



中国鲎幼鲎形态性状与体重的通径分析及异速生长研究

李银康^{1,2}, 钟金香³, 鲍虞园³, 应紫薇^{1,2}, 顾晓勇^{1*}

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室,

广东 广州 510300;

2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

3. 广东省海洋发展规划研究中心, 广东 广州 510022)

摘要: 为了探究不同龄期中国鲎幼鲎生长特性, 实验测定了 2~4 龄幼鲎头胸部长 (X_1)、头胸部宽 (X_2)、腹部长 (X_3)、腹部宽 (X_4)、剑尾长 (X_5)、全长 (X_6) 和体重 (Y) 等参数, 运用相关分析和通径分析方法, 探讨形态性状对体重的作用效果。结果显示, 2~4 龄幼鲎体重相关系数最高的形态性状均为头胸部宽 (X_2); 通径分析发现, 头胸部宽 (X_2) 对 2 龄和 3 龄幼鲎体重直接影响最大, 腹部宽 (X_4) 对 4 龄幼鲎体重直接影响最大; 各形态性状对体重决定程度分析与通径分析变化趋势一致。对 2~4 龄幼鲎头胸部宽和体重进行对数处理, 获得异速生长方程回归系数 (b) 为 2.746, 表明此阶段幼鲎体重增长率大于头胸部宽增长率, 处于正生长期。实验表明, 不同龄期阶段中国鲎苗种筛选所依据的形态性状有所差异, 中国鲎幼鲎阶段种质评价应考虑其异速生长规律, 同时也为探究鲎的生长与性状、结构与生理之间的关系奠定基础。

关键词: 中国鲎; 形态性状; 体重; 通径分析; 异速生长

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

中国鲎 (*Tachypleus tridentatus*) 隶属于节肢动物门 (Arthropoda) 肢口纲 (Merostomata) 剑尾目 (Xiphosura) 鲎科 (Tachypleidae), 又称中华鲎、东方鲎或马蹄蟹^[1]。鲎是珍贵的海洋活化石生物, 具有极高的经济价值和科研价值, 鲎试剂是目前国内外检测内毒素应用最广泛的试剂^[2]。中国的中国鲎资源占世界上中国鲎总蕴藏量的 95%, 自 20 世纪 80 年代以来中国鲎资源急剧下降^[3]。2019 年世界自然保护联盟 (IUCN) 宣布中国鲎濒危^[4], 2021 年中国鲎正式被列入《国家重点保护野生动物名录》^[5]。开展鲎人工育苗、选取适宜海区增殖放流幼鲎是恢复中国鲎资源行之有效的措施之一^[6]。有关鲎的研究已经进行了 1 个世纪^[7], 不同

种类鲎有相似生活史, 有关鲎的寿命及确切蜕壳次数等问题仍未得到解决, 中国鲎在不同阶段的生长数据亟待补充^[8-9]。表型形态性状作为生物分类依据, 即是生物种群长期进化形成的固有属性, 也是种群内个体间表现显著性差异的重要载体^[10]。通过分析幼鲎表型形态性状与体重关系不仅可以对增殖放流群体进行种质筛选, 还可为探究鲎的生长与性状、结构与生理之间的关系奠定基础。对中国鲎形态性状和体重相关性研究多集中于体重和头胸部宽两个单一性状的关系^[11-12], 鲍虞园等^[1]对 1 龄中华鲎幼鲎形态性状和体重之间进行了通径分析, 2~4 龄中国鲎幼鲎形态性状和体重之间的多元分析还未见相关研究。

收稿日期: 2021-04-28 修回日期: 2021-08-09

资助项目: 海南省自然科学基金 (322MS154); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2019TS21)

第一作者: 李银康 (照片), 从事鲎生物学研究, E-mail: lykangkang1021@163.com

通信作者: 顾晓勇, 从事水产养殖和种质资源保护研究, E-mail: xyxie@scsfri.ac.cn



异速生长即生物个体大小与生理生态属性间的非线性数量关系^[13], 可用于评估生物群体的生长特性。异速生长是生物界中广泛存在的基本规律之一, 为某种生物部分与整体、部分与部分之间的差异比较提供了重要信息^[14]。鲨异速生长研究多以头胸部宽-体重函数表示, 通过异速生长分析归纳出鲨某一部分随另一部分或整个生物体变化而发生的相应变化, 反映鲨的资源分配策略^[11-12, 15]。本研究运用相关分析和通径分析, 揭示 2~4 龄中国鲨幼鲨形态性状与体重相互关系, 确定影响体重的主要形态性状, 探讨人工养殖条件下幼鲨异速生长规律, 为中国鲨种质评价、苗种筛选及生物学研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验动物

实验在广东省汕头市中国水产科学研究院南海水产研究所中国鲨研究基地进行。2019 年 5 月采集同一批次鲨卵在室内养殖池人工孵化, 孵化的 1 龄中国鲨幼鲨放入室内水泥池培育。池底铺沙(沙层厚度 2~3 cm), 水深 30~40 cm, 盐度 30±2, 水温 10~32 ℃, pH 7.4~7.8。养殖全程不间断增氧, 水体溶解氧≥4.0 mg/L。1 龄幼鲨不投喂饵料, 其依靠自身卵黄提供能量可蜕壳至 2 龄, 达到 2 龄幼鲨投喂初孵丰年虫 (*Artemia salina*) 和长牡蛎 (*Ostrea gigas*) 碎屑, 每日下午足量投饵, 次日以换水方式清除残饵及代谢物。2020 年 6 月随机采集 2~4 龄中国鲨幼鲨各 110 只用于测量分析。

1.2 测量性状与方法

测量前用滤纸吸干壳表面水分, 用电子游标卡尺(精度为 0.01 mm)测量中国鲨幼鲨头胸部长(X_1)、头胸部宽(X_2)、腹部长(X_3)、腹部宽(X_4)、剑尾长(X_5)、全长(X_6), 具体测量位点见图 1, 用电子天平(精度为 0.001 g)称量中国鲨幼鲨体重(Y)。

实验过程中操作人员严格遵守动物实验伦理规范, 并按照中国水产科学研究院南海水产研究所实验动物与福利伦理委员会制定的规章制度执行。

1.3 数据统计

用 Excel 软件对数据进行处理, 得到各性状平均值、标准差和变异系数。数据分析参照 Huo 等^[16]的方法, 使用 SPSS 25.0 软件 Pearson 法对各性状进行表型相关分析、采用逐步回归系数显著的表型形态性状对体重建立多元线性回归方程,

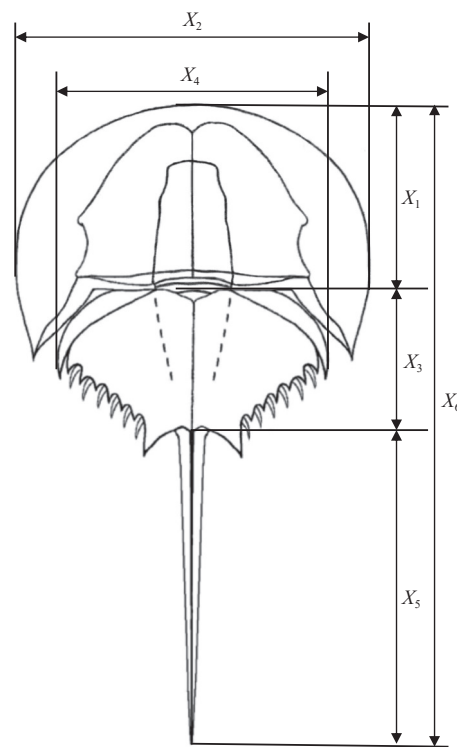


图 1 中国鲨形态性状测量位点

X_1 . 头胸部长; X_2 . 头胸部宽; X_3 . 腹部长; X_4 . 腹部宽; X_5 . 剑尾长; X_6 . 全长。

Fig. 1 Points of morphological measurement in *T. tri-dentatus*

X_1 . cephalothorax length; X_2 . cephalothorax width; X_3 . opisthosoma length; X_4 . opisthosoma width; X_5 . telson length; X_6 . total length.

设置 0.05 为显著水平, 0.01 为极显著水平。多元回归分析得到的偏回归系数即为相应形态性状对体重的通径系数, 结合各形态性状间的相关系数, 可求得间接通径系数、单性状决定系数和两两性状间的共同决定系数。

$$P_{ij} = r_{ij}P_j \quad (1)$$

$$d_i = P_i^2; \quad (2)$$

$$d_{ij} = 2r_{ij}P_iP_j \quad (3)$$

式中, P_i 为性状 i 对体重的通径系数; P_{ij} 为某两个形态性状 i 和 j 对体重的间接通径系数; r_{ij} 为形态性状 i 和 j 之间的 Pearson 相关系数; d_i 为形态性状 i 对体重的决定系数; d_{ij} 为某两个形态性状 i 和 j 对体重的共同决定系数。

多元线性回归方程:

$$Y = \beta_0 + \beta_1Z_1 + \beta_2Z_2 + \cdots + \beta_kZ_k \quad (4)$$

式中, Y 为 β_0 为常数项, β_1 、 β_2 、 $\cdots$ 、 β_k 为偏回归系数; Z_1 、 Z_2 、 $\cdots$ 、 Z_k 为偏回归系数所对应的自变量

异速生长方程构建: 取所测幼鲨头胸部宽和

体重 lg 值做回归分析, 获得线性回归方程 $y=a+bx$, 其中 a 为常数, b 为回归系数, x 为头胸部宽的 lg 值, y 为体重的 lg 值。

2 结果

2.1 中国鲎幼鲎各性状的描述结果

2~4 龄中国鲎幼鲎各性状的统计结果见表 1。由变异系数可知, 各龄期幼鲎体重变异系数均大于形态性状的变异系数, 体重选择潜力大于形态性状。

2.2 各性状间的相关分析

对 2~4 龄中国鲎幼鲎各性状进行表型相关分析结果显示, 大部分性状之间表现为极显著相关 ($P<0.01$), 同时有个别性状间未表现出显著相关 ($P>0.05$)(表 2)。不同龄期幼鲎形态性状与体重的相关系数不同, 除 4 龄幼鲎腹部长 (X_3) 与体重未达到显著相关, 其余各龄期幼鲎形态性状与体重均表现为极显著相关 ($P<0.01$)。其中, 2~4 龄幼鲎形态性状与体重相关系数最高的均为头胸部宽 (X_2), 分别为 0.926、0.885 和 0.825。

2.3 形态性状对体重的通径分析

2~4 龄中国鲎幼鲎通径分析结果显示, 以体重为因变量, 形态性状为自变量, 经通径系数显著性差异检验, 剔除差异不显著表型形态性状, 2、3、4 龄幼鲎均保留 4 个形态性状(表 3)。各龄期幼鲎通径分析中剑尾长 (X_5) 均被剔除, 表明幼鲎剑尾长与体重相关性较低。从直接作用来看, 影响 2 龄和 3 龄幼鲎体重直接作用系数最大的为头胸部宽 (X_2), 影响 4 龄期幼鲎体重直接作用系数

最大的为腹部宽 (X_4); 从间接作用来看, 2 龄期幼鲎全长 (X_6) 通过头胸部宽 (X_2) 对体重的间接影响最大, 3 龄期幼鲎腹部宽 (X_4) 通过头胸部宽 (X_2) 对体重的间接影响最大, 4 龄期幼鲎全长 (X_6) 通过头胸部长 (X_1) 对体重的间接影响最大。随着幼鲎生长形态性状对体重的影响会逐渐发生变化。

2.4 形态性状对体重的决定系数分析

各形态性状对体重的决定系数见表 4, 对角线上为各形态性状对体重的单独决定系数, 对角线以上为 2 个形态性状对体重的共同决定系数。中国鲎养殖群体在不同发育阶段, 对体重起决定作用的形态性状不同, 其中 2 龄和 3 龄幼鲎单参数决定系数最大为头胸部宽 (X_2), 4 龄幼鲎单参数决定系数最大为腹部宽 (X_4)。两两性状共同决定系数中, 2 龄幼鲎头胸部宽 (X_2) 与头胸部长 (X_1) 对体重的共同决定系数最大, 3 龄幼鲎头胸部宽 (X_2) 与腹部长 (X_3) 对体重的共同决定系数最大, 4 龄幼鲎腹部宽 (X_4) 与头胸部长 (X_1) 对体重的共同决定系数最大。

2.5 多元回归方程构建

采用逐步引入剔除法对所测性状数据进行多元回归分析, 按照形态性状对体重作用的显著程度, 2 龄幼鲎依次引入 X_2 、 X_1 、 X_6 和 X_4 , 3 龄幼鲎依次引入 X_2 、 X_4 、 X_6 和 X_3 , 4 龄幼鲎依次引入 X_2 、 X_4 、 X_1 和 X_6 , 建立最优回归方程:

$$Y_{2\text{ 龄}} = -0.061 + 0.103X_2 + 0.039X_1 + 0.013X_6 - 0.018X_4, R^2 = 0.890$$

$$Y_{3\text{ 龄}} = -0.130 + 0.221X_2 - 0.119X_4 + 0.040X_6 + 0.041X_3, R^2 = 0.882$$

表 1 不同龄期幼鲎体重和形态性状的描述性统计

Tab. 1 Descriptive statistics of weight and morphological traits of juvenile <i>T. tridentatus</i> at different ages								
龄期 age	参数 parameter	X_1/cm	X_2/cm	X_3/cm	X_4/cm	X_5/cm	X_6/cm	Y
2	平均值±标准差 mean±SD	0.475±0.034	0.801±0.058	0.356±0.039	0.630±0.046	0.327±0.043	1.159±0.079	0.044±0.008
	变异系数/% coefficient of variation	7.158	7.160	10.955	7.302	13.150	6.816	18.182
3	平均值±标准差 mean±SD	0.657±0.045	1.072±0.063	0.477±0.040	0.849±0.052	0.661±0.088	1.796±0.110	0.097±0.015
	变异系数/% coefficient of variation	6.849	5.877	8.386	6.125	13.313	6.125	15.464
4	平均值±标准差 mean±SD	0.898±0.074	1.493±0.065	0.631±0.033	1.170±0.080	1.173±0.118	2.702±0.154	0.249±0.041
	变异系数/% coefficient of variation	8.218	4.355	5.225	6.812	10.061	5.688	16.641

表 2 不同龄期幼鲿表型性状相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between the phenotypic traits for juvenile *T. tridentatus* at different ages

龄期 age	性状 parameter	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Y
2	X_1	1	0.673 0**	0.278**	0.554**	0.108	0.628**	0.767**
	X_2		1	0.507**	0.722**	0.325**	0.741**	0.926**
	X_3			1	0.310**	0.208	0.722**	0.495**
	X_4				1	0.226**	0.514**	0.618**
	X_5					1	0.691**	0.352**
	X_6						1	0.765**
	Y							1
3	X_1	1	0.356**	-0.026	0.361**	0.139	0.505**	0.320**
	X_2		1	0.412**	0.633**	0.372**	0.592**	0.885**
	X_3			1	0.339**	-0.027	0.336**	0.452**
	X_4				1	0.477**	0.652**	0.407**
	X_5					1	0.843**	0.397**
	X_6						1	0.612**
	Y							1
4	X_1	1	0.610**	-0.023	0.385**	0.355**	0.748**	0.756**
	X_2		1	-0.266**	0.609**	0.394**	0.539**	0.825**
	X_3			1	0.050	-0.374**	-0.084	-0.127
	X_4				1	0.334**	0.452**	0.796**
	X_5					1	0.858**	0.364**
	X_6						1	0.615**
	Y							1

注: **表示差异极显著($P<0.01$), *表示差异显著($P<0.05$); 下同。
Notes: **. very significant difference ($P<0.01$), *. significant difference ($P<0.05$); the same below.

表 3 2~4 龄期中国鲿幼鲿形态性状对体重的通径分析

Tab. 3 The path coefficients of the morphological traits to body weight for 2-4 instar juvenile *T. tridentatus*

龄期 age	性状 parameter	相关系数 relative coefficient	直接作用 direct effect	间接影响 indirect effect				
				Σ	X_2	X_1	X_6	X_4
2	X_2	0.926**	0.777	0.139		0.117	0.101	-0.079
	X_1	0.767**	0.174	0.548	0.523		0.085	-0.060
	X_6	0.765**	0.136	0.629	0.576	0.109		-0.056
	X_4	0.618**	-0.109	0.727	0.561	0.096	0.070	
3				Σ	X_2	X_4	X_6	X_3
	X_2	0.885**	0.924	-0.039		-0.257	0.173	0.045
	X_4	0.407**	-0.406	0.813	0.585		0.191	0.037
	X_6	0.612**	0.293	0.319	0.547	-0.265		0.037
4	X_3	0.452**	0.110	0.341	0.381	-0.138	0.098	
				Σ	X_2	X_4	X_1	X_6
	X_2	0.825**	0.257	0.590		0.312	0.307	-0.075
	X_4	0.796**	0.513	0.288	0.157		0.194	-0.063
	X_1	0.756**	0.504	0.255	0.157	0.198		-0.104
	X_6	0.615**	-0.139	0.762	0.139	0.232	0.377	

表 4 2~4 龄期中国鲎幼鲎形态性状对体重的决定系数

Tab. 4 The determinant coefficients of morphometric traits to the wet weight of 2-4 instar juvenile <i>T. tridentatus</i>						
龄期 age	性状 parameter	X_2	X_1	X_6	X_4	Σ
2	X_2	0.604	0.182	0.157	-0.122	0.874
	X_1		0.030	0.030	-0.021	
	X_6			0.018	-0.015	
	X_4				0.012	
3	X_2	0.854	-0.475	0.321	0.084	0.882
	X_4		0.165	-0.155	-0.030	
	X_6			0.086	0.022	
	X_3				0.012	
4	X_2	0.066	0.161	0.158	-0.039	0.911
	X_4		0.263	0.199	-0.064	
	X_1			0.254	-0.105	
	X_6				0.019	

$$Y_{4\text{ 龄}} = -0.393 + 0.164X_2 + 0.266X_4 + 0.282X_1 - 0.037X_6, R^2 = 0.921$$

3 个方程回归关系均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。各偏回归系数的显著性检验显示, 各形态性状对体重的偏回归系数均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。回归预测结果显示, 估计值与实际值差异不显著 ($P > 0.05$), 表明 3 个回归方程精准反映了幼鲎形态性状与体重的相互关系。

2.6 异速生长方程构建

依据相关性分析 2~4 龄幼鲎形态性状与体重相关系数 (r), 最高的均为头胸部宽 (X_2), 以头胸部宽和体重转换为对数后进行线性回归分析, 得到 2~4 龄幼鲎生长方程 $y = -1.095 + 2.746x$, $R^2 = 0.986$ (式中 y 为体重的 $\lg$ 值, x 为头胸部宽的 $\lg$ 值), 回归系数 $b > 1$, 体重增长率大于头胸部宽的增长率, 2~4 龄幼鲎表现出异速生长, 显著性分析 $P = 0.000$, 表现为极显著差异。

3 讨论

3.1 不同龄期幼鲎形态性状与体重关系

通过选择形态性状可以达到对体重间接选择目的, 研究中国鲎幼鲎形态性状对体重影响, 找出影响体重的关键形态性状, 对中国鲎幼鲎苗种筛选和生长状况评估等具有非常重要的价值^[1]。相关系数分析表明, 2~4 龄中国鲎幼鲎各形态性

状之间、及形态性状与体重之间, 均为头胸部宽与体重相关性最强。仅通过表型相关分析不能全面考察变量间的相互关系, 导致结果具有一定的片面性^[17]。通径分析将相关系数剖分为直接影响和间接影响两部分, 从而全面反映形态性状与体重之间关系^[18]。进行通径分析和决定系数分析时, 当相关系数 R^2 或总决定系数 (Σd) 达到 0.85 时, 表明影响因变量的主要自变量已经被找到^[19]。本研究中国鲎幼鲎 2~4 龄相关系数 (R^2) 分别为 0.874、0.882 和 0.911, 表明已找到影响幼鲎体重的主要形态性状。2~4 龄幼鲎通径分析均剔除剑尾长 (X_5), 可能原因是剑尾结构简单, 其成分绝大部分为几丁质外壳和包裹于中间的少量凝胶状物质^[20], 质量相对较小, 在幼鲎初期生长发育阶段对体重的影响较弱。

刘磊等^[21]发现不同日龄三疣梭子蟹 (*Portunus trituberculatus*) 对体重起决定影响的形态性状并不相同, 80 日龄和 100 日龄主要影响因子为全甲宽, 120 日龄主要影响因子为甲长。本研究显示, 中国鲎幼鲎在不同阶段表现出不同的体型特征, 对体重发生决定性影响的形态性状不同, 2 龄和 3 龄幼鲎头胸部宽对体重的直接影响和决定系数最大, 对 4 龄幼鲎体重影响最大的形态性状则为腹部宽。鲍虞园等^[1]研究得出, 1 龄中国鲎幼鲎体重主要决定因子为头胸部宽, 表明中国鲎幼鲎在 1~3 龄发育阶段头胸部宽可作为生长评

估和苗种筛选的首选形态性状; 4 龄期幼蟹首选形态性状则为腹部宽。幼蟹早期生长发育过程中, 刚孵化出的 1 龄幼蟹只有 2 对鳃书, 随着每次蜕壳在腹部增加 1 对鳃书, 至 4 龄出现完整的 5 对鳃书^[20], 推测鳃书发育程度可能是影响幼蟹体重决定因素发生改变的主要原因。随着幼蟹生长发育, 决定体重的形态性状发生改变, 对其他生长阶段幼蟹形态性状与体重关系, 还有待进一步研究。

3.2 头胸部宽-体重关系

水生生物的异速生长关系通常用体长-体重函数关系式来表达^[22]。蟹相关研究中, 头胸部宽与体重关系作为衡量蟹健康生长的重要指标^[23-24], 通常用头胸部宽作为蟹生长指标, 体重增加量反映蟹摄食情况^[25], 以体重 lg 值为因变量, 头胸部宽 lg 值为自变量进行回归分析, 得到回归系数 (b) 可评价中国蟹的异速生长率, 当 $b>1$ 表示正生长即体重增长率大于头胸部宽度增长率, 反之 $b<1$ 表示负增长即体重增长率小于头胸部宽度增长率, $b=1$ 表示等速生长^[26]。本研究发现 2~4 龄中国蟹 b 值为 2.746, 该生长阶段幼蟹头胸部宽与体重呈异速生长关系。不同生长阶段中国蟹头胸部宽与体重异速生长率存在差异, 邹丽珍^[12] 研究得出, 1~5 龄期中国蟹幼蟹体重与头胸部宽 b 值为 2.567; 陈秀荔等^[11] 分析 6~9 龄和 10~12 龄中国蟹体重与头胸部宽关系, 得到其 b 值分别为 3.018 和 3.173; Lee 等^[23] 测得 6~12 龄中国蟹体重与头胸部宽 b 值为 2.968; 刘伟茹^[27] 发现 13~15 龄中国蟹体重与头胸部宽 b 值为 2.843。因此推测中国蟹体重与头胸部宽的异速生长率随年龄增加而变化, 整体呈现出先升高后降低的规律, 其所代表的中国蟹生长过程中能量与物质资源分配规律有待进一步研究。

蟹自然地理分布狭窄, 现存蟹物种栖息地及地理差异显著, 导致不同蟹物种间存在显著形态差异。但不同种蟹类之间 b 值变化规律相似, Chatterji^[28] 和 Ismail 等^[24] 研究发现, 随着龄期增长巨蟹 (*T. gigas*) 体重与头胸部宽异速生长率升高。不同物种蟹类 b 值存在一定差异, 本研究 2~5 龄中国蟹 b 值为 2.746, Zadeh 等^[29] 测得 1~6 龄巨蟹体重与头胸部宽 b 值为 2.485, 1~7 龄圆尾蟹 (*Carinoscorpius rotundicauda*) b 值为 2.673, 美洲蟹 (*Limulus polyphemus*) 不同龄期体重与头胸部宽异速生长研究未见报道。随着中国蟹资源骤降至濒

危, 通过异速生长分析, 不仅可以归纳反映蟹的资源分配策略, 有助加以保护蟹资源, 本实验通过中国蟹 2~4 龄幼蟹异速生长研究, 探究幼蟹生长与形态性状、结构和生理之间联系, 为下一步开展中国蟹种质资源评价和基础生物学奠定技术与理论基础。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 鲍虞园, 叶国玲, 颜晓勇. 中国蟹人工繁育及 1 龄稚蟹形态性状对体质量的影响[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(4): 77-84.
Bao Y Y, Ye G L, Xie X Y. Effects of morphological characters on body weight of artificially bred the first instars of horseshoe crabs (*Tachypleus tridentatus*)[J]. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(4): 77-84 (in Chinese).
- [2] 颜晓勇, 钟金香, 关杰耀, 等. 基于蟹试剂需求的中国蟹资源保护的迫切性研究[J]. 中国渔业经济, 2021, 39(2): 109-116.
Xie X Y, Zhong J X, Guan J Y, et al. The urgency of horseshoe crab protection in China from the perspective of *Tachypleus* Amebocyte Lysate industry[J]. Chinese Fisheries Economics, 2021, 39(2): 109-116 (in Chinese).
- [3] Liao Y Y, Hsieh H L, Xu S Q, et al. Wisdom of crowds reveals decline of Asian horseshoe crabs in Beibu Gulf, China[J]. *Oryx*, 2019, 53(2): 222-229.
- [4] Laurie K, Chen C P, Cheung, S G, et al. *Tachypleus tridentatus*[EB/OL]. The IUCN Red List of Threatened Species 2019: e. T21309A149768986. [2020-08-22]. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.20191.RLTS.T21309A149768986.en>.
- [5] 国家林业和草原局. 国家重点野生动物名录 [N]. 2021-02-05.
National Forestry and Grassland Administration. List of national key wildlife[N]. 2021-02-05 (in Chinese).
- [6] Hsieh H L, Chen C P. Current status of *Tachypleus tridentatus* in Taiwan for red list assessment[M]//Carmichael R, Botton M, Shin P, et al. Changing Global Perspectives on Horseshoe Crab Biology, Conservation and Management. Cham: Springer, 2015: 383-396.
- [7] Nossa C W, Havlak P, Yue J X, et al. Joint assembly and genetic mapping of the Atlantic horseshoe crab genome

- reveals ancient whole genome duplication[J]. *GigaScience*, 2014, 3(1): 9.
- [8] Carmichael R H, Rutecki D, Valiela I. Abundance and population structure of the Atlantic horseshoe crab *Limulus polyphemus* in Pleasant Bay, Cape Cod[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 246: 225-239.
- [9] Tanacredi J T. Horseshoe crabs imperiled?[M]//Tanacredi J T. *Limulus in the Limelight*. Boston, MA: Springer, 2002: 7-16.
- [10] 张嘉丽, 王庆恒, 邓岳文, 等. 斧文蛤 (*Meretrix Lamarchii*) 形态性状对体质量的影响效果分析[J]. *渔业科学进展*, 2014, 35(6): 110-113.
- Zhang J L, Wang Q H, Deng Y W, *et al.* Effects of morphological traits on the weight of *Meretrix lamarchii*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(6): 110-113 (in Chinese).
- [11] 陈秀荔, 罗玲娟, 彭敏, 等. 圆尾鲎与中国鲎异速生长研究[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(1): 238-344.
- Chen X L, Luo L J, Peng M, *et al.* Allometric growth of *Carcinoscorpius rotundicauda* and *Tachypleus tridentatus*[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(1): 238-344 (in Chinese).
- [12] 邹丽珍. 中国鲎异速生长方程的建立及校验[J]. *福建农业学报*, 2018, 33(8): 787-793.
- Zou L Z. Establishment and validation of allometric growth models for *Tachypleus tridentatus*[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 33(8): 787-793 (in Chinese).
- [13] 贺纪正, 曹鹏, 郑袁明. 代谢异速生长理论及其在微生物生态学领域的应用[J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2645-2655.
- He J Z, Cao P, Zheng Y M. Metabolic scaling theory and its application in microbial ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(9): 2645-2655 (in Chinese).
- [14] 李春萍, 李刚, 肖春旺. 异速生长关系在陆地生态系统生物量估测中的应用[J]. *世界科技研究与发展*, 2007, 29(2): 51-57.
- Li C P, Li G, Xiao C W. The application of allometric relationships in biomass estimation in terrestrial ecosystems[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2007, 29(2): 51-57 (in Chinese).
- [15] 许友卿, 刘伟茹, 陈秀荔, 等. 10龄及14龄中国鲎和圆尾鲎头胸甲宽度与体重的回归分析[J]. *水生生态学杂志*, 2014, 35(3): 70-77.
- Xu Y Q, Liu W R, Chen X L, *et al.* Regression analysis between prosomal width and body weight of 10th and 14th instar stages of *Tachypleus tridentatus* and *Carcinoscorpius rotundicauda*[J]. *Journal of Hydroecology*, 2014, 35(3): 70-77 (in Chinese).
- [16] Huo Z M, Yan X W, Zhao L Q, *et al.* Effects of shell morphological traits on the weight traits of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 251-256.
- [17] 李莉, 王雪, 菅玉霞, 等. 不同月龄大泷六线鱼形态性状与体质量的相关性及通径分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(1): 58-66.
- Li L, Wang X, Jian Y X, *et al.* Correlation and path analysis between morphological traits and body mass of *Hexagrammos otakii* at different months of age[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(1): 58-66 (in Chinese).
- [18] 薛宝宝, 李浩, 牛东红, 等. 不同月龄缢蛏新品种数量性状的相关与通径分析[J]. *水产学报*, 2018, 42(6): 941-949.
- Xue B B, Li H, Niu D H, *et al.* Correlation and path analysis of quantitative traits of new variety of *Sinonovacula constricta* at different months of age[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(6): 941-949 (in Chinese).
- [19] 李松岗. 实用生物统计 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2002: 1-256.
- Li S G. *Practical Biostatistics*[M]. Beijing: Peking University Press, 2002: 1-256 (in Chinese).
- [20] 洪水根. 中国鲎生物学研究 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2011: 16-20.
- Hong S G. *Biology of horseshoe crabs, Tachypleus tridentatus*[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2011: 16-20 (in Chinese).
- [21] 刘磊, 李健, 高保全, 等. 三疣梭子蟹不同日龄生长性状相关性及其对体重的影响[J]. *水产学报*, 2009, 33(6): 964-971.
- Liu L, Li J, Gao B Q, *et al.* Correlation of growth traits of *Portunus trituberculatus* at the different ages and its impact on body weight[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2009, 33(6): 964-971 (in Chinese).
- [22] 李忠炉. 黄渤海小黄鱼、大头鳕和黄鲖鰾种群生物学特征的年际变化 [D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2011.
- Li Z L. *Interannual changes in biological characteristics*

- of small yellow croaker *Larimichthys polyactis*, Pacific cod *Gadus macrocephalus* and anglerfish *Lophius litulon* in the Bohai sea and Yellow Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology of the Chinese Academy of Sciences, 2011 (in Chinese).
- [23] Lee C N, Morton B. Experimentally derived estimates of growth by juvenile *Tachypleus tridentatus* and *Carcinoscorpius rotundicauda* (Xiphosura) from nursery beaches in Hong Kong[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 318(1): 39-49.
- [24] Ismail N, Jolly J J, Dzulkiply S K, *et al.* Allometric variation of horseshoe crab (*Tachypleus gigas*) populations collected from Chendor and Cherating, Pahang, peninsular Malaysia[J]. *Journal of Sustainability Science and Management*, 2012, 7(2): 164-169.
- [25] Schreibman M P, Zarnoch C B. Aquaculture methods and early growth of juvenile horseshoe crabs (*Limulus polyphemus*)[M]//Tanacredi J T, Botton M L, Smith D. Biology and conservation of horseshoe crabs. Boston, MA: Springer, 2009: 501-511.
- [26] Chee H Y. Morphometric variations and population size of horseshoe crab (*T. gigas*) in Teluk Senangin, Perak, Malaysia[J]. *American Journal of Emergency Medicine*, 2015, 3(4): 379.
- [27] 刘伟茹. 广西北部湾地区圆尾鲎与中国鲎生物学研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- Liu W R. Biological study of *Carcinoscorpius rotundicauda* and *Tachypleus tridentatus* in coastal areas of Beibu Gulf in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2014 (in Chinese).
- [28] Chatterji A K. Studies on the biology of some carps[D]. Aligarh, India: Aligarh Muslim University, 1976.
- [29] Zadeh S S, Christianus A, Saad C R, *et al.* Comparisons in prosomal width and body weight among early instar stages of Malaysian horseshoe crabs, *Carcinoscorpius rotundicauda* and *Tachypleus gigas* in the laboratory[M]//Tanacredi J, Botton M, Smith D. Biology and Conservation of Horseshoe Crabs. Boston, MA: Springer, 2009: 267-274.

Path analysis and allometric growth of morphological characters and body mass of juvenile *Tachypleus tridentatus*

LI Yinkang^{1,2}, ZHONG Jinxiang³, BAO Yuyuan³, YING Ziwei^{1,2}, XIE Xiaoyong^{1*}

(1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

2. College of Fisheries and Life, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Guangdong Ocean Development Planning Research Center, Guangzhou 510022, China)

Abstract: The blood of the horseshoe crab, an ancient marine arthropod, is widely used in the production of tachypleus amebocyte lysate (TAL) for medical testing. The number of horseshoe crab resources in China has declined significantly in the last 30 years. The study of the relationship between morphological traits and body mass of *Tachypleus tridentatus* and the analysis of anisotropic growth will not only help to understand the growth characteristics of juvenile *T. tridentatus*, but also reflect the resource allocation strategy and help to conserve horseshoe crab resources. In this study, the cephalothorax length (X_1), cephalothorax width (X_2), opisthosoma length (X_3), opisthosoma width (X_4), telson length (X_5), total length (X_6) and body mass (Y) of 2-4 instars juvenile *T. tridentatus* were measured, correlation analysis and path analysis were used to explore the effect of morphological traits on body weight. The results showed that the morphological traits with the highest correlation coefficient (r) of body weight of 2-4 instars juvenile *T. tridentatus* were cephalothorax width (X_2). Path analysis showed that the cephalothorax width (X_2) had the most immediate impact on the body weight of 2 and 3 instars juvenile *T. tridentatus*, and the opisthosoma width (X_4) had the greatest direct impact on the body weight of 4 instars juvenile *T. tridentatus*. The determination analysis showed that the cephalothorax width (X_2) had the largest determination coefficient for the body weight of 2 and 3 instars juvenile *T. tridentatus*, and the opisthosoma width (X_4) had the largest determination coefficient for the body mass of 4 instars juvenile *T. tridentatus*. The determination analysis was consistent with the path analysis. The cephalothorax width and body weight of 2-4 instars *T. tridentatus* are processed logarithmically. The allometric growth equation was obtained: $y = -1.095 + 2.746x$, and the regression coefficient is $2.746 (b > 1)$. This shows that the growth rate of juvenile horseshoe crab body mass is greater than the growth rate of cephalothorax width at this stage, and it is at the stage of positive growth. The present study shows that the morphological traits of seedling screening of *T. tridentatus* at different age stages are distinct, and the evaluation of the germplasm of the juvenile *T. tridentatus* should take into account its allometric growth pattern. The current study also provides a basis for exploring the relationship between growth and traits, structure and physiology of *T. tridentatus*.

Key words: *Tachypleus tridentatus*; morphological character; body mass; path analysis; allometric growth

Corresponding author: XIE Xiaoyong. E-mail: xyxie@scsfri.ac.cn

Funding projects: Natural Science Foundation of Hainan Province (322MS154); Special Fund for Basic Scientific Research Business Expenses of Central Public Welfare Research Institutes of South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences (2019TS21)