



基于两段式模型研究口虾蛄体长-体质量关系及估算初次性成熟体长

徐海龙^{1,2,3*}, 薛薇^{1,4}, 谷德贤⁵, 杨蕊^{1,4}, 于小涵¹

(1. 天津农学院水产学院, 天津 300384;

2. 天津市水产生态及养殖重点实验室, 天津 300384;

3. 天津农学院, 水产生态与养殖国家级实验教学示范中心, 天津 300384;

4. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

5. 天津市水产研究所, 天津 300221)

摘要: 为获取口虾蛄初次性成熟体长信息, 实验以 2018 年 4—8 月渤海湾逐月拖网资源科学调查捕获的口虾蛄为对象, 分别建立口虾蛄体长-体质量的幂函数关系式和两段式关系式, 并基于两段式关系模型进行初次性成熟体长估算。结果显示, 两段式关系模型较幂函数关系模型更适于表达口虾蛄的体长-体质量关系, 基于 Huxley's 传统的幂函数关系模型, 口虾蛄存在明显的两个体长-体质量关系组, 基于两段式体长-体质量关系模型估算, 得到口虾蛄总体、雌性和雄性的初次性成熟体长分别为 10.99、11.01 和 10.85 cm。研究表明, 口虾蛄性成熟阶段, 更多的能量被分配用于性成熟过程, 更少的能量用于身体的生长, 该现象在雌性口虾蛄群体更为明显。

关键词: 口虾蛄; 体长-体质量关系; 两段式模型; 初次性成熟体长

中图分类号: S 932

文献标志码: A

初次性成熟是渔业资源生物在其整个生活史中重要的生长转折之一, 是研究资源种群结构的重要指标, 也是研究资源群体种群变动和科学利用资源的重要内容之一。开展初次性成熟研究对了解种群中的个体生长、繁殖、性腺发育程度, 以及生态对策^[1]、资源开发、种群管理^[2]等均具有重要意义。

初次性成熟体长作为表示资源生物初次性成熟的重要指标之一, 已有诸多的研究报道。因种类、性成熟过程、获得的信息特点等差异, 学者们开展研究时所采用的方法也有所不同。目前, 研究初次性成熟的方法主要包括以性腺及受精卵

发育为基础的直接方法^[3-4]和基于形态特征进行统计分析的间接方法^[5]。采用直接方法, 可以清楚地观察到性腺的发育情况, 但受研究人员对性腺发育状况判别标准掌握尺度的差异和样本容量大小的影响, 研究结果具有较大随机性。张海明^[5]认为应用统计量能够揭示鱼类性成熟的体长特征, 使用含有 50% 的个体已初次性成熟体长 (L_{50}) 表示初次性成熟是较为理想的方式, 且统计学方法可有效简化研究过程, 具有数据获取简单, 操作方便等特点。Fontoura 等^[6]认为繁殖行为能够明显改变生物体能量分配及消耗形式, 并且在身体生长过程中得到直接体现, 并基于生长模式的变

收稿日期: 2020-07-09 修回日期: 2021-04-09

资助项目: 农业农村部物种资源保护(渔业)项目(171821301354051015)

通信作者: 徐海龙(照片), 从事渔业资源生物学及渔业资源评估研究, E-mail: Beiji80@163.com



化与初次性成熟体长有关^[7]的研究成果提出两段式体长-体质量关系, 进而进行初次性成熟体长(L_{50})估算。

口虾蛄 (*Oratosquilla oratoria*) 是我国沿海渔业重要的捕捞对象之一^[8], 隶属于节肢动物门 (Arthropoda) 软甲纲 (Malacostraca) 十足目 (Stomatopoda) 虾蛄科 (Squillidae) 口虾蛄属 (*Oratosquilla*)。在我国近海, 主要分布于 5~60 m 水深海域^[9], 最大年龄可达 4 龄^[8]。研究表明, 口虾蛄 1 龄即可性成熟^[10], 繁殖群体以 2 龄和 3 龄个体为主^[11], 繁殖期从 5 月初到 8 月初^[12]。有资料显示, 我国近海口虾蛄资源已呈明显的小型化趋势^[13-14], 资源利用正面临逐渐增加的压力, 为提供科学地改善口虾蛄渔业管理策略依据, 本实验通过建立口虾蛄两段式体长-体质量关系进行初次性成熟体长估算, 以丰富口虾蛄资源生物学信息, 为其渔业资源评估、开发及开展人工繁殖提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 数据来源

实验用口虾蛄为 2018 年 4—8 月逐月在渤海湾单船底拖网渔业资源科学调查采集的样品。调查船主机功率 176 kW, 总吨位 64 t, 平均拖速 2.5 kn, 拖网时间 1 h。样品在低温状态下运回实验室。性别鉴定后进行头胸甲长、Kubo 体长、体质量等形态性状测量^[15], 长度精确到 0.01 cm, 体质量精确到 0.01 g。

1.2 研究方法

分别建立口虾蛄总体、雌性、雄性的体长-体质量关系 Huxley's 传统的幂函数关系模型^[16], 通过最小化损失函数进行参数估计^[17], 为减小源于数据异方差性和参数估算过程中对数转换引起的偏差, 使用比例残差平方替代残差平方作为损失函数形式。基于体长-体质量幂函数关系结果, 绘制比例残差随体长的分布图。幂函数关系、损失函数和比例残差公式:

$$W = aL^b$$

$$L(y, \hat{y}) = \omega(\theta) \cdot P_r^2$$

$$P_r = \frac{W_{\text{obs}} - W_{\text{pre}}}{W_{\text{pre}}}$$

式中, W 为体质量 (g), L 为体长 (cm), a 为生长条件因子, b 为异速生长系数, $L(y, \hat{y})$ 为损失函数,

$\omega(\theta)$ 为体质量测量值的权重, P_r 为比例残差, W_{obs} 为体质量的测量值, W_{pre} 为体质量的预测值。

分别建立口虾蛄总体、雌性、雄性的两段式体长-体质量关系模型, 关系式是基于比例残差随体长分布模式改变而构建的^[6, 18], 模式改变前后分别建立体长-体质量的幂函数关系式, 并引入中断因子, 中断因子取值范围从 0 到 1, 作为两部分函数的控制开关。同样使用比例残差平方替代残差平方作为损失函数形式, 通过最小化损失函数进行参数估算。基于体长-体质量两段式关系结果, 绘制比例残差随体长的分布图。两段式关系式:

$$W = (a_1 \cdot L^{b_1}) \cdot S_w + (a_2 \cdot L^{b_2}) \cdot (1 - S_w)$$

$$S_w = \left[1 + e^{(T_x \cdot (L - SCL))} \right]^{-1}$$

式中, W 为体质量 (g), L 为体长 (cm), a_1 、 a_2 分别为第一段和第二段幂函数关系式的生长条件因子, b_1 、 b_2 分别为第一段和第二段幂函数关系式的异速生长系数, S_w 为中断因子, T_x 是体长-体质量关系从第一段到第二段的转变速率, SCL 为转变体长 (即 L_{50})。

为计算两段式体长-体质量关系中模型参数的标准误, 对样本采取无放回取样, 取样量为原始样本量的一半, 进行体长-体质量两段式关系式参数估算, 重复 30 次, 30 次估计值的标准差作为参数的标准误。参数估算采用非线性 GRG 法^[6], 估算过程中, 体质量测量值的权重 $\omega(\theta)$ 取 1, 转变速率 T_x 的初始值取 1, 转变体长 SCL 的初始值基于比例残差随体长的分布图确定, 转变速率 T_x 和转变体长 SCL 的初始赋值不影响参数 (a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 S_w 、 T_x 和 SCL) 的最终估算结果。

口虾蛄体长-体质量关系的性别差异显著性使用 F 检验, 所有参数的估算和数据分析使用 R 3.6.2 软件完成。

2 结果

2018 年 4—8 月逐月在渤海湾单船底拖网采集的口虾蛄样品共计 648 尾, 其中雌性 379 尾, 雄性 269 尾。体长 4.02~14.06 cm, 体质量 0.86~42.79 g; 其中雌性体长 4.02~13.89 cm, 体质量 0.86~35.85 g; 雄性体长 4.18~14.06 cm, 体质量 1.63~42.79 g。

基于 Huxley's 传统的体长-体质量关系模型, 口虾蛄体长-体质量间呈现较好的幂函数关系 ($R^2 >$

0.982), 无论雌性还是雄性, 均呈负的异速生长(表 1)。经 F 检验, 口虾蛄体长-体质量幂函数关系模型在雌雄群体间无显著差异 ($P = 0.1696 > 0.05$)。比例残差图(图 1)清晰地显示, 比例残差呈现两个相对独立的点集合, 说明存在明显的两个体长-体质量关系组。虽然比例残差分布格式没

有出现明显的中断, 但当体长小于约 10 cm 时, 比例残差以负值为主, 体长大于 10.00 cm 时, 比例残差以正值为主, 因此转变体长的初始值设定为 10.00 cm。

使用两段式模型拟合口虾蛄体长-体质量关系, 不仅决定系数 R^2 增加 ($R^2 > 0.985$), 而且比例残差

表 1 基于 Huxley's 传统幂函数的口虾蛄体长-体质量关系

Tab. 1 Descriptive statistics and length-weight relationships for *O. oratoria* based on Huxley's traditional model

	参数 a	参数 b	参数 a 95% 置信区间 a CL95%	参数 b 95% 置信区间 b CL95%	比例残差平方和 proportional residuals sum of squares	决定系数 R^2
总体 total	0.0174	2.9258	0.0172~0.0175	2.9216~2.9299	6.7415	0.9844
雌性 female	0.0172	2.9274	0.0170~0.0174	2.9220~2.9328	4.0975	0.9853
雄性 male	0.0180	2.9123	0.0178~0.0182	2.9059~2.9187	2.6114	0.9829

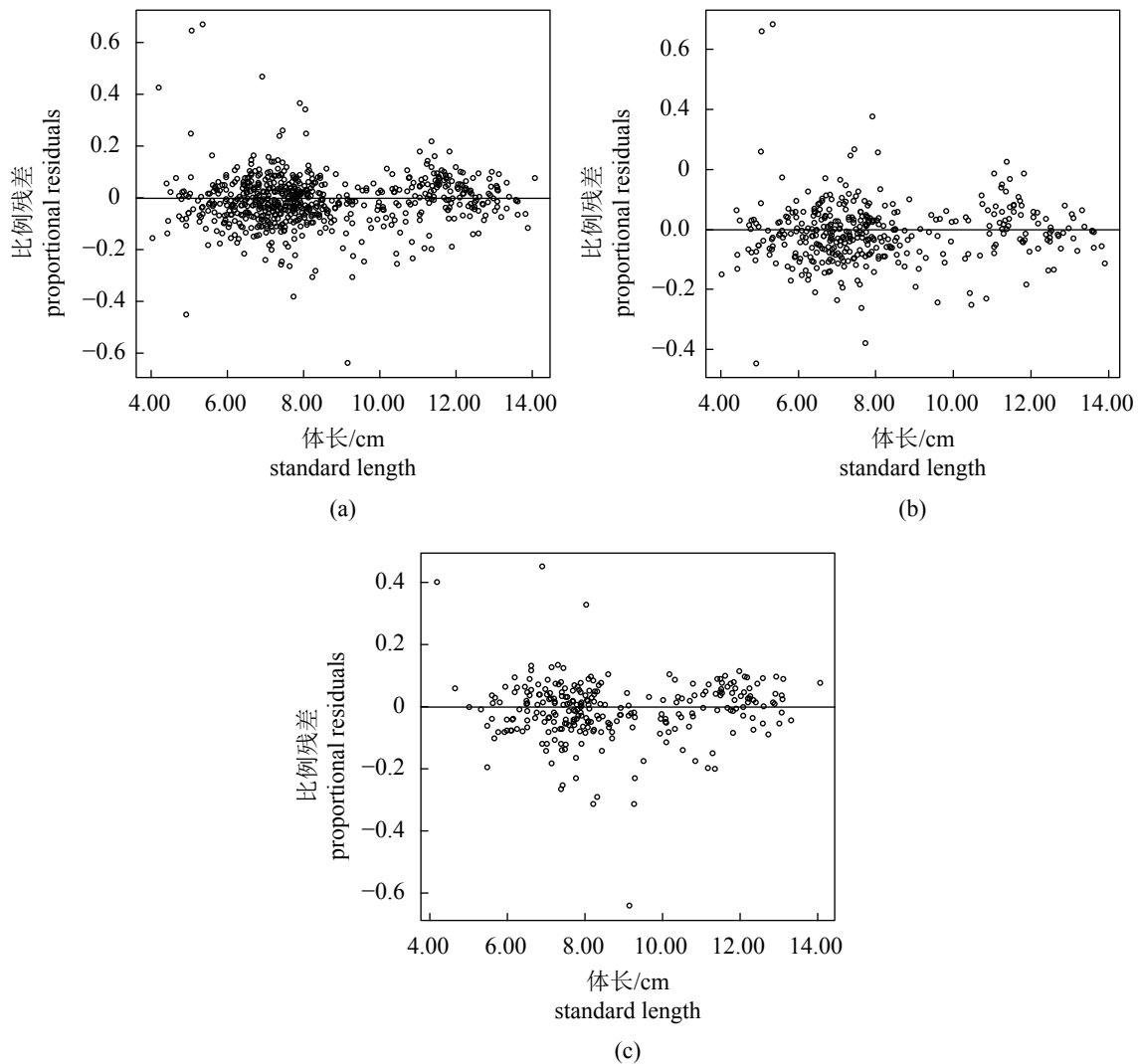


图 1 基于 Huxley's 传统幂函数的比例残差

(a) 总体样本, (b) 雌性样本, (c) 雄性样本

Fig. 1 Proportional residuals for *O. oratoria* based on Huxley's traditional model

(a) total sample, (b) female sample, (c) male sample

平方和也有所减小(表2),比例残差在零刻度线两侧分布更均匀(图2)。经 F 检验,雌雄口虾蛄体长-体质量两段式关系存在极显著差异($P = 6.01 \times 10^{-6} < 0.01$)。基于两段式关系模型得到的总体、雌性和雄性的转变体长(即初次性成熟体长, L_{50})分别为10.99、11.01和10.85 cm,无论体长大于

还是小于转变体长,口虾蛄都呈现负的异速生长,但当体长大于转变体长时,参数 b_2 值均较体长小于转变体长时的异速生长参数 b_1 小。

以初次性成熟体长(L_{50})为分界点进行两种体长-体质量模型下的比例残差分布的统计分析,对于总体、雌性和雄性样本,无论是体长大于初

表2 基于两段式的口虾蛄体长-体质量关系

Tab. 2 Descriptive statistics and length-weight relationships for *O. oratoria* based on polyphasic model

	参数 a_1	参数 b_1	参数 a_2	参数 b_2	转变速率 T_x	转变体长/cm SCL	比例残差平方和 sum of squares	决定系数 R^2
总体 total	0.0202±0.0030	2.8474±0.0730	0.0461±0.0224	2.5440±0.1996	6.3690±4.8031	10.99±0.3875	6.5299	0.9856
雌性 femal	0.0194±0.0038	2.8647±0.0997	0.0705±0.1503	2.3706±0.5804	11.7260±5.1606	11.01±0.6531	3.9491	0.9872
雄性 male	0.0242±0.0061	2.7617±0.0775	0.0272±0.0132	2.7608±0.1789	2.3501±0.2563	10.85±0.6226	2.4675	0.9847

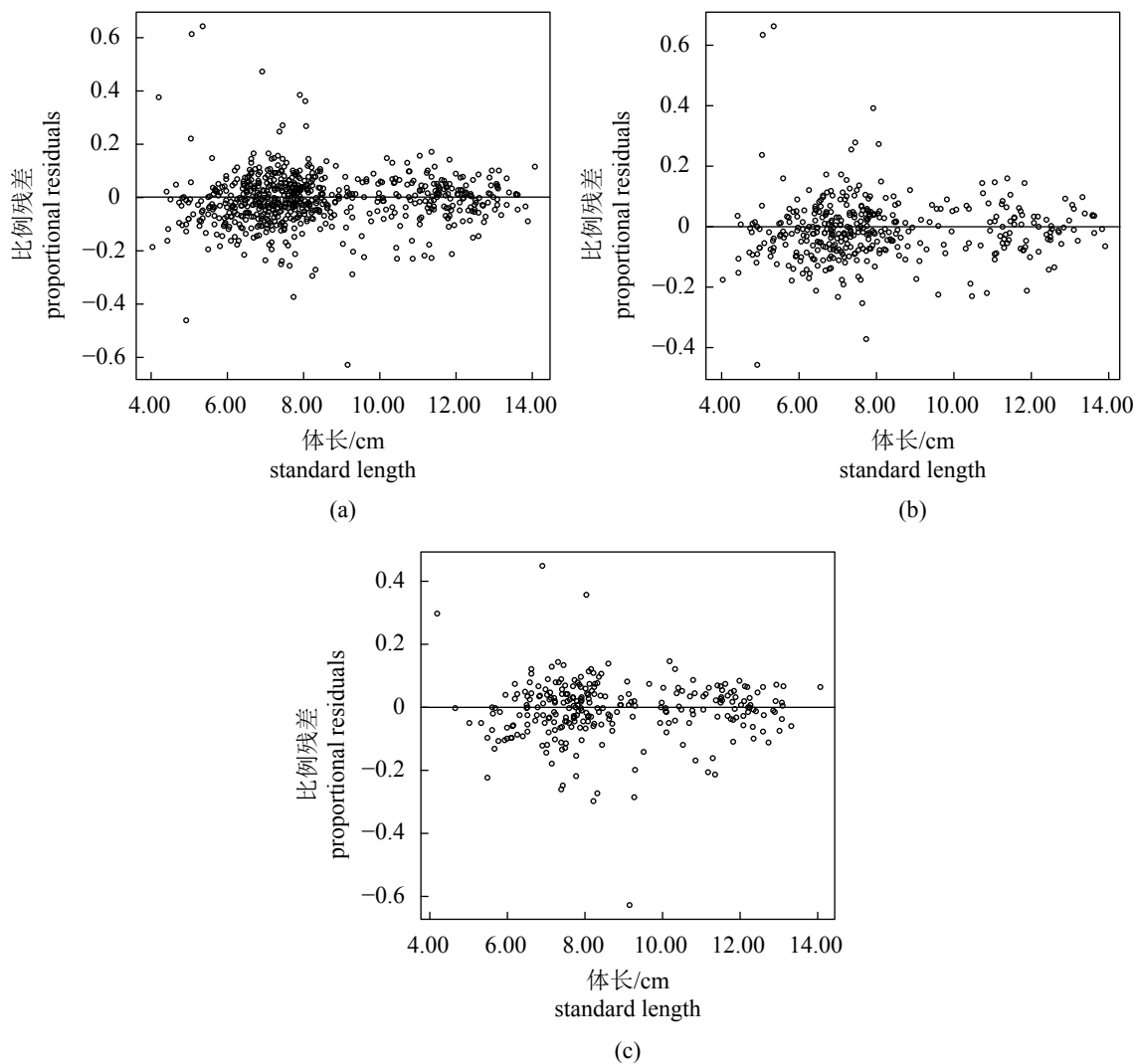


图2 基于两段式体长-体质量关系的比例残差

(a) 总体样本, (b) 雌性样本, (c) 雄性样本

Fig. 2 Proportional residuals for *O. oratoria* based on polyphasic model

(a) total sample, (b) female sample, (c) male sample

初次性成熟体长的群体还是小于初次性成熟体长的群体, 基于两段式体长-体质量关系得到的比例残差分布, 均较基于 Huxley's 传统幂函数体长-体质量

关系得到的比例残差分布更为均匀(表 3), 表现为占比高于 50% 的比例残差数量减少, 占比低于 50% 的比例残差数量增加。

表 3 基于两种体长-体质量关系的比例残差的分布统计

Tab. 3 Statistics of proportional residuals for two kinds of length-weight relationships

体长-体质量关系 length-weight relationship	样本 sample	Kubo体长不大于初次性成熟体长 Kubo-BL \leq L ₅₀		Kubo体长大于初次性成熟体长 Kubo-BL $>$ L ₅₀	
		比例残差大于0% $P_r > 0$	比例残差不大于0% $P_r \leq 0$	比例残差大于0% $P_r > 0$	比例残差不大于0% $P_r \leq 0$
Huxley's传统幂函数 Huxley's traditional model	总体 total	41.43	58.57	60.47	39.53
	雌性 femal	40.65	59.35	53.62	46.38
	雄性 male	44.98	55.02	68.33	31.67
两段式体长-体质量关系 polyphasic model	总体 total	43.74	56.26	52.71	47.29
	雌性 femal	41.94	58.06	46.38	53.62
	雄性 male	46.89	53.11	53.33	46.67

3 讨论

体长-体质量关系是分析渔业资源群体特征的重要工具, 可以描述异速生长的幂函数模型^[16]被提出并被广泛应用于渔业资源生物生长的研究。基于该关系式, 不仅可以进行个体体质量的估算, 了解资源生长环境^[8, 19], 还有助于掌握生物在生长和繁殖过程中的能量分配信息^[20]。尽管该模型被广泛应用, 但事实上, 在资源生物的生长过程中, 身体各维度的相对生长并不是一成不变的^[21], 而幂函数体长-体质量关系模型中假定异速生长系数恒定不变, 致使在使用该模型描述研究对象的相对生长时存在局限^[7, 22]。有研究指出, 在利用模型进行体长或体质量估算时, 如果使用的统计模型不恰当, 则会导致估算结果出现明显的错误^[23]。两段式体长-体质量关系通过引入一个经验的 Logistic 函数作为中断因子 (S_w) 将 2 个独立的传统幂函数体长-体质量关系融合^[7], 既保留了传统的幂函数体长-体质量关系中的生物学法则, 又考虑到了研究对象个体发育过程中异速生长变动的存在, 被用于研究渔业资源生物的体长-体质量关系, 得到了较传统幂函数模型更好的结果^[6-7]。本实验中, 使用两段式模型进行口虾蛄体长-体质量关系拟合, 决定系数和比例残差平方和均较传统幂函数模型得到的结果有所改善。另外, 进行体长-体质量关系拟合时, 如果使用的模型合适, 则比例残差应该是沿体长平衡分布在比例残差零刻度线两侧, 若比例残差呈现出其他任何模式的分布都说明使用的模型不能完全胜任对研究数据的描述^[6]。本研究中, 基于两段式体长-体质量关系

模型得到的比例残差在零刻度线两侧分布明显较基于传统幂函数关系模型得到的结果更均衡(表 3)。因此, 认为两段式体长-体质量模型无论从生物学角度还是从统计学角度, 均较传统的幂函数模型更适于表达口虾蛄的体长-体质量关系。

渔业资源生物生长模式的复杂性在自然界是普遍存在的, 但很多时候由于这种模式的变化很小而被自然环境等因素波动的影响而混淆或掩盖^[6]。当使用复杂模型展示这种模式的变化时, 模型中增加的任何参数都有可能改善拟合的效果^[24], 但本研究中, 两段式体长-体质量关系模型的使用不仅是为了改善拟合效果, 而是为了揭示更多的口虾蛄生物学相关信息。口虾蛄的生长可分为性未成熟期、性成熟期和衰老期 3 个阶段, 不同生长阶段的生长模式存在较大差异。其中, 性未成熟时期是体长生长最为迅速的阶段, 体内不过多积累脂肪等物质; 进入到性成熟期, 体长生长速度减慢, 饲料的营养主要用于转化为性腺物质, 促进性腺的发育成熟, 以保证生殖产物代谢活动的需要, 从而提高种群的繁殖能力和子代成活率^[25], 此阶段体质量增长明显。Bervian 等^[7]证实动物的生长模式变化与初次性成熟体长有关, 并明确这种模式的转变主要是由于性成熟时能量分配的改变而造成^[6], 两段式体长-体质量关系中的体现是第二段关系式的异速生长系数小于第一段^[5]。该现象在本研究中同样存在, 尤以雌性更为明显, 说明雌性口虾蛄个体在性成熟期间, 用于身体生长的能量减少, 更多的能量被分配给性成熟过程, 这也为基于两段式体长-体质量关系模

型预测口虾蛄初次性成熟体长提供了应用基础。

初次性成熟体长是渔业资源种群重要的参数之一,常用的表示方法有区间法,即处于该体长区间的个体,绝大多数已经性成熟;最小体长法,即体长达到该值时,可发现有性成熟个体。两种方法的结果均与样本量的大小有关,样本量越大,区间越大,最小体长越小,同时难以用统计学方法进行群体间的差异比较,而使用含有50%已经性成熟个体的平均体长表示初次性成熟体长,可以很好地解决上述问题^[5]。以往关于口虾蛄初次性成熟体长的研究主要以性成熟群体中个体的最小体长表示^[19],据报道,浙江北部海区口虾蛄的生物学最小型约为80 mm^[26],青岛近海口虾蛄初次性成熟时的体长在70~80 mm^[27],韩国统营市近海口虾蛄初次性成熟体长被估算为96.5 mm^[28]。基于生长模式转变的两段式体长-体质量关系模型估算初次性成熟体长的方法已在多种渔业资源中得到成功应用^[6-7, 29-30],本研究基于两段式体长-体质量关系得到的总体、雌性和雄性口虾蛄初次性成熟体长分别为10.99、11.01和10.85 cm,均大于上述报道,主要是因为本研究所估算得到的初次性成熟体长为含有50%已经性成熟个体的平均体长,而不是可发现的性成熟个体的最小体长,同时也有可能与分布海域的差异有关。尽管本研究中的估算结果难以得到充分印证,但就数值而言,符合生物学逻辑,可作为口虾蛄资源生物学研究的参考。

渔业资源生物个体在发育过程中,其生长是一个复杂的自我调节过程^[23],尽管已被证实生长模式的转变与初次性成熟体长关系密切,但其他因素也可以引起能量分配的改变^[31],如饵料种类及利用率、栖息地环境条件、摄食习性、发育阶段、洄游行为等,然而这些因素引起的生长模式改变难以通过简单的分析数据而得到辨别,因此,更复杂的模型期望被应用,从而更好地分析渔业资源生物生长过程中更多更细的生物学信息。

4 结论

本研究基于Huxley's传统的幂函数模型分析渤海湾口虾蛄体长-体质量关系,表明存在明显的2个体长-体质量关系组,进而建立两段式体长-体质量关系模型,无论从拟合度、比例残差平方和,还是比例残差分布的均匀性看,两段式关系模型都较传统幂函数模型更适于表达口虾蛄的体长-体

质量关系。基于两段式体长-体质量关系模型估算口虾蛄初次性成熟体长,得到总体、雌性和雄性的初次性成熟体长分别为10.99、11.01和10.85 cm。同时两段式体长-体质量关系式还表明,在性成熟阶段,雌性口虾蛄较雄性口虾蛄存在分配更多能量用于性成熟过程,较少能量用于身体生长的现象。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 陈刚. 中国淡水和近海鱼类的生态对策研究[J]. 湛江水产学院学报, 1996, 16(2): 7-14.
Chen G. Ecological strategy of freshwater and inshore fishes in China[J]. Journal of Zhanjiang Fisheries College, 1996, 16(2): 7-14 (in Chinese).
- [2] Sow F N, Samb B, Cheng H Q. Diagnoses of the state of exploitation of small pelagic stocks in senegal by the use of size frequencies: Case of sardinella[J]. Resources Science, 2010, 32(4): 620-626.
- [3] 陈万青. 黄海鲷鱼性成熟特性的初步观察[J]. 海洋湖沼通报, 1982(1): 36-40.
Chen W Q. A report on the peculiarities of sexual maturation of flathead fish *Platycephalus indicus* linnaeus[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1982(1): 36-40 (in Chinese).
- [4] 宋晓娟, 龚世园, 袁汉文, 等. 网箱养殖条件下黄鳍初次性成熟的年龄[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(5): 629-633.
Song X J, Gong S Y, Yuan H W, et al. Age of sexual maturity of *Monopterus albus* cultured in cage[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2012, 31(5): 629-633 (in Chinese).
- [5] 张海明. 应用统计概率研究鱼类的性成熟与其体长的关系[J]. 水利渔业, 1986(5): 53-55.
Zhang H M. Study on the relationship between sexual maturity and body length of fish by using statistical probability[J]. Fishery of Water Conservancy, 1986(5): 53-55 (in Chinese).
- [6] Fontoura N F, Jesus A S, Larre G G, et al. Can weight/length relationship predict size at first maturity? A case study with two species of Characidae[J]. Neotropical Ichthyology, 2010, 8(4): 835-840.
- [7] Bervian G, Fontoura N F, Haimovici M. Statistical model of variable allometric growth: Otolith growth in

- Micropogonias furnieri* (Actinopterygii, Sciaenidae)[J]. *Journal of Fish Biology*, 2006, 68(1): 196-208.
- [8] 李鹏程,张崇良,任一平,等. 以优化的BP神经网络模型为基础研究山东近海口虾蛄空间分布与环境因子的关系[J]. *水产学报*, 2021, 45(11): 1843-1853.
- Li P C, Zhang C L, Ren Y P, *et al.* Relationship between spatial distribution of *Oratosquilla oratoria* and environmental factors in Shandong offshore based on optimized BP neural network model analysis[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(11): 1843-1853 (in Chinese).
- [9] 徐海龙,张桂芬,乔秀亭,等. 黄海北部口虾蛄体长及体质量关系研究[J]. *水产科学*, 2010, 29(8): 451-454.
- Xu H L, Zhang G F, Qiao X T, *et al.* Relationship between body length and body weight in mantis shrimp *Oratosquilla oratoria* in Northern Yellow Sea[J]. *Fisheries Science*, 2010, 29(8): 451-454 (in Chinese).
- [10] 刘海映,谷德贤,姜玉声,等. 口虾蛄繁殖周期及生殖细胞发育的研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2013, 28(3): 269-272.
- Liu H Y, Gu D X, Jiang Y S, *et al.* Annual reproductive cycle and germ cell development in mantis shrimp *Oratosquilla oratoria*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2013, 28(3): 269-272 (in Chinese).
- [11] Hamano T, Morrissy N M, Matsuura S. Ecological information on *Oratosquilla oratoria* (Stomatopoda, Crustacea) with an attempt to estimate the annual settlement date from growth parameters[J]. *The Journal of the Shimonoseki University of Fisheries*, 1987, 36(1): 9-27.
- [12] Hamano T, Matsuura S. Egg laying and egg mass nursing behaviour in the Japanese mantis shrimp[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1984, 50(12): 1969-1973.
- [13] 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.
- 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 (in Chinese).
- [14] 刘逸文,张崇良,刘淑德,等. 山东近海口虾蛄单位补充量渔获量评估[J]. *水产学报*, 2020, 44(2): 213-221.
- Liu Y W, Zhang C L, Liu S D, *et al.* Yield per recruitment evaluation of *Oratosquilla oratoria* in coastal waters of Shandong[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(2): 213-221 (in Chinese).
- [15] Kubo I, Hori S, Kumemura M, *et al.* A biological study on a Japanese edible mantis-shrimp, *Squilla oratoria* de Haan[J]. *Journal of Tokyo University of Fisheries*, 1959, 45(1): 1-25.
- [16] Huxley J S. Constant differential growth-ratios and their significance[J]. *Nature*, 1924, 114(2877): 895-896.
- [17] Xu H L, Wang R, Gu D X, *et al.* A simulation study of impacts of estimated method and uncertainty on parameters in length-weight relationship[C]. Kyoto, Japan: DEStech Publishing Inc, 2016: 173-178.
- [18] Fontoura N F, Braun A S, Milani P C C. Estimating size at first maturity (L_{50}) from Gonadosomatic Index (GSI) data[J]. *Neotropical ichthyology*, 2009, 7(2): 217-222.
- [19] Cren E D L. The length-weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch (*Perca fluviatilis*)[J]. *Journal of Animal Ecology*, 1951, 20(2): 201-219.
- [20] Bolger T, Connolly P L. The selection of suitable indices for the measurement and analysis of fish condition[J]. *Journal of Fish Biology*, 1989, 34(2): 171-182.
- [21] Lovett D L, Felder D L. Application of regression techniques to studies of relative growth in crustaceans[J]. *Journal of Crustacean Biology*, 1989, 9(4): 529-539.
- [22] Lleonart J, Salat J, Torres G J. Removing allometric effects of body size in morphological analysis[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2000, 205(1): 85-93.
- [23] Živkov M. Critique of proportional hypotheses and methods for back-calculation of fish growth[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1996, 46(3): 309-320.
- [24] Xu H L, Chen Y, Gu D X, *et al.* Evaluating goodness-of-fit in comparison of different expressions for length-weight relationship in fishery resources[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 651-653: 337-343.
- [25] 陈新军,刘必林. 渔业资源生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2017
- Chen X J, Liu B L. *Fishery resources biology*[M]. Beijing: Science Press, 2017 (in Chinese).
- [26] 徐善良,王春琳,梅文骧,等. 浙江北部海区口虾蛄繁殖和摄食习性的初步研究[J]. *浙江水产学院学报*, 1996, 15(1): 30-36.
- Xu S L, Wang C L, Mei W X, *et al.* Preliminary studies on propagation and feeding habits of *Oratosquilla oratoria* in northern Zhejiang Sea Areas[J]. *Journal of Zhejiang*

- ang College of Fisheries, 1996, 15(1): 30-36 (in Chinese).
- [27] 盛福利, 曾晓起, 薛莹. 青岛近海口虾蛄的繁殖及摄食习性研究[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(S1): 326-332.
- Sheng F L, Zeng X Q, Xue Y. Study on propagation and feeding habits of *Oratosquilla oratoria* in the inshore waters of Qingdao[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(S1): 326-332 (in Chinese).
- [28] Kim S E, Kim H J, Bae H J, *et al.* Growth and reproduction of the Japanese mantis shrimp, *Oratosquilla oratoria* (De Haan 1844) in the coastal area of Tongyeong, Korea[J]. *Ocean Science Journal*, 2017, 52(2): 257-265.
- [29] Freitas T M D S, Almeida V H D C, Montag L F D A, *et al.* Predicting size at first sexual maturity from length/weight relationship: a case study with an Amazonian catfish[J]. *Neotropical Ichthyology*, 2016, 14(4): e150152.
- [30] Binohlan C, Froese R. Empirical equations for estimating maximum length from length at first maturity[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2009, 25(5): 611-613.
- [31] Ricker W E. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations[R]. Ottawa: Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada, 1975.

Establishing length-weight relationship and predicting size at first maturity of *Oratosquilla oratoria* based on polyphasic model

XU Hailong^{1,2,3*}, XUE Wei^{1,4}, GU Dexian⁵, YANG Rui^{1,4}, YU Xiaohan¹

(1. Department of Fishery Sciences, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Aqua-ecology and Aquaculture, Tianjin 300384, China;

3. National Demonstration Center for Experimental Aqua-ecology and Aquaculture Education, Tianjin Agriculture University, Tianjin 300384, China;

4. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

5. Tianjin Fishery Institute, Tianjin 300221, China)

Abstract: The size at first maturity was one of the most important biological characteristics for fishery population. In order to know the size at first maturity of mantis shrimp (*Oratosquilla oratoria*), Huxley's traditional model and polyphasic model were established for mantis shrimp collected from fishery independent surveys by trawl net in Bohai Bay from Apr. to Aug. 2018, and the size at first maturity was estimated. Our analyses showed that the polyphasic model was more suitable for fitting the length-weight relationship for mantis shrimp. According to Huxley's traditional model, there were two independent spot clusters for the proportional residuals, which characterized two length-weight relationship groups. According to the polyphasic growth model, the sizes at first maturity were estimated as 10.99 cm, 11.01 cm and 10.85 cm for total, female and male mantis shrimp, respectively. These data suggest that a change in growth pattern could be related to a change in energy allocation related to the reproductive activities. When mantis shrimp, especially female, were in the period of maturity, more energy was allocated for sexual maturation, and perhaps decreased energy for somatic growth.

Key words: *Oratosquilla oratoria*; length-weight relationship; polyphasic model; size at first maturity

Corresponding author: XU Hailong. E-mail: Beiji80@163.com

Funding project: Species Resources Protection Fee (Fishery) Project of Ministry of Agriculture and Rural Affairs (171821301354051015)