



## 罗氏沼虾性成熟前后形态性状对体质量的通径分析

邢钱钱<sup>1</sup>, 杨旻珉<sup>1</sup>, 陈国柱<sup>1</sup>, 唐琼英<sup>1\*</sup>, 夏正龙<sup>2</sup>, 蔡缪荧<sup>2</sup>, 杨杰<sup>2</sup>,  
杜厚宽<sup>2</sup>, 高权新<sup>1</sup>, 易少奎<sup>1</sup>, 杨国梁<sup>1,2\*</sup>

(1. 湖州师范学院, 浙江省水生生物资源养护与开发技术研究重点实验室,  
中国水产科学研究院水生动物繁育与营养重点实验室, 浙江 湖州 313000;

2. 江苏数丰水产种业有限公司, 江苏 高邮 225654)

**摘要:** 为探明罗氏沼虾养殖群体在性成熟前后表型性状间的相互关系, 实验随机选取人工养殖的罗氏沼虾 1 106 尾, 对其体质量、全长、体长等 15 个性状进行测量, 并采用相关分析和通径分析阐明形态性状对体质量的影响。结果显示, 在性成熟前后及同一阶段雌雄群体之间, 影响体质量的关键指标以及所构建的关键表型性状多元回归方程截然不同。在性成熟后, 雌雄个体呈现出明显的性二态现象, 除第二步足长和第二步足重存在雄性极显著大于雌性外, 雄性全长、体长、额剑长、头胸甲高、腹长、腹高和腹部重都极显著小于雌性, 这可能与性成熟后雌性通过发达的头胸甲和腹部来提升其繁殖能力有关。统计结果显示, 被保留的性状与体质量的复相关系数大于 0.85, 表明本研究已确定影响各群体体质量的关键性状。研究表明, 将罗氏沼虾的性成熟状态和雌雄群体的优良表型作为选育依据, 并有效利用影响体质量的关键性状指标, 有利于其选育工作的开展。本研究可为罗氏沼虾的良种选育提供参考。

**关键词:** 罗氏沼虾; 形态性状; 性成熟前后; 性二态; 通径分析

**中图分类号:** S 917.4

**文献标志码:** A

罗氏沼虾 (*Macrobrachium rosenbergii*) 又称马来西亚大虾、淡水长臂虾等, 隶属于节肢动物门 (Arthropoda) 十足目 (Decapoda) 长臂虾科 (Palaeomonidae) 沼虾属 (*Macrobrachium*), 是世界上最大的淡水虾类, 原产于印度洋、太平洋区域的热带和亚热带国家, 具有生长快、个体大、易驯养、适应性强、抗病力强、生长周期短和蛋白质含量高特性, 是一种养殖量较大的重要水产经济动物<sup>[1-3]</sup>。自 1976 年引种以来, 罗氏沼虾已推广至我国江苏、浙江、广东等多省, 但经过多年的养殖, 出现了生长缓慢、性成熟提前、抗逆性差等种质衰退现象<sup>[4-6]</sup>。因此, 进一步通过人工选育, 培育

出生长快、抗逆性强的良种是当前亟待解决的问题。

在动物的遗传选育中, 体质量和外部形态是重要的性状。由于外部形态性状具有可度量性和直观性, 将体质量和外部形态性状作为选择指标, 将显著提高选育效率。在衡量动物经济性状的表型性状中, 体质量是一种重要的经济性状, 与外部形态性状存在一定的相关性。通径分析是一种多元统计分析技术, 是分析水产动物形态性状与体质量关系的常用方法, 它不但可以表述性状间的相关性, 也能将性状间的相关系数剖分成直接影响和间接影响, 并建立因变量和自变量的最优

收稿日期: 2021-02-23 修回日期: 2021-04-01

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0901300); 江苏省重点研发计划 (BE2019352); 农业农村部现代农业产业技术体系专项 (CARS-48)

第一作者: 邢钱钱 (照片), 从事水产动物遗传育种研究, E-mail: 1399559288@qq.com

通信作者: 唐琼英, 从事水产动物遗传育种研究, E-mail: tangqy@zjhu.edu.cn;

杨国梁, 从事水产动物遗传育种研究, E-mail: ygl0572@163.com



回归方程<sup>[7-10]</sup>。目前, 通径分析在指导大菱鲂 (*Scophthalmus maximus*)<sup>[11]</sup>、黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)<sup>[12]</sup>、花鲈 (*Lateolabrax maculatus*)<sup>[13]</sup>、无角牻牛 (*Bos grunniens*)<sup>[14]</sup>、凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*)<sup>[15]</sup>、脊尾白虾 (*Exopalaemon carinicauda*)<sup>[10, 16]</sup> 和罗氏沼虾<sup>[17-18]</sup> 等动物良种选育上均有应用。在罗氏沼虾中, 杨世平等<sup>[17]</sup>、邓平等<sup>[18]</sup>、孙海峰等<sup>[19]</sup> 和唐琼英等<sup>[20]</sup> 分别分析了不同月龄 (4、5 和 6 月龄)、不同整色罗氏沼虾形态性状对体质量的影响以及养殖群体表型性状间的相关性及类群差异分析, 并建立了体质量的多元线性回归方程, 但目前尚未探究罗氏沼虾性成熟前后体长等表型性状对体质量的影响。另外, 动物两性异形是一种非常普遍的现象, 大多数鸟类和哺乳类雄性个体大于雌性, 但其他大部分动物类群倾向于大个体雌性的两性异形<sup>[21-22]</sup>, 如 66% 的蛇类<sup>[23]</sup>、90% 的无尾类<sup>[24]</sup> 等。两性异形, 即性二态 (sexual dimorphism) 是指种内雌、雄个体之间在诸如体型大小、身体结构、体色或身体局部形态等特征上存在的显著差异, 这种现象在生物界中普遍存在<sup>[25-26]</sup>。如革胡子鲶 (*Clarias fuscus*)、近方蟹 (*Hemigrapsus takanoi*)<sup>[27]</sup>、红足沼虾 (*M. dayanum*)<sup>[28]</sup> 和海南沼虾 (*M. hainanense*)<sup>[29]</sup>。罗氏沼虾同样存在性二态现象, 尤其达到性成熟后的个体, 雌雄差异尤其明显<sup>[30]</sup>。

基于此, 本实验拟对罗氏沼虾性成熟前后关键表型性状对体质量的影响以及雌雄群体表型性状上的差异进行研究, 通过相关分析、通径分析和决定程度分析, 获得影响各群体体质量的主要表型性状, 并分别建立性成熟前后表型性状与体质量的回归方程, 使选育标准由感官化转变为量化标准, 旨在为人工选育提供更准确的测量指标, 在生产实践中具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品来源

实验虾来自江苏数丰水产种业有限公司育种中心培育的家系后代。选取日龄相近的 7 个家系, 分别养殖于同一池塘的 7 个网箱中, 网箱规格为 5 m × 10 m × 2 m, 养殖条件保持一致。于 2018 年 8 月中旬 (出苗后约 3 个月, 未达性成熟) 和 10 月下旬 (出苗后约 6 个月, 达性成熟) 分别进行 2 次采样, 每次每个家系雌雄虾各随机选取 30~50 尾, 共计 1 106 尾。其中性成熟前, 雌虾

235 尾、雄虾 311 尾; 性成熟后, 雌虾 280 尾、雄虾 280 尾。

### 1.2 表型性状的测量方法

本实验共选取 15 个表型性状进行分析, 包括 13 个可量性状和 2 个可数性状。可量性状包括: 体质量 (body weight, BW)、全长 (total length, TL)、体长 (body length, BL)、额剑长 (rostrum length, RL)、头胸甲长 (carapace length, CL)、头胸甲宽 (carapace width, CW)、头胸甲高 (carapace depth, CD)、腹长 (abdominal length, AL)、腹宽 (abdominal width, AW)、腹高 (abdominal depth, AD)、第二步足长 (length of second leg, LSL)、第二步足重 (weight of second leg, WSL) 及腹部重 (abdominal weight, Wa)。可数性状包括上额刺数 (number of dorsal rostrum teeth, DRT) 和下额刺数 (number of ventral rostrum teeth, VRT)。表型性状的检测方法参考潘家模等<sup>[31-32]</sup> 和杨明等<sup>[33]</sup>, 对每个个体分别进行测量, 称重前将虾体用纱布吸干水分, 采用精度为 0.01 g 的电子天平测量体质量, 可量形态性状采用电子数显游标卡尺 (精度为 0.01 mm) 进行测量。部分测量性状如图 1 所示。

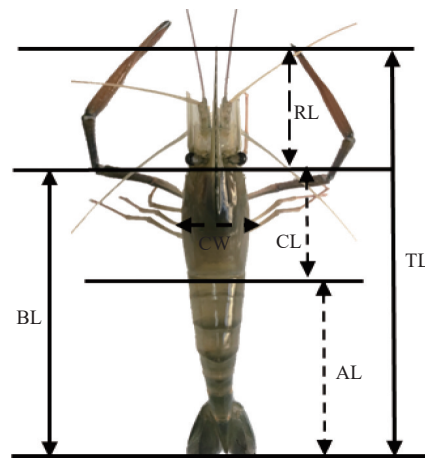


图 1 用于实验的罗氏沼虾部分测量性状

TL. 全长, BL. 体长, RL. 额剑长, CL. 头胸甲长, CW. 头胸甲宽, AL. 腹长

Fig. 1 Some morphometric characters of *M. rosenbergii* used for the present study

TL. total length, BL. body length, RL. rostrum length, CL. carapace length, CW. carapace width, AL. abdominal length

### 1.3 数据分析

使用 SPSS 25 软件对表型数据进行相关分析、通径分析、*t* 检验和决定程度分析, 以体质量为因

变量,其他可量形态性状为自变量。首先对因变量进行正态性检验,当 $P>0.05$ 时,方可进行回归分析,并逐步剔除不显著的表型性状,分析保留下来的性状对体质量影响的直接作用(通径系数)和间接作用(间接通径系数),并得到最优的多元回归方程。数据分析方法参照杜家菊等<sup>[9]</sup>,其中直接通径系数 $P_i$ 为标准化的偏回归系数,间接通径系数为 $P_{ijy}=R_{ij} \times P_{jy}$ ( $P_{ijy}$ 为 $X_i$ 通过 $X_j$ 对 $y$ 的间接通径系数, $R_{ij}$ 为 $X_i$ 和 $X_j$ 之间的相关系数, $P_{jy}$ 为 $X_j$ 对 $y$ 的直接通径系数)。单个性状对体质量的决定系数为 $d_i=P_i^2$ ,2个性状对体质量的共同决定系数 $d_{ij}=2R_{ij}P_iP_j$ <sup>[34]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 性成熟前后各表型性状统计分析

在性成熟前,BW、CL、CW、CD和LSL的变异系数较大,均为20%以上,其中BW的变异系数最大,达49%。而性成熟后,BW、AW、LSL、WSL和Wa的变异系数较大,均为29%以上,WSL的变异系数最大,为112%(表1)。为进一步了解雌雄个体差异,对性成熟前后的雌雄个体进行了分析,结果表明,性成熟前雌雄个体的BW、CL、CW、CD和LSL的变异系数都较大,均为20%以上。在性成熟后,雌雄性的表型性状相差较大,总体上雄性各表型性状的变异系数大于雌性,主要表现在BW、TL、BL、RL、CL、CW、CD、AL、AW、AD、LSL、WSL和Wa,其中WSL变异系数达到了111%,但雌性在BW、AW、WSL和Wa变异系数达到20%以上(表1)。

### 2.2 性成熟前后雌雄群体差异分析

对性成熟前后的雌雄个体各表型性状分别进行了独立样本 $t$ 检验。结果显示,罗氏沼虾在性成熟前,雌雄群体间各表型性状不存在差异,但性成熟后,雌性个体AD、AL、BL、RL和TL均极显著大于雄性[除CD和Wa雌性显著大于雄性( $P<0.05$ )],但LSL和WSL雄虾极显著大于雌虾( $P<0.01$ )(图2)。

### 2.3 性成熟前后表型性状间的简单相关分析

对性成熟前后各表型性状进行相关性分析。结果显示,除DRT和VRT外,其余表型性状与体质量均呈极显著正相关( $P<0.01$ ),表型性状间相关系数的大小顺序在性成熟前后以及雌雄群

体中均有所差异,且性成熟前后,以及雌雄群体各表型性状与体质量相关系数的大小顺序也不相同。

### 2.4 性成熟前后各形态性状对体质量影响的通径分析及回归方程的建立

对性成熟前后各表型性状对体质量的影响进行了通径分析并建立多元回归方程,结果显示,性成熟前所有个体,TL、BL、CW、CD、AD和LSL等性状对BW有显著影响(表2),但各性状对BW的直接作用较小,其影响程度为 $LSL>BL>AD>CW>TL>CD$ (表3)。根据逐步回归分析结果,建立的多元回归方程 $BW=-11.11+0.03TL+0.07BL+0.24CW+0.07CD+0.33AD+0.06LSL$ 。性成熟前雌性,各性状对BW的影响程度为 $AD>LSL>TL>BL>AW>RL$ (表3),多元回归方程为 $BW=-11.28+0.04TL+0.06BL-0.07RL+0.26AW+0.51AD+0.07LSL$ ;性成熟前雄性,BL、CW、CD、AL、AD、LSL等性状对BW有显著影响(表2),但各性状的间接作用均大于直接作用,影响程度为 $BL>CD>LSL>CW>AD>AL$ (表3),多元回归方程为 $BW=-10.74+0.1BL+0.29CW+0.29CD-0.04AL+0.17AD+0.05LSL$ 。

性成熟后所有个体,各性状对BW的影响程度为 $Wa>WSL>CL>CD$ (表3),直接作用中较为突出的性状为Wa(0.51),而CD的间接作用最大(0.78),其多元回归方程 $BW=-9.78+0.31CL+0.35CD+1.47WSL+1.24Wa$ 。性成熟后雌性,各性状对BW的影响程度为 $Wa>CW>WSL>CD>AD$ (表3),其中AD和CD的间接作用较为突出,建立的多元回归方程为 $BW=-6.81+0.41CW+0.24CD-0.12AD+1.97WSL+1.53Wa$ ;性成熟后雄性,CL、WSL和Wa等性状对BW有显著影响(表2),但各性状对BW的直接作用较小,其影响程度为 $Wa>CL>WSL$ (表3),且各性状的间接作用均大于直接作用,多元回归方程为 $BW=-9.55+1.5WSL+1.16Wa+0.55CL$ 。

### 2.5 性成熟前后形态性状对体质量的决定程度分析

逐步回归分析被保留下来的形态性状,以及体质量的复相关分析结果表明,性成熟前所有个体及雌雄个体,对体质量有影响的性状均为6个,其复相关系数分别为0.95、0.95和0.97,性成熟后所有个体及雌雄个体对体质量有影响的性状分

表 1 罗氏沼虾性成熟前后各表型性状参数估计

性状 trait	性成熟前 immatured (n=546)				性成熟后 matured (n=560)			
	雌性 female (n=311)		雄性 male (n=235)		雌性 female (n=280)		雄性 male (n=280)	
	均值±标准差 mean±SD	变异系数/% CV	均值±标准差 mean±SD	变异系数/% CV	均值±标准差 mean±SD	变异系数/% CV	均值±标准差 mean±SD	变异系数/% CV
体质量/g BW	7.19±3.49	49	7.24±3.62	50	22.80±7.45 <sup>a</sup>	33	23.55±11.97 <sup>a</sup>	51
全长/mm TL	86.75±16.93	20	87.27±14.86	17	124.90±14.86 <sup>a</sup>	12	120.74±21.86 <sup>b</sup>	18
体长/mm BL	65.24±11.49	18	65.11±11.24	17	93.99±10.29 <sup>a</sup>	11	91.12±17.11 <sup>b</sup>	19
额剑长/mm RL	23.35±4.10	18	23.34±4.42	19	31.71±3.44 <sup>a</sup>	11	30.27±5.03 <sup>b</sup>	17
头胸甲长/mm CL	22.13±4.52	20	22.40±4.65	21	32.85±4.22 <sup>a</sup>	13	32.81±6.89 <sup>a</sup>	21
头胸甲宽/mm CW	13.66±2.83	21	13.72±2.77	20	19.85±2.64 <sup>a</sup>	13	19.49±4.26 <sup>a</sup>	22
头胸甲高/mm CD	14.45±3.52	24	14.46±3.08	21	21.76±2.97 <sup>a</sup>	14	21.12±4.65 <sup>b</sup>	22
腹长/mm AL	44.27±7.28	16	43.38±7.24	17	62.51±6.52 <sup>a</sup>	10	59.82±10.01 <sup>b</sup>	17
腹宽/mm AW	11.74±2.21	19	11.68±2.26	19	18.36±4.41 <sup>a</sup>	24	17.71±10.82 <sup>a</sup>	61
腹高/mm AD	12.84±2.30	18	12.68±2.16	17	20.34±2.75 <sup>a</sup>	14	18.40±3.42 <sup>b</sup>	19
第二步足长/mm LSL	49.04±11.93	24	49.72±15.00	30	77.26±13.96 <sup>b</sup>	18	87.64±30.08 <sup>a</sup>	34
额刺数(上)/p DRT	12.55±0.90	7	12.39±0.91	7	12.80±0.91 <sup>a</sup>	7	12.83±0.88 <sup>a</sup>	7
额刺数(下)/p VRT	11.77±0.90	8	11.85±0.89	8	11.86±0.85 <sup>a</sup>	7	11.84±0.94 <sup>a</sup>	8
第二步足质量/g WSL					0.96±0.54 <sup>b</sup>	56	1.89±2.09 <sup>a</sup>	111
腹部质量/g Wa					11.04±3.32 <sup>a</sup>	30	10.56±4.68 <sup>b</sup>	44

性状 trait	性成熟前所有个体 all immatured prawns (n=546)		性成熟后所有个体 all matured prawns (n=560)	
	均值±标准差 mean±SD	变异系数/% CV	均值±标准差 mean±SD	变异系数/% CV
体质量/g BW	7.21±3.54	49	23.18±9.97	43
全长/mm TL	86.98±16.06	18	122.82±18.79	15
体长/mm BL	65.18±11.37	17	92.55±14.18	15
额剑长/mm RL	23.35±4.24	18	30.99±4.37	14
头胸甲长/mm CL	22.25±4.58	21	32.83±5.70	17
头胸甲宽/mm CW	13.68±2.80	20	19.67±3.55	18
头胸甲高/mm CD	14.45±3.33	23	21.44±3.91	18
腹长/mm AL	43.88±7.27	17	61.17±8.55	14
腹宽/mm AW	11.71±2.23	19	18.03±8.26	46
腹高/mm AD	12.77±2.24	18	19.37±3.25	17
第二步足长/mm LSL	49.33±13.30	27	82.45±24.00	29
额刺数(上)/p DRT	12.48±0.91	7	12.82±0.89	7
额刺数(下)/p VRT	11.80±0.90	8	11.85±0.89	8
第二步足质量/g WSL			1.42±1.59	112
腹部质量/g Wa			10.80±4.06	38

注: 表格中同行上标不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

Notes: in the same row, values with different lowercase letters superscripts mean significant differences ( $P < 0.05$ )

别为 4、5 和 3 个, 复相关系数分别为 0.95、0.99 和 0.96 (表 4)。性成熟前后罗氏沼虾各形态性状对体质量的决定系数见表 5, 就单独决定系数和共同决定系数而言, 在性成熟前后以及雌雄群体间, 对体质量决定程度最大的性状呈现阶段性差异。

### 3 讨论

#### 3.1 罗氏沼虾表型性状的变异

衡量一个性状, 均值、标准误和变异系数是必不可少的参数, 其中变异系数是比较 2 个或多个

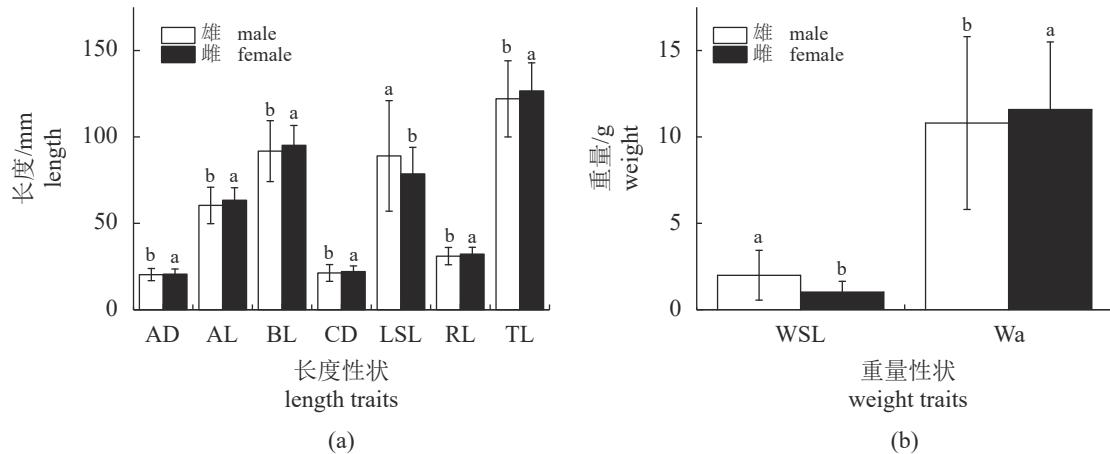


图2 基于独立样本  $t$  检验的性成熟后罗氏沼虾各表型性状在雌雄个体间的差异

(a) 雌雄个体间各长度性状的差异, (b) 雌雄个体间腹部质量和第二步足质量的差异。不同小写字母表示雌雄间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Fig. 2 Difference of phenotypic traits between males and females after sexual maturity of *M. rosenbergii* based on independent sample  $t$  test

(a) differences in length traits between males and females, (b) differences in abdominal weight and second step foot length between males and females. Different lowercase letters mean significant differences between males and females ( $P < 0.05$ )

个性状的变异程度, 一般变异系数越大, 具有的选育潜力也越大, 但是同时所具有的一致性也就越差。在水产动物数量性状中, 发现鱼类体质量的变异系数最大, 达到 20%~60%, 远大于家畜或家禽 (7%~10%)<sup>[35]</sup>。虾类与鱼类相似, 体质量的变异系数都较大, 如 40 日龄中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*) 表型变异系数值在 3 个世代中分别达 59.91%、50.36% 和 58.67%<sup>[36]</sup>, 野生日本沼虾 (*M. nipponense*) 的达到 34.88%~48.47%<sup>[37]</sup>。5 月龄罗氏沼虾的达 38.7%<sup>[18]</sup>。本研究中, 罗氏沼虾在性成熟前后的雌雄群体, 各表型性状的变异系数均会有所变化, 但性成熟前, 雌雄间变异系数差异较小。在性成熟前后, 总体上 BW 的变异系数都较大。本研究在性成熟后增加了 Wa 和 WSL 两个指标, 发现雄性 Wa 和 WSL 的变异系数比雌性大, 这可能是由于雄性群体中有一部分个体较小。因此, 在罗氏沼虾的选育工作中, 个体大小均一性还有待进一步提升。

### 3.2 罗氏沼虾性二态表型

罗氏沼虾具有明显的性二态现象, 在整个生活史中都表现出个体大小的差异, 性成熟后个体差异尤为明显<sup>[38-40]</sup>。有研究表明, 在某些生活史阶段, 雌雄群体在形态上可能不存在差异, 但在某些发育阶段, 雌雄群体存在显著差异<sup>[41-43]</sup>。Primavera 等<sup>[44]</sup>发现, 斑节对虾 (*Penaeus monodon*) 只有在人工饲养的亲虾阶段, 当雌性个体有较大

增重时, 才会出现性二态现象。Chow 等<sup>[45]</sup>建立了凡纳滨对虾雄性和雌性的长度-体质量关系, 发现只有在性成熟后, 雌性才会比雄性大且雌性生长更快, 这在桃红对虾 (*P. duorarum*)<sup>[46]</sup>、日本对虾 (*P. japonicus*)<sup>[47]</sup>、短沟对虾 (*P. semisulcatus*)<sup>[48]</sup>、斑节对虾<sup>[49]</sup>和长毛对虾 (*P. penicillatus*)<sup>[50]</sup>上均有表现。本实验中, 罗氏沼虾在性成熟前, 雌雄群体在体长等 13 个表型性状间不存在差异, 但在性成熟后, 雌雄群体间在 TL、BL、LSL、WSL 等 9 个性状间均存在显著差异。罗氏沼虾性熟后, 雌性个体的 AD、AL、BL、CD、RL、TL 和 Wa 显著大于雄性, 其中雌性头胸甲性状 (CD) 与腹部性状 (AL、Wa 和 AD) 显著大于雄性, 这可能与雌性在性成熟后为提高繁殖能力有关, 这在革胡子鲶雌性个体中也有所体现, 雌性个体的体高、背鳍基前距、腹鳍基前距、腹鳍臀鳍间距显著大于雄性个体, 通过这些局部特征的扩大来增加腹腔容量, 提高个体繁殖力<sup>[27]</sup>。

有研究表明<sup>[40, 51-55]</sup>, 罗氏沼虾中, 占统治地位的雄性个体会抑制相同日龄、地位更低的雄性个体的生长, 同时 Mantelatto 等<sup>[56]</sup>发现, 罗氏沼虾雄性的体质量和甲壳长度大于雌性, 表明体型更大的雄性在交配过程中对雌性以及在性成熟前对其他雄性有抑制作用。本研究中, 罗氏沼虾雄性 LSL 和 WSL 显著大于雌性, 雄性第二步足粗长, 掌节膨大, 第二步足超过体长等特征使其具有更强的侵占领地的能力, 并有利于交配过程中

表 2 逐步回归分析获得的偏回归系数、标准回归系数及显著性检验结果

**Tab. 2 Partial regression coefficients, standardized coefficients and significance resulted from stepwise regression analysis**

发育阶段 stage	性状 trait	未标准化系数 unstandardized coefficients	标准差 SD	标准化系数 standardized coefficients	<i>t</i>	<i>P</i> 值 <i>P</i> value
性成熟前 immatured	常项 constant	-11.11	0.33		-34.21	0
	全长 TL	0.03	0.01	0.12	5.42	0
	体长 BL	0.07	0.01	0.22	6.23	0
	头胸甲宽 CW	0.24	0.04	0.19	5.52	0
	头胸甲高 CD	0.07	0.03	0.06	2.51	0.01
	腹高 AD	0.33	0.05	0.21	6.64	0
	第二步足长 LSL	0.06	0.01	0.24	8.57	0
性成熟前雌 immatured female	常项 constant	-11.28	0.41		-27.81	0
	全长 TL	0.04	0.01	0.20	7.2	0
	体长 BL	0.06	0.01	0.19	4.38	0
	额剑长 RL	-0.07	0.03	-0.08	-2.31	0.02
	腹宽 AW	0.26	0.06	0.16	4.49	0
	腹高 AD	0.51	0.07	0.34	6.87	0
	第二步足长 LSL	0.07	0.01	0.22	5.68	0
性成熟前雄 immatured male	常项 constant	-10.74	0.53		-20.41	0
	体长 BL	0.10	0.02	0.30	5.45	0
	头胸甲宽 CW	0.29	0.06	0.22	4.78	0
	头胸甲高 CD	0.29	0.06	0.24	4.60	0
	腹长 AL	-0.04	0.02	-0.07	-2.2	0.03
	腹高 AD	0.17	0.06	0.10	2.74	0.01
	第二步足长 LSL	0.05	0.01	0.23	6.06	0
性成熟后 matured	常项 constant	-9.78	1.26		-7.78	0
	头胸甲长 CL	0.31	0.07	0.17	4.47	0
	头胸甲高 CD	0.35	0.10	0.14	3.60	0
	第二步足质量 WSL	1.47	0.09	0.23	16.95	0
	腹部质量 Wa	1.24	0.09	0.51	13.45	0
性成熟后雌 matured female	常项 constant	-6.81	0.84		-8.13	0
	头胸甲宽 CW	0.41	0.07	0.15	5.53	0
	头胸甲高 CD	0.24	0.06	0.10	3.78	0
	腹高 AD	-0.12	0.05	-0.05	-2.56	0.01
	第二步足质量 WSL	1.97	0.17	0.14	11.89	0
	腹部质量 Wa	1.53	0.06	0.68	26.22	0
性成熟后雄 matured male	常项 constant	-9.55	1.87		-5.12	0
	第二步足质量 WSL	1.50	0.14	0.26	11	0
	腹部质量 Wa	1.16	0.15	0.45	7.95	0
	头胸甲长 CL	0.55	0.10	0.32	5.63	0

对雌性的控制。另外, 本研究发现体质量超过 61 g 后几乎都是雄虾, 而在性成熟前, 雌雄虾体质量无显著差异。有研究表明, 罗氏沼虾生活史的

某一阶段在同一生长期, 雄虾能达到最大规格, 在体质量 60 g 以前, 雌雄虾的生长率相似, 但在 60 g 以后, 雌虾生长下降, 这可能是因为雌虾卵

表 3 罗氏沼虾性成熟前后途径分析

Tab. 3 Path analysis of *M. rosenbergii* before and after sexual maturity

发育阶段 stage	性状 trait	相关系数 correlation coefficient	直接 作用 direct effect	总和 S	间接作用 indirect effect											
					全长 TL	体长 BL	额剑长 RL	头胸 甲长 CL	头胸 甲宽 CW	头胸 甲高 CD	腹长 AL	腹宽 AW	腹高 AD	第二步 足长 LSL	第二步 足质量 WSL	腹部质量 Wa
性成熟前 immatured	全长 TL	0.81	0.12	0.69		0.17			0.14	0.04		0.16	0.18			
	体长 BL	0.91	0.22	0.69	0.10				0.17	0.05		0.18	0.20			
	头胸甲宽 CW	0.90	0.19	0.71	0.09	0.19				0.05		0.18	0.20			
	头胸甲高 CD	0.81	0.06	0.75	0.08	0.17			0.15			0.16	0.18			
	腹高 AD	0.90	0.21	0.69	0.09	0.19			0.17	0.05			0.20			
	第二步足长 LSL	0.89	0.24	0.65	0.09	0.18			0.16	0.05			0.17			
性成熟前雌 immatured female	全长 TL	0.81	0.20	0.61		0.14	-0.06				0.11	0.25	0.17			
	体长 BL	0.89	0.19	0.71	0.15		-0.07				0.13	0.30	0.19			
	额剑长 RL	0.81	-0.08	0.89	0.14	0.15					0.13	0.29	0.18			
	腹宽 AW	0.86	0.16	0.69	0.13	0.15	-0.07					0.29	0.18			
	腹高 AD	0.92	0.34	0.58	0.15	0.16	-0.07				0.14		0.19			
	第二步足长 LSL	0.89	0.22	0.67	0.15	0.16	-0.07				0.13	0.29				
性成熟前雄 immatured male	体长 BL	0.93	0.30	0.64					0.19	0.22	-0.06	0.09	0.19			
	头胸甲宽 CW	0.92	0.22	0.70		0.27				0.21	-0.06	0.09	0.19			
	头胸甲高 CD	0.93	0.24	0.69		0.27			0.19		-0.06	0.09	0.19			
	腹长 AL	0.78	-0.07	0.85		0.25			0.17	0.19		0.08	0.18			
	腹高 AD	0.87	0.10	0.77		0.26			0.18	0.20	-0.05		0.18			
	第二步足长 LSL	0.89	0.23	0.66		0.25			0.18	0.20	-0.06	0.08				
性成熟后 matured	头胸甲长 CL	0.93	0.17	0.76						0.13				0.15	0.48	
	头胸甲高 CD	0.92	0.14	0.78				0.17						0.14	0.48	
	第二步足质量 WSL	0.74	0.23	0.50				0.11	0.08						0.31	
	腹部质量 Wa	0.94	0.51	0.44				0.17	0.13					0.14		
性成熟后雌 matured female	头胸甲宽 CW	0.97	0.15	0.82						0.09		-0.04	0.12	0.65		
	头胸甲高 CD	0.96	0.10	0.86				0.14				-0.04	0.12	0.65		
	腹高 AD	0.92	-0.05	0.96				0.14	0.09				0.11	0.63		
	第二步足质量 WSL	0.88	0.14	0.74				0.12	0.08			-0.04			0.58	
	腹部质量 Wa	0.99	0.68	0.31				0.14	0.09			-0.04	0.12			
性成熟后雄 matured male	头胸甲长 CL	0.92	0.32	0.61										0.18	0.43	
	第二步足质量 WSL	0.78	0.26	0.52				0.21							0.31	
	腹部质量 Wa	0.93	0.45	0.48				0.30						0.18		

表 4 罗氏沼虾各类群关键形态性状与体质量的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient between the key traits and weight of *M. rosenbergii*

群体 group	自变量个数/个 no. of variables	复相关系数R multiple R	决定系数R <sup>2</sup> determinant coefficient R <sup>2</sup>	校正后决定系数 adjusted R <sup>2</sup>
性成熟前总 immatured total	6	0.95	0.91	0.91
性成熟前雌 immatured female	6	0.95	0.91	0.91
性成熟前雄 immatured male	6	0.97	0.93	0.93
性成熟后总 matured total	4	0.95	0.91	0.91
性成熟后雌 matured female	5	0.99	0.99	0.99
性成熟后雄 matured male	3	0.96	0.92	0.92

表 5 性成熟前后罗氏沼虾各形态性状对体质量的决定系数

Tab. 5 Coefficient of determination of body weight of *M. rosenbergii* before and after sexual maturity

发育阶段 stage	性状 trait	全长 TL	体长 BL	额剑长 RL	头胸甲长 CL	头胸甲宽 CW	头胸甲高 CD	腹长 AL	腹宽 AW	腹高 AD	第二步足长 LSL	第二步足质量 WSL	腹部质量 Wa
性成熟前 immatured	全长 TL	0.02	0.04			0.03	0.01			0.04	0.04		
	体长 BL		0.05			0.07	0.02			0.08	0.09		
	头胸甲宽 CW					0.04	0.02			0.07	0.08		
	头胸甲高 CD						0			0.02	0.02		
	腹高 AD									0.04	0.08		
	第二步足长 LSL											0.06	
性成熟前雌 immatured female	全长 TL	0.04	0.06	-0.02					0.04	-0.03	0.07		
	体长 BL		0.03	-0.03					0.05	0.11	0.07		
	额剑长 RL			0.01					-0.02	-0.05	-0.03		
	腹宽 AW								0.03	0.10	0.06		
	腹高 AD									0.11	0.13		
	第二步足长 LSL											0.05	
性成熟前雄 immatured male	体长 BL		0.09			0.12	0.13	-0.04		0.05	0.11		
	头胸甲宽 CW					0.05	0.09	-0.02		0.04	0.08		
	头胸甲高 CD						0.06	-0.03		0.04	0.09		
	腹长 AL							0.01		-0.01	-0.03		
	腹高 AD									0.01	0.04		
	第二步足长 LSL											0.05	
性成熟后 matured	头胸甲长 CL				0.03		0.05					0.05	0.17
	头胸甲高 CD						0.02					0.04	0.13
	第二步足质量 WSL											0.06	0.15
	腹部质量 Wa												0.26
性成熟后雌 matured female	头胸甲宽 CW					0.02	0.03			-0.01		0.03	0.19
	头胸甲高 CD						0.01			-0.01		0.02	0.12
	腹高 AD									0		-0.01	-0.06
	第二步足质量 WSL											0.02	0.16
	腹部质量 Wa												0.46
性成熟后雄 matured male	第二步足质量 WSL				0.11							0.07	0.16
	腹部质量 Wa				0.27								0.21
	头胸甲长 CL				0.10								

注: 表中对角线上的数据为每个形态性状单独对体质量的决定系数, 对角线以上数据是该数据对应的两个性状共同对体质量的决定系数  
Notes: data on the diagonal line in the table is the coefficient of determination for each morphological character alone, and the data above the diagonal line is the coefficient of determination for the weight of the corresponding two traits

巢发育需要大量营养, 从而影响雌虾体质量、体长的增长, 而雄虾性腺发育不需要大量营养, 故继续保持快速生长<sup>[30]</sup>。

### 3.3 影响罗氏沼虾体质量的关键性状

实验结果表明, 罗氏沼虾性成熟前, BL、CD、AD 和 LSL 是影响其体质量的关键性状, 而性成熟后, Wa 和 WSL 是关键性状, 这与日本沼虾<sup>[37]</sup> 及斑节对虾<sup>[57]</sup> 中的研究结果基本一致, 表明

影响体质量的主要表型性状在近缘物种中是类似的。但性成熟前后这些关键表型性状在雌雄群体中对体质量的直接和间接作用程度是不同的, 建立的多元回归方程有差异, 这与张涛<sup>[58]</sup> 对华贵栉孔扇贝 (*Chlamys nobilis*) 的研究结果类似, 同一物种的不同群体性状间的多元回归及通径分析结果差异较大, 即使是亲本群体与其子代群体也存在较大差异。目前, 关于罗氏沼虾幼虾阶段、亲虾



阶段、不同性别、不同螯色群体的形态性状与体质量间的通径分析已有一些报道<sup>[3, 17-19, 33, 59]</sup>。Lal-rinsanga 等<sup>[41]</sup>研究了罗氏沼虾不同发育阶段和性别对其体长和体质量的影响, 结果表明, 在性成熟前后罗氏沼虾的多元回归方程表现出阶段性差异, 即使是同一家系也呈现出差异化, 这种现象在长肋日月贝 (*Amusium pleuronectes*)<sup>[7]</sup>、罗氏沼虾<sup>[17]</sup>、合浦珠母贝 (*Pinctada fucata*)<sup>[60]</sup>、日本沼虾<sup>[61]</sup>及日本囊对虾 (*Marsipenaes japonicus*)<sup>[62]</sup> 等中均有发现。

决定系数的大小直接反映了各表型性状对体质量的综合作用, 本研究发现单个性状对体质量决定系数的大小顺序与通径系数的大小顺序相同, 这与杨世平等<sup>[17]</sup>和邓平等<sup>[18]</sup>的研究结果一致, 因此, 决定系数和通径系数的大小顺序能较好地反映单个性状对体质量的影响程度。

复相关系数是衡量一个变量与其他多个变量之间线性相关程度的指标, 复相关系数越大, 表明变量之间的线性相关程度越密切。刘小林等<sup>[8]</sup>认为, 在进行通径分析时, 只有当复相关指数或单独决定系数及两两共同决定系数的总  $R^2$  大于或等于 0.85 时, 才表明影响因变量的主要自变量已找到。本研究分析结果显示, 在性成熟前后总  $R^2$  大于 0.85, 说明保留的性状是影响体质量的关键形态性状。从单独性状对体质量的决定系数来看, 罗氏沼虾性成熟前, TL、BL、CW、CD、AD 和 LSL 是选育的重点性状, 而性成熟后, CL、CD、WSL 和 Wa 是选育的重点指标。对于性成熟前的雄性, BL、CW、CD、AL、AD 和 LSL 是关键性状, 雌性的关键性状是 TL、BL、RL、AW、AD 和 LSL; 性成熟后, 雄性的关键性状是 CL、Wa 和 WSL, 雌性则是 CW、CD、AD、WSL 和 Wa。这些结论表明, 即便是相同环境和相同日龄, 影响罗氏沼虾不同性别体质量的关键形态性状仍存在差异。因此在选育工作中, 需要考虑性别和生长发育所处的阶段。

#### 4 总结

本研究对人工养殖的罗氏沼虾性成熟前后两个阶段以及雌雄群体的 BW、BL 等 15 个表型性状进行了相关分析、通径分析、 $t$  检验和决定程度分析。结果表明, 罗氏沼虾性成熟前后体质量的变异系数较大, 表明体质量的选育还有待提升;

相关分析结果显示, 除 DRT、VRT 外, 其他 12 个形态性状与体质量都呈显著正相关, 但在性成熟前后不同阶段及雌雄群体中, 相关系数的大小顺序是不相同的。 $t$  检验结果表明, 罗氏沼虾在性成熟后, 雌雄两个群体表现出明显的性二态现象, 且雄性的 LSL 和 WSL 显著大于雌性; 通径分析表明, 影响体质量的关键形态性状在其性成熟前后不同生长阶段以及雌雄不同群体各有差异, 但性成熟前影响体质量的关键性状为 BL、CW、CD、AD 和 LSL; 性成熟后, Wa 和 WSL 两个表型性状是关键指标, 并分别建立了体质量与关键形态指标的多元回归方程。同时本研究也表明, 大多数性状对体质量的直接作用都小于间接作用, 说明这些关键性状共同影响体质量。决定程度分析表明, 本研究所列的性状是影响体质量的主要性状。本研究结果可为罗氏沼虾选育工作和基础生物学提供参考。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

#### 参考文献 (References):

- [1] 詹瑰然, 罗燕, 邓君明. 不同构型赖氨酸对罗氏沼虾肌肉营养成分的影响[J]. *营养学报*, 2018, 40(4): 406-408. Zhan G R, Luo Y, Deng J M. Effects of different configurations of lysine on nutrients composition in muscle of *Macrobrachium rosenbergii*[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2018, 40(4): 406-408 (in Chinese).
- [2] Miao W M, Ge X P. Freshwater prawn culture in China: an overview[J]. *Aquaculture Asia*, 2002, 7(1): 9-12.
- [3] New M B. Freshwater prawn farming: global status, recent research and a glance at the future[J]. *Aquaculture Research*, 2005, 36(3): 210-230.
- [4] 史建华, 肖雨, 徐琴英. 罗氏沼虾引种复壮技术的研究[J]. *水产科技情报*, 2001, 28(2): 64-67. Shi J H, Xiao Y, Xu Q Y. Studies on the introductinal rejuvenated technique of *Macrobrachium rosenbergii*[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2001, 28(2): 64-67 (in Chinese).
- [5] 陈宗永. 罗氏沼虾抱卵亲虾质量差和数量不足的成因与对策探讨[J]. *广西水产科技*, 2000(4): 26-28. Chen Z Y. Causes and countermeasures of poor quality and insufficient quantity of broodstock of *Macrobrachium rosenbergii*[J]. *Guangxi Aquatic Technology*, 2000(4): 26-28 (in Chinese).

- [6] 杨国梁, 陈雪峰, 王军毅, 等. 罗氏沼虾产业在中国持续增长的经济与社会原因分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2011, 30(5): 450-457.  
Yang G L, Chen X F, Wang J Y, *et al.* Social and economical factors of sustained growth of *Macrobrachium rosenbergii* industry in mainland China[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2011, 30(5): 450-457 (in Chinese).
- [7] 邓正华, 陈明强, 李有宁, 等. 5个地区长肋日月贝形态性状对主要经济性性状的相关性和通径分析[J]. 中国渔业质量与标准, 2018, 8(2): 17-28.  
Deng Z H, Chen M Q, Li Y N, *et al.* Correlation and path analysis between the morphological traits and the main economic traits of *Amusium pleuronectes* from 5 regions[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2018, 8(2): 17-28 (in Chinese).
- [8] 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.  
Liu X L, Wu C G, Zhang Z H, *et al.* Mathematical analysis of effects of morphometric attributes on body weight of *Penaeus vannamei*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 857-862 (in Chinese).
- [9] 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.  
Du J J, Chen Z W. Method of path analysis with SPSS linear regression[J]. Bulletin of Biology, 2010, 45(2): 4-6 (in Chinese).
- [10] 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.  
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 (in Chinese).
- [11] 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.  
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 (in Chinese).
- [12] 王明华, 钟立强, 蔡永祥, 等. 黄颡鱼形态性状对体重的影响效果分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2014, 33(1): 41-46.  
Wang M H, Zhong L Q, Cai Y X, *et al.* Analysis of effects of morphometric traits on body weight of yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2014, 33(1): 41-46 (in Chinese).
- [13] 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, 2018, 48(2): 38-48.  
Hu Y B, Wen H S, Zhang M Z, *et al.* Analysis of effects of morphological traits on body weight of spotted sea bass (*Lateolabrax maculatus*)[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(2): 38-48 (in Chinese).
- [14] 裴杰, 王宏博, 褚敏, 等. 无角牦牛体尺性状对体重影响的通径分析[J]. 生物技术通报, 2018, 34(6): 102-108.  
Pei J, Wang H B, Chu M, *et al.* Analysis of effects of body sizes on the weight of polled yak[J]. Biotechnology Bulletin, 2018, 34(6): 102-108 (in Chinese).
- [15] 李玉虎, 张志怀, 宋芹芹, 等. 凡纳滨对虾新品系体形性状对其体质量的影响[J]. 热带生物学报, 2014, 5(4): 307-311.  
Li Y H, Zhang Z H, Song Q Q, *et al.* Effect of growth traits on body weight of the new breeds of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Tropical Biology, 2014, 5(4): 307-311 (in Chinese).
- [16] 杨磊, 赵晶, 杨鹏, 等. 池养脊尾白虾形态性状对体重的影响效应[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2012, 31(3): 191-196.  
Yang L, Zhao J, Yang P, *et al.* Effect of phenotypic and morphometric traits on body weight of *Exopalaemon carinicauda*[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2012, 31(3): 191-196 (in Chinese).
- [17] 杨世平, 刘慧玲, 江博杰, 等. 不同鳖色罗氏沼虾形态性状对体质量的影响[J]. 热带生物学报, 2014, 5(3): 208-219.  
Yang S P, Liu H L, Jiang B J, *et al.* Effects of morphometric traits on body weight of *Macrobrachium rosenbergii* with different clamp colors[J]. Journal of Tropical Biology, 2014, 5(3): 208-219 (in Chinese).
- [18] 邓平平, 戴习林, 臧维玲, 等. 罗氏沼虾形态性状对体重的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(7): 205-211.  
Deng P P, Dai X L, Zang W L, *et al.* Effects of morphometric attributes on body weight of *Macrobrachium rosenbergii*[J]. Fisheries Science of Jiangsu, 2012, 40(7): 205-211 (in Chinese).

- [19] 孙海峰, 刘国兴, 蒋连玉. 罗氏沼虾的形态性状对体重的相关性分析[J]. *水产养殖*, 2018, 39(7): 48-54.  
Sun H F, Liu G X, Jiang L Y. Mathematical analysis of effects of morphometric attributes on body weight for *Macrobrachium rosenbergii*[J]. *Journal of Aquaculture*, 2018, 39(7): 48-54 (in Chinese).
- [20] 唐琼英, 夏正龙, 蔡缪荧, 等. 罗氏沼虾养殖群体表型性状间的相关性及类群差异分析[J]. *中国水产科学*, 2019, 26(6): 1075-1085.  
Tang Q Y, Xia Z L, Cai M Y, *et al.* Correlation and difference of phenotypic traits among cultured groups of the giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(6): 1075-1085 (in Chinese).
- [21] Fairbairn D J, Blanckenhorn W U, Székely T, *et al.* Sex, size and gender roles: evolutionary studies of sexual size dimorphism[M]. New York: Oxford University Press, 2007, 100-105.
- [22] Gibson R. Sexual selection[M]. Princeton: Matte Andersson Princeton University Press, 1994, 9(10): 592.
- [23] Shine R. Sexual size dimorphism and male combat in snakes[J]. *Oecologia*, 1978, 33(3): 269-277.
- [24] Shine R. Sexual selection and sexual dimorphism in the *Amphibia*[J]. *Copeia*, 1979, 1979(2): 297-306.
- [25] Parker G A. The evolution of sexual size dimorphism in fish[J]. *Journal of Fish Biology*, 1992, 41(SB): 1-20.
- [26] 樊晓丽, 林植华, 丁先龙. 等. 鲶鱼和胡子鲶的两性异形与雌性个体生育力[J]. *生态学报*, 2014, 34(3): 555-563.  
Fan X L, Lin Z H, Ding X L, *et al.* Sexual size dimorphism and female individual fecundity of *Silurus asotus* and *Clarias fuscus*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3): 555-563 (in Chinese).
- [27] Miyajima A, Wada K. Relationships between life history traits and sexual dimorphisms in two varunid crabs, *Hemigrapsus takanoi* Asakura & Watanabe, 2005 and *H. sinensis* Rathbun, 1931 (Brachyura: Varunidae)[J]. *Journal of Crustacean Biology*, 2017, 37(1): 21-28.
- [28] Koshy M. Studies on the sexual dimorphism in the freshwater prawn *Macrobrachium dayanum* (Henderson, 1893) (Decapoda, Caridea) Part I[J]. *Journal of Crustacean Biology*, 1971, 21(1): 72-78.
- [29] Mantel S K, Dudgeon D. Reproduction and sexual dimorphism of the palaemonid shrimp *Macrobrachium hainanense* in Hong Kong streams[J]. *Journal of Crustacean Biology*, 2005, 25(3): 450-459.
- [30] 梁华芳, 廖永岩, 朱春华. 虾蟹类生物学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 165-169.  
Liang H F, Liao Y Y, Zhu C H. Shrimp and crab biology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013: 165-169 (in Chinese).
- [31] 潘家模. 罗氏沼虾养殖新技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994: 1-40.  
Pan J M. New technology for the culture of *Macrobrachium rosenbergii*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1994: 1-40 (in Chinese).
- [32] 潘家模, 孙祖荣. 罗氏沼虾养殖技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1997: 1-27.  
Pan J M, Sun Z R. Technology for the culture of *Macrobrachium rosenbergii* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1997: 1-27 (in Chinese).
- [33] 杨明, 丁福江, 戴习林, 等. 池养罗氏沼虾形态参数之间关系的初步研究[J]. *中国渔业质量与标准*, 2016, 6(4): 52-59.  
Yang M, Ding F J, Dai X L. *et al.* Preliminary study on morphometric relationships of the giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* raised in earthen pond[J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2016, 6(4): 52-59 (in Chinese).
- [34] 吴立峰, 张吕平, 沈琪, 等. 凡纳滨对虾不同家系的形态性状对体重的影响[J]. *海洋湖沼通报*, 2010(2): 37-48.  
Wu L F, Zhang L P, Shen Q, *et al.* The effects of morphometric traits on body weight of different families of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2010(2): 37-48 (in Chinese).
- [35] 曾聪. 团头鲂生长相关性状的形态和遗传分析 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.  
Zeng C. Morphological and genetic analysis of the growth traits of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*)[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012 (in Chinese).
- [36] 董丽君. 对虾耐低温性状遗传参数分析及相关基因筛选 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.  
Dong L J. Evaluation of genetic parameters and screening related genes of cold tolerance traits in shrimp[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018 (in Chinese).

- [37] 黄有辉, 范斌, 李一鸣, 等. 日本沼虾五群体形态性状对体质量的通径分析[J]. 水产学报, 2016, 40(8): 1173-1185.  
Huang Y H, Fan B, Li Y M, *et al.* Path analysis for the correlations between morphological traits and body weight in five *Macrobrachium nipponense* populations[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(8): 1173-1185 (in Chinese).
- [38] New M B, Valenti W C, Tidwell J H, *et al.* Freshwater prawns: biology and farming[M]. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2010, 18-24.
- [39] 王红勇, 姚雪梅. 虾蟹生物学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007, 186-188.  
Wang H Y, Yao X M. Shrimp and crab biology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007, 186-188 (in Chinese).
- [40] Priyadarshi H, Das R, Pavan-Kumar A, *et al.* Silencing and augmentation of IAG hormone transcripts in adult *Macrobrachium rosenbergii* males affects morphotype transformation[J]. Journal of Experimental Biology, 2017, 220(Pt 22): 4101-4108.
- [41] Lalrinsanga P L, Bindu R P, Gunamaya P, *et al.* Length weight relationship and condition factor of giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man, 1879) based on developmental stages, culture stages and sex[J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2012, 12: 917-924.
- [42] Cheng C S, Chen L C. Growth characteristics and relationships among body length, body weight and tail weight of *Penaeus monodon* from a culture environment in Taiwan[J]. *Aquaculture*, 1990, 91(3-4): 253-263.
- [43] Dall W, Hill B J, Rothlisberg P C, *et al.* Advances in marine biology, vol. 27, the biology of the penaeidae [M]. San Diego: Academic Press, 1990, 27: 1-489.
- [44] Primavera J H, Parado-Estepa F D, Lebata J L, *et al.* Morphometric relationship of length and weight of giant tiger prawn *Penaeus monodon* according to life stage, sex and source[J]. *Aquaculture*, 1998, 164(1-4): 67-75.
- [45] Chow S, Sandifer P A. Differences in growth, morphometric traits, and male sexual maturity among Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*, from different commercial hatcheries[J]. *Aquaculture*, 1991, 92: 165-178.
- [46] Kutkuhn J H. Dynamics of a penaeid shrimp population and management implications[J]. Fishery Bulletin, 1962, 65(2): 313-338.
- [47] Choe S. Body increases during molt and molting cycle of the oriental brown shrimp *Penaeus japonicus*[J]. *Marine Biology*, 1971, 9(1): 31-37.
- [48] Thomas M M. Age and growth, length weight relationship and relative condition factor of *Penaeus semisulcatus* De Haan[J]. Indian Journal of Fisheries, 1975, 22(1-2): 133-142.
- [49] Villaluz D K, Villaluz A, Ladrera B, *et al.* Reproduction, larval development, and cultivation of sugpo (*Penaeus monodon* Fabricius)[J]. Philipp Journal Science, 1969, 98(3-4): 205-236.
- [50] Liao I C. Feasibility study for alternative culture species in Taiwan *Penaeus penicillatus*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1988, 19(4): 227-236.
- [51] Aziz D, Nguyen V T, Rahi M L, *et al.* Identification of genes that potentially affect social dominance hierarchy in adult male giant freshwater prawns (*Macrobrachium rosenbergii*)[J]. *Aquaculture*, 2017, 476: 168-184.
- [52] Banu M R, Siraj S S, Christianus A, *et al.* Genetic variation among different morphotypes of the male freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man)[J]. *Aquaculture Reports*, 2015, 1: 15-19.
- [53] Dinh H, Nguyen N H. Genetic inheritance of female and male morphotypes in giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*[J]. *PLoS One*, 2014, 9(2): 0090142.
- [54] Kuris A M, Ra'anna Z, Sagi A, *et al.* Morphotypic differentiation of male Malaysian giant prawns, *Macrobrachium rosenbergii*[J]. *Journal of Crustacean Biology*, 1987, 7(2): 219-237.
- [55] New M B, Valenti W C, Tidwell J H, *et al.* Freshwater prawns: biology and farming[M]. Chichester, UK: Wiley-Blackwell, 2009: 18-345.
- [56] Mantelatto F L, Barbosa L R. Population structure and relative growth of freshwater prawn *Macrobrachium brasiliense*[J]. Acta Limnologica Brasiliensia, 2005, 17(3): 245-255.
- [57] 孙苗苗, 陈百尧, 杨其彬, 等. 斑节对虾形态性状对体质量影响的分析[J]. 海洋科学, 2013, 37(5): 50-54.  
Sun M M, Chen B Y, Yang Q B, *et al.* Effects of morphological characters on body weight of *Penaeus monodon*[J]. Marine Sciences, 2013, 37(5): 50-54 (in Chinese).

- [58] 张涛. 华贵栉孔扇贝养殖群体数量性状及壳色遗传的初步研究 [D]. 汕头: 汕头大学, 2010.  
Zhang T. The preliminary study on genetics of quantitative traits and shell colors in the culture stock of noble scallop *Chlamys nobilis* Reeve[D]. Shantou: Shantou University, 2010 (in Chinese).
- [59] Yang M, Ding F J, Dai X L. Length-length, length-weight relationships and condition factor of the giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man 1879) cultured in earthen pond at high density[J]. *Asian Fisheries Science*, 2016, 29(4): 164-177.
- [60] 王祎哲, 邓正华, 王雨, 等. 合浦珠母贝不同壳色选育系F6数量性状的相关性和通径分析[J]. *中国水产科学*, 2018, 25(5): 988-997.  
Wang Y Z, Deng Z H, Wang Y, *et al.* Correlation and path analyses of quantitative traits in different shell color F6 lines of pearl oyster (*Pinctada fucata*)[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(5): 988-997 (in Chinese).
- [61] 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.  
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 (in Chinese).
- [62] 李鸿鹏, 富裕, 任夙艺, 等. 舟山近海日本囊对虾野生群体与越冬养成群体形态性状对体重和肉重影响的比较[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(5): 1218-1227.  
Li H P, Fu Y, Ren S Y, *et al.* Comparison in the effect of morphological traits on body weight and meat weight of *Marsipenaes japonicus* from wild and overwintered cultivated groups in Zhoushan offshore regions[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, 46(5): 1218-1227 (in Chinese).

## Path analysis of phenotypic traits on body weight of *Macrobrachium rosenbergii* before and after sexual maturity

XING Qianqian<sup>1</sup>, YANG Minmin<sup>1</sup>, CHEN Guozhu<sup>1</sup>, TANG Qiongying<sup>1\*</sup>, XIA Zhenglong<sup>2</sup>,  
CAI Miuying<sup>2</sup>, YANG Jie<sup>2</sup>, DU Houkuan<sup>2</sup>, GAO Quanxin<sup>1</sup>, YI Shaokui<sup>1</sup>, YANG Guoliang<sup>1,2\*</sup>

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Aquatic Resources Conservation and Development,  
Key Laboratory of Aquatic Animal Genetic Breeding and Nutrition, Chinese Academy of Fishery Sciences,

College of Life Science, Huzhou University, Huzhou 313000, China;

2. Jiangsu Shufeng Prawn Breeding Co., Ltd., Gaoyou 225654, China)

**Abstract:** Scientific researchers have done a lot of research about the influence of morphological traits of *Macrobrachium rosenbergii* on body weight of different ages, but the effect of phenotypic traits such as body length before and after sexual maturity on body weight of *M. rosenbergii* has not been studied. This study aimed to explore the relationship among the phenotypic traits of cultured population *M. rosenbergii*, before and after sexual maturity. A total of 1 106 samples were collected from a hatchery (Gaoyou), and 15 traits including body weight, total length, and body length were measured, and correlation and path analyses were used to clarify the influence of morphological traits on body weight. The results showed that the key traits that affect body weight and the constructed key phenotypic traits multiple regression equations were extremely between before and after sexual maturity, and between male and female groups. According to the coefficient of determination of individual traits on body weight before sexual maturity of *M. rosenbergii*, total length, body length, carapace width, carapace depth, abdominal depth and length of second leg should be focused on during selective breeding. Carapace length, carapace depth, the weight of second leg and abdominal weight could be used as key parameters for selective breeding after sexual maturity. Before sexual maturity, body length, carapace width, carapace depth, abdominal length, abdominal depth and length of second leg should be considered during breeding in males while total length, body length, rostrum length, abdominal width, abdominal depth and length of second leg could be considered in females. After sexual maturity, carapace width, carapace depth, abdominal depth, weight of second leg and abdominal weight could be selected in females while considering carapace length, abdominal weight and weight of second leg in males. The present study also indicated that the traits affecting body weight were different between males and females even if in the same growth environment and age, and that males and females had distinct sexual dimorphism. Except for the length of second leg and weight of second leg, in which males were significantly larger than females, and the female's total length, body length, rostrum length, carapace depth, abdominal length, abdominal depth, and abdominal weight were significantly larger than those of males, which may be related to the fertility enhancement of females. Meanwhile, the multiple correlation coefficient between the retained traits and body weight was higher than 0.85, indicating that the key morphological traits affecting the body weight of each population were verified. In conclusion, the sexual maturity status of *M. rosenbergii* and the excellent phenotype of males and females could be considered as key factors during breeding practice. This study can provide a reference for the selective breeding of *M. rosenbergii*.

**Key words:** *Macrobrachium rosenbergii*; morphological traits; before and after sexual maturity; sexual dimorphism; path analysis

**Corresponding authors:** TANG Qiongying. E-mail: tangqy@zjhu.edu.cn;

YANG Guoliang. E-mail: yg10572@163.com

**Funding projects:** National Key Research and Development Program (2018YFD0901300); Jiangsu Province Key Research and Development Program (BE2019352); Special Fund for Modern Agricultural Industrial Technology System of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs (CARS-48)