保留的形态性状是影响体重的主要因素。分析发现, 1⁺和3⁺龄北极茴鱼的总决定系数分别为0.943和0.997, 说明体厚、体长、

体高、尾柄高和体厚、尾柄高分别为影响1⁺和3⁺龄北极茴鱼体重的主要形态性状。而2⁺龄北极茴鱼的总决定系数为0.778, 略低于0.850, 表明在本实验的统计范围之外还存在其他形态性状对2⁺龄北极茴鱼的体重存在影响。不同年龄阶段, 形态性状对鱼类体重的影响不同, 这种现象在牙鲆^[10]、大黄鱼(*Larimichthys crocea*)^[22]、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)^[25]、云龙石斑鱼(*Epinephelus moara*♀×*Epinephelus lanceolatus*♂)^[26]和乌龟(♀)×黑颈乌龟(♂)(*Chinemys reevesii*♀×*Chinemys nigricans*♂)杂交种^[27]中都有报道。综合相关分析、通径分析和多元回归分析, 明确了影响1⁺龄北极茴鱼体重的主要形态性状为体厚、体长、体高和尾柄高; 影响2⁺龄北极茴鱼体重的主要形态性状为体厚、眼间距、体高和吻长; 影响3⁺龄北极茴鱼体重的主要形态性状为体厚和尾柄高。

参考文献:

- [1] Ma B, Fan Z T. Genetic diversity of Arctic grayling (*Thymallus* sp.) population from upper Heilongjiang River based on mitochondrial control region sequence[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2013, 26(6): 7-12. [马波, 范兆廷. 利用线粒体 D-loop 基因序列分析黑龙江上游北极茴鱼群体遗传结构[J]. 水产学杂志, 2013, 26(6): 7-12.]
- [2] Xiang W, Cao G. Technology of exploitation and transportation of wild *Thymallus arcticus*[J]. China Fisheries, 2010(11): 59-60. [向伟, 曹恭. 野生北极茴鱼的采捕及运输技术[J]. 中国水产, 2010(11): 59-60.]
- [3] Xiang W, Fan Z M, Yin J G, et al. Preliminary study on biology of *Thymallus arcticus grubei* in Yertex River[J]. Journal of Hydroecology, 2009, 30(4): 75-78. [向伟, 范镇明, 殷建国, 等. 叶尔蒂斯河野生北极茴鱼生物学研究[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(4): 75-78.]
- [4] GAO M. Studies on the age, growth and genetic diversity of *Thymallus arcticus arcticus* in Xinjiang[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018: 30-37. [高萌. 新疆北极茴鱼的年龄生长及遗传多样性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 30-37.]
- [5] Palace V P, Allen-Gil S M, Brown S B, et al. Vitamin and thyroid status in Arctic grayling (*Thymallus arcticus*) exposed to doses of 3, 3', 4, 4' -tetrachlorobiphenyl that induce the phase I enzyme system[J]. Chemosphere, 2001, 45(2): 185-193.
- [6] Brix K V, Gerdes R, Curry N, et al. The effects of total dissolved solids on egg fertilization and water hardening in two salmonids—Arctic Grayling (*Thymallus arcticus*) and Dolly Varden (*Salvelinus malma*)[J]. Aquatic Toxicology,

- 2010, 97(2): 109-115.
- [7] Sushchik N N, Gladyshev M I, Kalachova G S. Seasonal dynamics of fatty acid content of a common food fish from the Yenisei River, Siberian grayling, *Thymallus arcticus*[J]. Food Chemistry, 2007, 104(4): 1353-1358.
- [8] 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.]
- [9] Du J J, Chen Z W. Method of path analysis with SPSS linear regression[J]. Bulletin of Biology, 2010, 45(2): 4-6. [杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报, 2010, 45(2): 4-6.]
- [10] 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.]
- [11] Zhang Y Q, Bai Q L, Guo W X, et al. Effects of morphological traits on body mass of *Phoxinus lagowskii* Dybowskii[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(11): 3063-3068. [张永泉, 白庆利, 郭文学, 等. 洛氏鲮形态性状对体质量的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 3063-3068.]
- [12] van Snik G M J, van den Boogaart J G M, Osse J W M. Larval growth patterns in *Cyprinus carpio* and *Clarias gariepinus* with attention to the finfold[J]. Journal of Fish Biology, 1997, 50(6): 1339-1352.
- [13] Andrade C A P, Nascimento F J A, Nogueira N, et al. Allometric growth in red porgy larvae: Developing morphological indices for mesocosm semi-intensive culture[J]. North American Journal of Aquaculture, 2013, 75(1): 42-49.
- [14] Kupren K, Prusińska M, Źarski D, et al. Early development and allometric growth in *Nannacara anomala* Regan, 1905 (Perciformes: Cichlidae) under laboratory conditions[J]. Neotropical Ichthyology, 2014, 12(3): 659-665.
- [15] Nogueira L B, Godinho A L, Godinho H P. Early development and allometric growth in hatchery-reared characin *Brycon orbignyanus*[J]. Aquaculture Research, 2014, 45(6): 1004-1011.
- [16] Kupren K, Trąbska I, Źarski D, et al. Early development and allometric growth patterns in burbot *Lota lota* L.[J]. Aquaculture International, 2014, 22(1): 29-39.
- [17] Zhang Y L, Wu Q W, Hu W H, et al. Morphological changes and allometric growth in hatchery-reared Chinese loach *Paramisgurnus dabryanus* (Dabry de Thiersant, 1872)[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 34(4): 757-762.
- [18] Yang X, Zeng L W, Huang K, et al. Multivariate morphological study on the difference of body shape between young and adult fish of *Myxocyprinus asiaticus*[C]//Summary of the Eighth Symposium on Zoology in Western China. Sichuan Zoology Society, Chongqing zoology society, Yunnan zoology society, Shanxi zoology society, Gansu zoology society, Qinghai zoology society, Ningxia biology society, Xinjiang animal society, Tibet biology society, Guizhou Normal University: Sichuan zoology society, 2019: 1. [杨鑫, 曾丽雯, 黄坤, 等. 胭脂鱼幼鱼及成鱼体形差异的多变量形态学研究[C]//第八届中国西部动物学学术研讨会会议摘要汇编, 四川省动物学会、重庆市动物学会、云南省动物学会、陕西省动物学会、甘肃省动物学会、青海省动物学会、宁夏生物学会、新疆动物学会、西藏生物学会、贵州师范大学: 四川省动物学会, 2019: 1.]
- [19] Yang J Q, Ma Y L, Chen Y, et al. Preliminary study on the growth of juvenile *Gymnocyprinus przewalskii* in pond culture[J]. Hebei Fisheries, 2011(8): 12-14, 33. [杨杰泉, 马玉亮, 陈洋, 等. 池养青海湖裸鲤幼鱼生长初步研究[J]. 河北渔业, 2011(8): 12-14, 33.]
- [20] Froese R. Cube law, condition factor and weight-length relationships: History, meta-analysis and recommendations [J]. Journal of Applied Ichthyology, 2006, 22(4): 241-253.
- [21] 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.]
- [22] 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, 2010, 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, 2010, 29(5): 159-163.]
- [23] He A, Zhu Q C. Relationship analysis between morphometric attributes and body weight of *Nibea coibor* in Arafura Sea of Indonesia[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2012(1): 41-48. [何岸, 朱清澄. 印尼阿拉弗拉海浅色黄姑鱼形态性状与体重之间的关系分析[J]. 海洋湖沼通报, 2012(1): 41-48.]
- [24] Qi M, Hou J L, Lou B, et al. Effects of morphometric attributes on body weight for one-year-old *Eleutheronema tetradactylum*[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2014, 33(2): 134-139. [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.]
- [25] Sun J L, Shen Y B, Fu J J, et al. Effects of main morphological traits on body weight of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) at different months of age[C]//China Fisheries Society. Abstracts of 2014 annual meeting of China Fisheries Society. China Fisheries Society, 2014: 1. [孙俊龙, 沈玉帮,

- 傅建军, 等. 草鱼不同月龄主要形态性状对体质量影响效果的分析[C]//中国水产学会. 2014 年中国水产学会学术年会论文摘要集. 中国水产学会, 2014: 1.]
- [26] Wu S Q, Luo H Y, Zhang Z, et al. Principal component and path analysis of phenotypic traits of Yunlong grouper with different month ages[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(5): 680-687. [吴水清, 罗辉玉, 张哲, 等. 不同月龄云龙石斑鱼表型性状的主成分与通径分析[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(5): 680-687.]
- [27] He G, Fang C L, He L, et al. Correlation analyses between morphological traits and body weight of one- and two-year-old tortoise hybrid F1 (*Chinemys reevesii* ♀ × *Chinemys nigricans* ♂)[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2020, 33(4): 23-28. [贺刚, 方春林, 何力, 等. 1、2 龄乌龟(♀) × 黑颈乌龟(♂)杂交 F1 代的形态性状与体质量的相关分析[J]. 水产学杂志, 2020, 33(4): 23-28.]

Effect of morphological traits on body weight of *Thymallus arcticus*

MA Kai^{1,2}, TONG Guangxiang^{1,2}, KUANG Youyi¹, YIN Jiasheng^{1,2}, ZHANG Yongquan^{1,2}

1. Heilongjiang River Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150076, China;

2. Key Open Laboratory of Cold-Water Fish Germplasm Resources and Aquaculture of Heilongjiang Province, Harbin 150076, China

Abstract: *Thymallus arcticus* belongs to the Salmonidae family and is a valuable cold-water fish, mainly distributed in the Irtysh River Basin. However, overfishing and habitat destruction have depleted their populations and in 2021, they were classified as national level II protected wild animals. Therefore, basic research is urgently needed to better understand the biological characteristics of *T. arcticus*. To determine the relationship between the morphological traits and body weight of *T. arcticus*, individuals with ages 1⁺, 2⁺, and 3⁺ were used as the research objects and measured for their body weights (*Y*) and nine morphological traits, namely body thickness (*X*₁), eye interval (*X*₂), body length (*X*₃), body height (*X*₄), head length (*X*₅), eye diameter (*X*₆), proboscis length (*X*₇), caudal peduncle length (*X*₈), and caudal peduncle height (*X*₉). Relevant analysis, path analysis, and multiple regression analysis were used to screen out the main morphological traits affecting the body weight of *T. arcticus* and establish regression equations. The results showed that: (1) different types of morphological traits were significantly related (*P*<0.05) to the weight of *T. arcticus* at different ages and the number of traits also decreased as age increased. (2) Path analysis retained 4, 4 and 2 morphological traits for *T. arcticus* with ages 1⁺, 2⁺, and 3⁺ years, respectively. The body length (*X*₃) had the greatest direct effect (0.345), while caudal peduncle height (*X*₉) had the largest indirect effect (0.745) on the body weight of 1⁺-year-old *T. arcticus*. Body height (*X*₄) had the largest direct effect (0.473) and body thickness (*X*₁) had the largest indirect effect (0.378) in 2⁺-year-old *T. arcticus*. Body thickness (*X*₁) had the largest direct effect (0.635) and caudal peduncle height (*X*₉) had the largest indirect effect (0.344) in 3⁺-year-old *T. arcticus*. (3) The total determination coefficients of the morphological traits retained by the path analysis, and therefore affecting body weight, were 0.943, 0.778, and 0.997 in *T. arcticus* with ages 1⁺, 2⁺, and 3⁺, respectively. (4) Through multiple regression analysis, the fitted regression equations of the morphological traits (*X*_{*i*}) and body weight (*Y*) were found to be $Y = -90.510 + 15.345X_1 + 3.638X_3 + 10.473X_4 + 16.884X_9$, $Y = -142.449 + 29.023X_1 + 81.082X_2 + 27.126X_4 - 47.376X_7$, and $Y = -228.922 + 75.063X_1 + 107.864X_9$ for *T. arcticus* with ages 1⁺, 2⁺, and 3⁺, respectively. This study identified the main morphological traits that determine the body weight of *T. arcticus* at different ages and also established the regression equations, providing fundamental research data for *T. arcticus* conservation biology, as well as candidate morphological traits for future research on the selection and breeding of *T. arcticus*.

Key words: *Thymallus arcticus*; morphological traits; body weight; correlation analysis; path analysis; regression analysis

Corresponding author: ZHANG Yongquan. E-mail: atai0805@163.com