

文章编号: 1674-5566(2023)04-0773-12

DOI:10.12024/jsou.20230104069

渤海湾火枪乌贼性别和发育阶段对其角质颚外部形态生长特性的影响

徐海龙^{1,2,3}, 王浩秋¹, 丁宇^{1,4}, 苏园园¹, 谷德贤⁵, 许莉莉^{1,2,3}

(1. 天津农学院 水产学院, 天津 300384; 2. 天津农学院 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:为进一步掌握渤海湾火枪乌贼(*Loligo beka*)渔业生物学信息和生长特性,以 2021 年 7—11 月在渤海湾逐月开展渔业资源科学调查所获得的火枪乌贼为研究对象,通过建立多项式胴长与体质量关系估算形态学初次性成熟胴长,应用威尔科克森秩和检验分析性别和发育阶段对角质颚形态特征的影响,利用多元统计分析建立角质颚形态特征与胴长和体质量的生长模型。结果显示:渤海湾火枪乌贼雌性、雄性和不区分性别时的形态学初次性成熟胴长分别为(3.522±0.009)、(3.505±0.026)和(3.513±0.016)cm。上、下角质颚存在明显的形态差异,其中,头盖长/翼长的差异最大,喙长/侧壁长的差异最小。以决定系数和赤池信息准则值为判别标准,采用多元逐步回归法建立的角质颚形态特征与胴长线性关系及与体质量的对数线性模型优于利用单因子回归和主成分逐步加入法建立的生长模型。研究认为,3.513 cm 可作为制定渤海湾火枪乌贼最小可捕捞胴长规格的参考,上角质颚头盖长/脊突长比值可作为群体及种类鉴别的依据,上角质颚脊突长/喙长和头盖长/侧壁长可分别作为性别和发育阶段判定的指标。基于多元逐步回归法建立的生长模型更适于进行渤海湾火枪乌贼胴长和体质量的预测。

关键词:火枪乌贼;角质颚;形态特征;多元统计分析;渤海湾
中图分类号: S 932 **文献标志码:** A

头足类是软体动物门中重要的生物类群,是海洋哺乳动物、大型鱼类以及海鸟的主要食物^[1],在海洋食物链及营养结构中占据着重要地位,对维持海洋生态系统稳定起着非常重要的功能性作用^[2]。火枪乌贼(*Loligo beka*)属于软体动物门(Mollusca)头足纲(Cephalopoda)枪形目(Teuthoidea)枪乌贼科(Loliginidae)枪乌贼属(*Loligo*)的一种近岸小型头足类,广泛分布于我国沿海和日本南部海区^[3]。火枪乌贼的生命周期较短,一年内达到性成熟,全年存在繁殖群体^[4],具有世代更新快的特点^[5],其主要食物构成为以脊腹褐虾(*Crangon affinis*)为主要物种的甲壳类和以小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)幼鱼为主要物种的鱼类,同时自身也是其他大型经济鱼类的重要饵料种类组成^[6]。火枪乌贼虽然个体小,经济价值比传统枪乌贼科经济种类[中国枪

乌贼(*Uroteuthis chinensis*)、剑尖枪乌贼(*Uroteuthis edulis*)和杜氏枪乌贼(*Uroteuthis duvaucelii*)等其他大、中型头足类]低^[5],但其肉质鲜美可口,随着近海传统渔业经济种类衰退,其资源正逐渐被开发利用,捕捞量在渔获中的比例呈逐年上升的趋势^[7-8]。

角质颚作为头足类的摄食器官,由结构相似的上、下颚构成,主要成分为几丁质和蛋白质^[9],具有稳定的形态结构,并蕴含个体生活史等重要生态信息^[10]。角质颚具有耐磨损和不易被腐蚀的特点^[11],是研究头足类渔业生物学及生态学的重要工具材料。有报道指出头足类角质颚的形态特征不仅存在性别差异^[4],还与个体所处的发育阶段有关^[12],通过分析角质颚的形态特性及其与生物生长的关系等信息,可用于头足类种类鉴定、群体划分、栖息地溯源和生物量估算等^[13-15],

收稿日期: 2023-01-31 修回日期: 2023-03-28

基金项目: 天津市教委科研项目(2021KJ1110)

作者简介: 徐海龙(1980—),男,副教授,研究方向为渔业资源生物学及渔业资源评估。E-mail: beiji80@163.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

已成为头足类渔业资源生物学研究热点内容之一。

本研究通过建立渤海湾火枪乌贼多项式胴长与体质量关系以确定性未成熟和性成熟的形态学生长拐点(即形态学初次性成熟胴长, L_{50})^[16-17],分析角质颚形态特征间比值的性别和发育阶段稳定性,利用主成分分析(Principal component analysis, PCA)研究能够表征角质颚外部形态特征的主成分,并筛选角质颚形态特征与胴长、体质量的最优生长模型,以丰富渤海湾火枪乌贼的资源生物学信息,为其群体划分提供依据,同时也为资源开发策略的最小可捕捞规格制定和科学精准管理奠定基础。

1 材料与方法

1.1 数据来源

研究所用火枪乌贼为2021年7—11月在渤海湾(117°30'E~118°20'E, 38°25'N~39°20'N)逐月开展渔业资源科学调查所获得的样品。调查采用单船底拖网形式;调查船主机功率176 kW,总吨位64 t;拖网网口宽10 m,网囊网目内径20 mm。调查过程中,每网拖曳时长1 h,平均拖速2.5 kn。收集的火枪乌贼样品冷冻保存运回实验室,选取完整无损坏个体测量胴长和体质量,直尺测量胴长(Mantle length, ML)精确到0.1 cm,电子天平测量体质量(Body mass, W)精确到0.01 g。每月随机取样50~100尾,性别鉴定后进行角质颚分离^[3],并进行形态特征测量^[4, 15],游标卡尺测量长度精确到0.02 mm。角质颚形态特征包括上头盖长(Upper hood length, UHL)、上脊突长(Upper crest length, UCL)、上喙长(Upper rostrum length, URL)、上喙宽(Upper rostrum width, URW)、上侧壁长(Upper lateral wall length, ULWL)、上翼长(Upper wing length, UWL)、下头盖长(Lower hood length, LHL)、下脊突长(Lower crest length, LCL)、下喙长(Lower rostrum length, LRL)、下喙宽(Lower rostrum width, LRW)、下侧壁长(Lower lateral wall length, LLWL)和下翼长(Lower wing length, LWL)。

1.2 数据分析

建立渤海湾火枪乌贼的Huxley's传统幂函数和多项式胴长与体质量关系模型^[17],比例残差平方作为损失函数,通过最小化损失函数进行模型参数的估算^[18]。为计算参数的标准误,对样本

无放回取样,取样量为原始样本量的50%,进行关系参数估算,取样和参数估算过程重复30次,30次估计值的标准差作为相应参数的标准误。参数估算过程中,求解方法选用非线性GRG法^[19],体质量测量值的权重 $\omega(\theta)$ 取1,转变速率 T_x 初始值取1,形态学初次性成熟胴长(L_{50})的初始值基于Huxley's传统的幂函数胴长与体质量关系比例残差随胴长的分布确定^[17]。Huxley's传统幂函数和多项式胴长与体质量关系式、损失函数和比例残差分别为

$$W = aL_M^b \quad (1)$$

$$W = (a_1L_M^{b_1})S_w + (a_2L_M^{b_2})(1-S_w) \quad (2)$$

$$S_w = \{1 + e^{[T_x(L-L_{50})]}\}^{-1} \quad (3)$$

$$L(y, \hat{y}) = \omega(\theta)P_r^2 \quad (4)$$

$$P_r = \frac{W_{\text{obs}} - W_{\text{pre}}}{W_{\text{pre}}} \quad (5)$$

式中:W为火枪乌贼体质量; L_M 为火枪乌贼胴长; a 、 b 分别为Huxley's传统幂函数关系式的生长条件因子和异速生长系数; a_1 、 a_2 分别为多项式关系式第1段和第2段幂函数关系式的生长条件因子; b_1 、 b_2 分别为多项式关系式第1段和第2段幂函数关系式的异速生长系数; S_w 为中断因子; T_x 为胴长与体质量关系从第1段转变到第2段的速率; L_{50} 为形态学初次性成熟胴长(即性未成熟和性成熟的胴长形态学生长拐点); $L(y, \hat{y})$ 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。

基于多项式胴长体质量关系得到的形态学初次性成熟胴长,进行火枪乌贼发育的性未成熟和性成熟阶段划分。分别统计雌性、雄性、性未成熟、性成熟和全部样本的上、下角质颚两两形态特征间比例关系的均值和变异系数。分性别统计时不区分发育阶段,分发育阶段统计时不区分性别。以变异系数(Coefficient of variation, CV)小于10%为标准筛选各类样本的角质颚稳定的特征间比值指标,并对选出的指标进行性别和发育阶段的威尔科克森秩和检验(Wilcoxon rank-sum test)。

分雌性、雄性和总体对火枪乌贼上、下角质颚和全部角质颚的12个外部形态指标分别进行KMO(Kaiser meyer olkin)抽样适应性指数和巴特

利特球形检验,以 KMO 检验系数大于 0.5 和巴特利特球形检验 $P < 0.01$ 为检验标准^[20]。通过检验的角质颚形态特征用于主成分分析^[21],以解释数据变异的比例值大于 5% 为判定标准^[22],提取可表征角质颚形态特征的主成分。

以线性函数拟合渤海湾火枪乌贼胴长与角质颚形态特征的关系,以对数线性函数拟合体质量与角质颚形态特征的关系,决定系数 (R^2) 和赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 值作为判别拟合效果的依据^[23],比较角质颚形态特征与胴长和体质量的单因子回归、多元逐步回归,以及主成分逐步加入法建立的生长模型,并进行模型选取。

2 结果

2.1 火枪乌贼胴长与体质量关系

2021 年 7—11 月逐月在渤海湾单船底拖网采集的火枪乌贼完整样品共计 3 017 尾,胴长

0.82~7.99 cm,体质量 0.19~22.75 g。各月随机取样的累计样品量 458 尾,其中雌性 306 尾、雄性 152 尾;雌性胴长 1.03~7.99 cm,体质量 0.33~22.75 g;雄性胴长 1.63~6.23 cm,体质量 0.86~15.86 g。应用 Huxley's 传统幂函数形式和多项式形式拟合渤海湾火枪乌贼胴长和体质量关系,两种关系式均得到了较好的拟合结果(表 1 和表 2),其中多项式模型的拟合效果 ($R^2 = 0.928$) 优于 Huxley's 传统幂函数模型的拟合效果 ($R^2 = 0.914$),且比例残差平方和更小。两种模型得到的结果显示,无论雌性还是雄性,均呈负的异速生长。经 F 检验,两种模型的胴长与体质量关系均存在性别间的极显著差异 ($P = 2.18 \times 10^{-5} < 0.01$ 、 $P = 3.12 \times 10^{-3} < 0.01$)。多项式模型拟合结果显示:总体、雌性和雄性渤海湾火枪乌贼的 L_{50} 分别为 (3.513 ± 0.016)、(3.522 ± 0.009) 和 (3.505 ± 0.026) cm。

表 1 基于 Huxley's 传统的幂函数形式的火枪乌贼胴长体质量关系

Tab. 1 Descriptive statistics and Huxley's traditional mantle length-body mass relationships for *Loligo beka*

样本 Sample	参数 a a	参数 b b	参数 a 95% 置信区间 a CL 95%	参数 b 95% 置信区间 b CL 95%	比例残差平方和 Proportional residuals sum of squares	决定系数 R^2
总体 Total	0.068	2.820	0.067~0.070	2.804~2.837	25.297	0.914
雌性 Female	0.061	2.881	0.059~0.062	2.861~2.902	17.018	0.929
雄性 Male	0.109	2.527	0.106~0.113	2.500~2.555	7.200	0.848

表 2 基于多项式的火枪乌贼胴长体质量关系

Tab. 2 Descriptive statistics and polynomial mantle length-body mass relationships for *Loligo beka*

样本 Sample	参数 a_1 a_1	参数 b_1 b_1	参数 a_2 a_2	参数 b_2 b_2	转变速率 T_x	转变胴长 L_{50}/cm	比例残差平方和 Sum of squares	决定系数 R^2
总体 Total	0.095±0.003	2.889±0.022	0.141±0.005	2.786±0.023	1.095±0.032	3.513±0.016	22.448	0.928
雌性 Femal	0.094±0.002	2.932±0.017	0.138±0.003	2.807±0.014	1.064±0.106	3.522±0.009	16.200	0.943
雄性 Male	0.099±0.006	2.642±0.015	0.145±0.002	2.584±0.018	1.099±0.026	3.505±0.026	7.189	0.852

2.2 角质颚形态特征及主成分分析

火枪乌贼角质颚形态特征值如下: UHL 2.22~6.20 mm, UCL 3.08~8.69 mm, URL 0.48~1.70 mm, URW 0.43~1.46 mm, ULWL 2.00~6.70 mm, UWL 0.87~2.62 mm, LHL 0.88~2.69 mm, LCL 1.54~4.76 mm, LRL 0.50~1.62 mm, LRW 0.63~1.77 mm, LLWL 2.10~6.10 mm, LWL 1.39~4.43 mm。

不同类型样本的角质颚形态特征间相对比

值各异,表现为上角质颚 HL/CL、HL/RL、HL/RW、HL/LWL、HL/WL、CL/RL、CL/RW、CL/LWL、CL/WL、RL/RW、RL/WL、RW/WL 和 LWL/WL 的比值大于下角质颚对应特征间的比值,RL/WL 和 RW/LWL 的比值小于下角质颚对应特征间的比值,其中,HL/WL 的差异最大,RL/LWL 的差异最小,在不同样本类型间的比值分别为 4.120 ± 0.056 和 0.929 ± 0.008 。所有特征间比值的变异系数为 0.022~0.093,均小于 10%。经威

尔科克森秩和检验:上角质颚的 HL/CL、HL/RL、HL/RW、HL/LWL、HL/WL、CL/LWL、CL/WL、RL/RW 和 LWL/WL 不存在性别间显著差异, HL/CL、HL/RL、HL/RW、CL/RL 和 RL/RW 不存在发育阶段间的显著差异;下角质颚的 HL/CL、HL/LWL、HL/WL、CL/LWL、CL/WL、RL/RW 和 LWL/WL 不存在性别间显著差异, HL/WL、HL/RL、CL/LWL 和 RL/LWL 不存在发育阶段间的显著差异。上角质颚的 CL/RL、CL/RW、RL/LWL、RL/WL、RW/LWL 和 RW/WL 存在性别间极显著差异, HL/LWL、CL/RW 和 LWL/WL 存在发育阶段间的极显著差异,下角质颚的 HL/CL 和 HL/RL 存在发育阶段间的极显著差异。

经 KMO 抽样适应性指数和巴特利特球形检验,雌性、雄性和总体的 KMO 统计量值分别为 0.963、0.932 和 0.961,巴特利特球形检验的 Sig. 值均为 0,检验结果显示火枪乌贼角质颚形态特

征可进行主成分分析。基于解释数据变异的比值,雌性、雄性和总体的上角质颚形态特征的主成分分析均提取前 2 个主成分,分别累计解释 96.420%、92.502% 和 95.798% 的数据变异(表 3);UHL、UCL、ULWL 和 UWL 对第 1 主成分具有较高载荷,URL 和 URW 对第 2 主成分具有较高载荷。下角质颚分别提取前 2、3 和 2 个主成分,分别累计解释 95.617%、94.754% 和 94.696% 的数据变异(表 4),LHL、LCL、LLWL 和 LWL 对第 1 主成分具有较高载荷,LRL 和 LRW 对第 2 主成分具有较高载荷,对于雌性下角质颚第 3 主成分,LRL 具有较高载荷;不区分上、下角质颚的情况下,雌性、雄性和总体分别提取前 1、2 和 2 个主成分,分别累计解释 89.791%、87.098% 和 93.071% 的数据变异(表 5),除上喙和下喙特征对第 2 主成分具有较高载荷,其他特征均对第 1 主成分具有较高载荷。

表 3 火枪乌贼上角质颚形态特征的主成分分析

Tab. 3 Principal component analysis for the morphological parameters of *Loligo beka* upper beaks

形态特征 Morphologic parameters	主成分 Principal component						得分系数 Component score					
	雌性 Female		雄性 Male		总体 Total		雌性 Female		雄性 Male		总体 Total	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
上头盖长 UHL	0.975	-0.138	0.938	-0.253	0.968	-0.164	0.178	-0.453	0.194	-0.351	0.180	-0.440
上脊突长 UCL	0.974	-0.184	0.935	-0.302	0.967	-0.210	0.178	-0.605	0.194	-0.418	0.180	-0.562
上喙长 URL	0.942	0.269	0.878	0.394	0.933	0.289	0.172	0.883	0.182	0.546	0.174	0.773
上喙宽 URW	0.915	0.368	0.778	0.589	0.894	0.415	0.167	1.208	0.161	0.816	0.166	1.112
上侧壁长 ULWL	0.967	-0.181	0.946	-0.245	0.964	-0.193	0.177	-0.593	0.196	-0.340	0.179	-0.517
上翼长 UWL	0.960	-0.106	0.896	-0.058	0.950	-0.098	0.175	-0.348	0.186	-0.081	0.177	-0.261
贡献率 Contribution rate/%	91.346	5.074	80.476	12.026	89.577	6.221						
累计贡献率 Cumulative rate/%	91.346	96.420	80.476	92.502	89.577	95.798						

注:贡献率小于 5% 的主成分未列出。

Notes: The principal components with the contribution rate of less than 5% are not listed.

2.3 角质颚形态特征与胴长、体质量关系

单因素分析结果显示角质颚形态特征与胴长均呈极显著线性相关(表 6),与体质量呈极显著对数线性相关(表 7)。雌性、雄性及总体的角质颚形态特征与胴长线性函数关系式斜率(b)分别为 0.951~4.106、0.989~2.739 和 0.954~3.687,决定系数(R^2)分别为 0.453~0.838、0.072~0.702 和 0.361~0.808;与体质量的对数线性(b)函数关系式斜率分别为 2.380~3.526、

1.044~3.552 和 2.151~3.530,决定系数(R^2)分别为 0.512~0.852、0.063~0.730 和 0.402~0.818。基于决定系数和赤池信息准则值(AIC),对于雌性和总体样本,上侧壁长与胴长的线性拟合效果最优,对于雄性群体,略低于上脊突长与胴长的拟合结果;而相比于其他特征,上脊突长与体质量的对数线性关系拟合在 3 类样本中均表现最优。

表 4 火枪乌贼下角质颚形态特征的主成分分析

Tab. 4 Principal component analysis for the morphological parameters of *Loligo beka* lower beaks

外形参数 Morphologic parameters	主成分 Principal component						得分系数 Component score							
	雌性 Female		雄性 Male			总体 Total		雌性 Female		雄性 Male		总体 Total		
	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3	1	2
下头盖长 LHL	0.945	-0.221	0.882	-0.357	-0.038	0.931	-0.261	0.175	-0.682	0.199	-0.374	-0.124	0.178	-0.589
下脊突长 LCL	0.972	-0.145	0.934	-0.229	-0.034	0.964	-0.171	0.180	-0.446	0.211	-0.240	-0.113	0.184	-0.387
下喙长 LRL	0.902	0.387	0.663	0.660	0.341	0.872	0.432	0.167	1.194	0.150	0.692	1.120	0.166	0.977
下喙宽 LRW	0.933	0.268	0.736	0.535	-0.410	0.901	0.342	0.172	0.825	0.166	0.561	-1.346	0.172	0.772
下侧壁长 LLWL	0.978	-0.123	0.970	-0.136	0.022	0.976	-0.131	0.181	-0.380	0.219	-0.142	0.072	0.186	-0.295
下翼长 LWL	0.966	-0.133	0.924	-0.185	0.130	0.957	-0.156	0.179	-0.411	0.209	-0.194	0.427	0.183	-0.352
贡献率 Contribution rate/%	90.212	5.405	73.771	15.904	5.079	87.317	7.379							
累计贡献率 Cumulative rate/%	90.212	95.617	73.771	89.675	94.754	87.317	94.696							

注:贡献率小于5%的主成分未列出。

Notes: The principal components with the contribution rate of less than 5% are not listed.

表 5 火枪乌贼角质颚形态特征的主成分分析

Tab. 5 Principal component analysis for the morphological parameters of *Loligo beka* beaks

外形参数 Morphologic parameters	主成分 Principal component					得分系数 Component score					
	雌性 Female		雄性 Male		总体 Total	雌性 Female		雄性 Male		总体 Total	
	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	
上头盖长 UHL	0.980		0.954	-0.169	0.975	-0.116	0.091	0.105	-0.120	0.093	-0.168
上脊突长 UCL	0.979		0.947	-0.216	0.973	-0.152	0.091	0.105	-0.154	0.093	-0.220
上喙长 URL	0.925		0.834	0.372	0.913	0.276	0.086	0.092	0.265	0.087	0.401
上喙宽 URW	0.890		0.719	0.585	0.864	0.429	0.083	0.079	0.417	0.082	0.622
上侧壁长 ULWL	0.969		0.958	-0.157	0.967	-0.134	0.090	0.106	-0.112	0.092	-0.194
上翼长 UWL	0.957		0.889	-0.006	0.947	-0.035	0.089	0.098	-0.004	0.090	-0.051
下头盖长 LHL	0.931		0.854	-0.391	0.916	-0.268	0.086	0.094	-0.279	0.087	-0.389
下脊突长 LCL	0.964		0.918	-0.269	0.956	-0.199	0.089	0.102	-0.191	0.091	-0.288
下喙长 LRL	0.909		0.662	0.613	0.877	0.399	0.084	0.073	0.437	0.084	0.578
下喙宽 LRW	0.920		0.722	0.402	0.887	0.225	0.085	0.080	0.286	0.085	0.326
下侧壁长 LLWL	0.977		0.964	-0.165	0.974	-0.157	0.091	0.107	-0.118	0.093	-0.228
下翼长 LWL	0.963		0.927	-0.180	0.956	-0.169	0.089	0.102	-0.128	0.091	-0.244
贡献率 Contribution rate/%	89.791		75.401	11.697	87.325	5.746					
累计贡献率 Cumulative rate/%	89.791		75.401	87.098	87.325	93.071					

注:贡献率小于5%的主成分未列出。

Notes: The principal components with the contribution rate of less than 5% are not listed.

利用火枪乌贼角质颚形态特征分别建立与胴长和体质量的回归关系(表 8 和表 9),多元逐步回归显示,对于雌性、雄性及总体样本,当以上角质颚形态特征为指标,最优因子组合对胴长的解释率分别为 86.5%、77.6% 和 84.4%,其中 UHL 在最优因子组合中对 3 类样本胴长的解释率均居首位;最优因子组合对体质量的解释率分

别为 89.0%、81.6% 和 86.5%,其中 URL、UHL 和 UWL 的解释率分别为对应样本的第 1 位。以下角质颚形态特征为指标,最优因子组合对胴长的解释率分别为 82.9%、67.4% 和 79.8%,对于雌性和雄性群体,LWL 的解释率均居首位,LCL 对总样本胴长的解释率居第 1 位;最优因子组合对体质量的解释率分别为 86.7%、80.0% 和

84.3%,对于雌性和雄性群体,LCL的解释率均居第1位,LRW对总样本胴长的解释率居第1位。当不区分上角质颚和下角质颚时,最优因子组合对胴长的解释率分别为87.4%、78.6%和85.3%,

URL、URW和UHL分别对应于3类样本胴长的最高解释率;最优因子组合对体质量的解释率分别为89.7%、83.9%和87.7%,URL、LRW和LWL分别为对应样本体质量的最高解释率因子。

表6 火枪乌贼胴长与角质颚形态特征单因素线性拟合关系

Tab.6 Linear functional relations between mantle length and morphological parameters of *Loligo beka* beaks

外形参数 Morphologic parameters	总体 Total			雌性 Female			雄性 Male		
	b (Mean±SD)	R ²	AIC	b (Mean±SD)	R ²	AIC	b (Mean±SD)	R ²	AIC
上盖头长 UHL	1.298±0.038**	0.720	878.327	1.311±0.043**	0.752	613.453	1.266±0.083**	0.607	256.464
上脊突长 UCL	0.954±0.023**	0.786	755.851	0.951±0.026**	0.809	532.385	0.989±0.053**	0.702	214.523
上喙长 URL	3.621±0.181**	0.469	1171.874	3.836±0.202**	0.542	800.597	2.739±0.422**	0.219	360.891
上喙宽 URW	3.392±0.209**	0.366	1252.871	3.773±0.238**	0.453	854.748	1.894±0.447**	0.107	381.302
上侧壁长 ULWL	1.184±0.027**	0.808	706.605	1.179±0.030**	0.838	482.844	1.233±0.066**	0.697	217.004
上翼长 UWL	2.618±0.090**	0.651	979.441	2.664±0.101**	0.696	675.337	2.435±0.208**	0.477	299.924
下头盖长 LHL	2.569±0.086**	0.661	966.297	2.611±0.101**	0.687	684.382	2.405±0.173**	0.563	272.762
下脊突长 LCL	1.558±0.045**	0.722	875.367	1.580±0.052**	0.756	608.504	1.484±0.099**	0.599	259.537
下喙长 LRL	3.113±0.194**	0.361	1256.651	3.420±0.214**	0.456	853.434	1.680±0.492**	0.072	387.093
下喙宽 LRW	3.687±0.193**	0.445	1191.499	4.106±0.211**	0.555	791.994	2.676±0.481**	0.171	369.959
下侧壁长 LLWL	1.303±0.034**	0.762	803.640	1.312±0.037**	0.801	545.322	1.296±0.083**	0.620	251.429
下翼长 LWL	1.704±0.046**	0.749	827.527	1.739±0.051**	0.792	559.529	1.565±0.107**	0.589	263.469

注:**表示极显著相关。

Notes:** indicates P<0.01.

表7 火枪乌贼体质量与角质颚形态特征单因素对数线性拟合关系

Tab.7 Log-linear functional relations between weight and morphological parameters of *Loligo beka* beaks

外形参数 Morphologic parameters	总体 Total			雌性 Female			雄性 Male		
	b (Mean±SD)	R ²	AIC	b (Mean±SD)	R ²	AIC	b (Mean±SD)	R ²	AIC
上盖头长 UHL	3.479±0.086**	0.783	402.846	3.506±0.093**	0.822	265.754	3.386±0.186**	0.688	103.140
上脊突长 UCL	3.530±0.078**	0.818	321.877	3.526±0.084**	0.852	208.927	3.552±0.176**	0.730	81.079
上喙长 URL	2.496±0.115**	0.507	778.897	2.652±0.123**	0.604	511.334	1.809±0.280**	0.218	242.814
上喙宽 URW	2.151±0.123**	0.402	866.581	2.380±0.133**	0.512	575.134	1.185±0.277**	0.109	262.699
上侧壁长 ULWL	3.237±0.074**	0.807	349.016	3.212±0.080**	0.842	229.344	3.374±0.175**	0.713	90.245
上翼长 UWL	2.850±0.084**	0.715	527.033	2.907±0.090**	0.773	340.202	2.574±0.199**	0.528	165.928
下头盖长 LHL	2.922±0.080**	0.747	473.854	2.950±0.093**	0.767	348.436	2.790±0.146**	0.708	92.931
下脊突长 LCL	3.247±0.082**	0.777	415.993	3.285±0.090**	0.814	280.446	3.104±0.170**	0.689	102.434
下喙长 LRL	2.173±0.124**	0.403	866.455	2.394±0.130**	0.529	564.021	1.044±0.329**	0.063	270.297
下喙宽 LRW	2.931±0.148**	0.461	819.648	3.365±0.152**	0.619	499.479	1.881±0.362**	0.152	255.067
下侧壁长 LLWL	3.436±0.080**	0.801	363.120	3.453±0.085**	0.844	225.458	3.396±0.185**	0.693	100.741
下翼长 LWL	3.073±0.075**	0.786	397.347	3.145±0.081**	0.831	249.544	2.774±0.163**	0.659	116.836

注:**表示极显著相关。

Notes:** indicates P<0.01.

基于火枪乌贼角质颚形态特征主成分分别与胴长和体质量的回归分析结果(表8和表9),以上角质颚形态特征为指标时,第1主成分对雌性、雄性及总体样本胴长和体质量的解释率分别是79.6%、65.6%、76.4%、84.2%、69.1%和80.0%;以下角质颚形态特征为指标时,第1主成分的解释率分别是78.0%、62.5%、74.4%、83.9%、70.7%和79.5%;不区分上、下角质颚形态特征

时,第1主成分的解释率分别是79.5%、65.3%、76.1%、84.7%、70.8%和80.4%。其中,仅基于上角质颚形态特征提取的主成分对胴长具有最优的预测效果,而基于角质颚全部12项指标提取的主成分更适于对体质量的预测。

以决定系数和赤池信息准则值为判别标准,利用多元逐步回归法建立的角质颚形态特征与胴长线性关系及与体质量的对数线性模型优于

利用单因子回归和主成分逐步加入法建立的生长模型,并由此得到基于角质颚形态特征表型指标预测胴长和体质量生长的最优拟合回归方程(表 10)。

表 8 火枪乌贼胴长与角质颚形态特征及主成分间的回归分析

Tab. 8 Regression analysis between mantle length and morphological parameters or PCs of *Loligo beka* beaks

角质颚 Beaks	总体 Total			雌性 Female			雄性 Male		
	Factors	R ²	AIC	Factors	R ²	AIC	Factors	R ²	AIC
上角质颚 Upper beaks	UHL,UCL、 URW,ULWL	0.844	615.217	UHL,UCL、 URW,ULWL	0.865	432.753	UHL,URW,UWL、 URL,UCL,ULWL	0.776	181.387
	PC1	0.764	799.283	PC1	0.796	553.220	PC1	0.656	236.165
	PC1,PC2	0.825	665.978	PC1,PC2	0.754	487.543	PC1,PC2	0.746	192.103
下角质颚 Lower beaks	LCL,LWL、 LLWL,LRL	0.798	734.253	LWL,LRL、 LLWL	0.829	502.652	LWL,LRL、 LLWL	0.674	231.879
	PC1	0.744	838.222	PC1	0.780	575.972	PC1	0.625	249.327
	PC1,PC2	0.780	769.589	PC1,PC2	0.810	534.159	PC1,PC2	0.667	233.201
上、下颚 Beaks	-	-	-	-	-	-	PC1,PC2,PC3	0.669	234.310
	UHL,LCL,LWL、 URW,LRL、 UCL,ULWL	0.853	594.489	URL,UHL,LWL、 URW,UCL、 LRL,ULWL	0.874	416.814	URW,LRW,URL、 UWL,LCL、 UCL,ULWL	0.786	176.095
	PC1	0.761	805.097	PC1	0.795	555.291	PC1	0.653	237.771
	PC1,PC2	0.814	692.808	-	-	-	PC1,PC2	0.722	205.655

表 9 火枪乌贼体质量与角质颚形态特征及主成分间的对数回归分析

Tab. 9 Log-linear model between body mass and morphological parameters or PCs of *Loligo beka* beaks

角质颚 Beaks	总体 Total			雌性 Female			雄性 Male		
	Factors	R ²	AIC	Factors	R ²	AIC	Factors	R ²	AIC
上角质颚 Upper beaks	UWL,ULWL、 UCL,URW	0.865	191.207	URL,UWL,UCL、 ULWL,URW	0.890	127.553	UHL,UCL,URL、 URW,UWL,ULWL	0.816	32.695
	PC1	0.800	365.552	PC1	0.842	229.144	PC1	0.691	101.663
下角质颚 Lower beaks	LRW,LHL,LCL、 LRL,LWL,LLWL	0.843	263.775	LCL,LWL、 LLWL,LRL	0.867	182.044	LCL,LLWL、 LWL,LHL,LRL	0.800	43.721
	PC1	0.795	376.012	PC1	0.839	235.193	PC1	0.707	93.821
上、下颚 Beaks	LWL,LHL,LRW、 LRL,UWL,URW、 UCL,ULWL	0.877	157.377	URL,LWL、 UWL,LRL,URW、 UCL,ULWL	0.897	111.306	LRW,UWL、 UCL,LRL,LHL、 URL,ULWL	0.839	14.561
	PC1	0.804	355.076	PC1	0.847	220.182	PC1	0.708	92.923

表 10 火枪乌贼角质颚形态特征与胴长和体质量的多元逐步回归分析

Tab. 10 Multiple regression analysis between morphological parameters and mantle length or body mass of *Loligo beka* beaks

样本 Sample	胴长 Mantle length				体质量 Body mass			
	a	b _i	Factors	R ²	a	b _i	Factors	R ²
雌性 Female	-0.418	-0.273,0.379、 0.545,-0.962、 1.052,-1.177、 0.343	UHL,UCL,URL、 URW,ULWL、 LRL,LWL	0.874	-4.55	1.621,0.466、 -0.921,1.485、 0.711,-0.657、 0.619	UCL,URL,URW、 ULWL,UWL、 LRL,LWL	0.897
雄性 Male	-0.156	0.585,-1.096、 -0.913,1.184、 0.538,-0.543、 -0.710	UCL,URL,URW、 ULWL,UWL、 LCL,LRW	0.786	-4.27	1.144,-0.875、 2.280,0.515、 0.761,-0.584、 -0.447	UCL,URL,ULWL、 UWL,LHL、 LRL,LRW	0.839
总体 Total	-0.357	-0.215,0.494、 -0.911,1.075、 -0.212,-0.917、 0.306	UHL,UCL,URW、 ULWL,LCL、 LRL,LWL	0.853	-4.688	1.705,-0.669、 1.595,0.598、 0.343,-0.442、 -0.436,0.477	UCL,URW,ULWL、 UWL,LHL,LRL、 LRW,LWL	0.877

注:参数 b_i 与 Factors 是逐一对应关系。

Notes: One by one between parameters b_i and morphological traits correspond to the relationship.

3 讨论

建立体长体质量关系是开展渔业资源研究的重要内容和途径之一,基于建立的关系式不仅可以利用体长信息进行体质量的预测,还可以通过不同生长阶段的关系式变化推断渔业生物生命过程中的能量分配和发育规律。传统的体长体质量关系使用简单的幂函数模型表达^[24],因其忽视了渔业生物生命过程中因能量分配及消耗形式的变动而引起的生长模式变化^[25],在实际应用中存在一定的局限^[26]。FONTOURA 等^[19]基于渔业生物发育过程中生长模式可能存在变化的现实,对传统的体长体质量关系进行了修改并提出多项式体长体质量关系,多项式关系式通过引入含有转变体长的逻辑斯蒂方程将 2 个独立的幂函数关系式连接,逻辑斯蒂方程表达了 2 种生长模式转变的速率,2 个独立的幂函数关系式分别代表不同发育阶段的生长模式。本研究分别应用传统的幂函数和多项式拟合渤海湾火枪乌贼胴长和体质量关系,尽管两种模型都能较好地进行拟合,但无论是否区分性别,决定系数和比例残差平方和都表现为多项式关系式拟合的效果优于幂函数关系式,说明应用多项式体长体质量关系进行渤海湾火枪乌贼生长特性描述和资源评估等研究会得到较幂函数关系式更可靠的结果^[27]。应用多项式关系式拟合渤海湾火枪乌贼胴长和体质量关系时,第 2 段幂函数的异速生长系数小于第 1 段的,这种差异在雌性群体更为明显,认为是由于繁殖活动消耗了更多的能量导致用于生物体躯体生长的能量减少而造成的^[17, 19]。

了解渔业资源的生物学信息是科学制定资源开发利用策略的重要前提。初次性成熟体长作为确定渔业资源开发过程中最小可捕捞规格的重要参考,普遍的观点认为最小可捕捞规格不能小于初次性成熟体长^[28]。以往估算初次性成熟体长的方法主要有基于性腺发育的^[29]、基于繁育行为功能的^[30]和基于生长模式变化的^[16]。依据渔业生物生长发育的基本规律,从性腺发育到繁育功能完善再到因能量分配变化而引起的生长模式转变,此过程中生物持续生长^[31],因此,基于不同方法得到的初次性成熟体长普遍存在差异^[32]。对比估算结果^[17, 28],常表现为基于生长模式变化得到的形态学初次性成熟体长最大,因

此认为将形态学初次性成熟体长作为渔业管理策略的参考是最保守的^[17, 28, 33],也是最有利于渔业资源可持续利用的。BERVIAN 等^[34]通过分析弗氏绒须石首鱼(*Micropogonias furnieri*)的生长,证实了渔业生物发育过程中生长模式的改变与形态学初次性成熟体长有关,提出多项式体长体质量关系并对形态学初次性成熟体长估算,被广泛应用于多种渔业生物^[17, 27]。基于多项式体长体质量关系估算的渤海湾口虾蛄形态学初次性成熟体长^[17],与《渤海生物资源养护规定》(2004 年 2 月 12 日农业部令第 34 号)中要求的最小可捕捞体长基本一致,说明将形态学初次性成熟体长作为确定最小可捕捞规格是具有一定可靠性和可行性的。基于本研究中多项式体长体质量关系估算得到的形态学初次性成熟胴长,认为 3.513 cm 或可作为确定渤海湾火枪乌贼最小可捕捞胴长规格的参考。

头足类角质颚由上、下两部分组成,作为摄食的主要器官,具有种的属性^[35]。杨林林等^[4]报道东海火枪乌贼上角质颚和下角质颚存在形态差异。本研究中渤海湾火枪乌贼上角质颚头盖长和脊突长大于下角质颚的,上角质颚和下角质颚对应特征的比值分别达到 2.463 和 1.811,而上翼长仅为下翼长的 59.9%,说明渤海湾火枪乌贼上角质颚和下角质颚也存在明显的形态差异。角质颚作为头足类有限的硬组织之一,形态生长与个体发育基本保持一致^[15],与硬组织中的耳石、内壳类似,具有形态相对稳定性的特点。因此,其形态特征差异可作为性别、发育阶段和群体的鉴定依据^[36]。本研究中渤海湾火枪乌贼上角质颚的 UHL/UCL、UHL/URL、UHL/URW 和 URL/URW 及下角质颚的 LHL/LWL 和 LCL/LLWL 既不存在性别显著差异,也不存在发育阶段的显著差异。虽然上述特征比值的变异系数均小于 10%,但上角质颚 UHL/UCL 和下角质颚 LCL/LLWL 的变异系数分别为 0.023~0.025 和 0.028~0.033,与其他特征比值的变异系数均大于 0.040 相比,具有更好的形态稳定性。另有研究^[4]指出,火枪乌贼下角质颚在形态结构上较上角质颚复杂,不仅测量困难,而且测量结果的波动性也较大,因此认为上角质颚 UHL/UCL 更适于作为渤海湾火枪乌贼的群体属性特征,用作群体区分、甚至种类鉴别的差异性指标。类似地,

基于测量结果的易得性、可靠性和形态特征的稳定性,认为上角质颚 UCL/URL 和 UHL/ULWL 可分别作为性别和发育阶段鉴别的依据。

主成分分析可描述研究对象形态结构以及说明表型特征如何影响研究对象的形态结构^[37],有些表型指标与研究对象的形态大小有关,有些表型指标与形状结构有关^[12]。研究显示,对于渤海湾火枪乌贼,与第 1 主成分主要相关联的表型特征(头盖长、脊突长、侧壁长、翼长)是描述角质颚大小的形态指标,与第 2 主成分相关联的表型特征(喙长、喙宽)是描述角质颚形状结构的指标。这与剑尖枪乌贼的研究结果^[38]存在不同,可能是角质颚形状结构因种类而异^[15, 39]的原因。OGDEN 等^[40]通过对蛸科角质颚的形态特征研究,并结合分子生物学手段,分析了角质颚在判断亲缘关系中的作用,认为角质颚的形态特征可作为属级鉴定的依据,并已被广泛应用于头足类属级及以上阶元的分类工作中^[15]。火枪乌贼隶属枪乌贼属,剑尖枪乌贼隶属尾枪乌贼属,两个种类分属不同属,考察与第 1 主成分和第 2 主成分主要相关联的角质颚表型特征的组成差异,可能为头足类属级鉴定工作提供新的途径,但结果的可靠性有待更广泛的应用与实践。有报道^[41-42]指出,基于形态特征的主成分分析,与第 1 主成分主要相关联的表型特征通常与研究对象的尺寸大小有关,与第 2 主成分主要相关联的表型特征通常与研究对象的形态结构有关。这在多种头足类角质颚的主成分分析结果中得到证实^[21, 37-38],本研究结果证实火枪乌贼主成分分析也遵从该规律。

作为食物网上的重要节点,广泛分布于我国渤海、黄海和东海的火枪乌贼为近海多种经济鱼类提供了饵料来源^[5],对稳定海洋生态系统结构和估算海洋经济生物资源量起着重要作用。因其角质颚具有耐腐蚀和不易被消化的特点,通过分析火枪乌贼捕食者胃含物中角质颚形态特征并利用角质颚形态指标与胴长、体质量关系估算被捕食火枪乌贼个体大小成为可能^[4]。本研究通过单因子回归函数拟合角质颚形态特征与胴长、体质量关系,对拟合函数关系式斜率的变异系数分析,显示具有最优拟合结果的相关关系同时也具有最优的拟合稳定性,这可能是由于最优拟合关系中包含的角质颚形态特征相较于其他

特征具有更大的度量值,从而减小了测量误差对结果的影响程度^[43]。在建立胴长、体质量与主成分拟合关系的过程中,随着引入的主成分数量增加,模型对胴长和体质量的解释率也相应地增加,但其解释率仍低于多元逐步回归关系式。这是因为主成分分析构建的主成分尽管已经尽可能多地保留了角质颚形态特征的信息,但实质上主成分仍只是对特征信息进行的部分解释^[44],设定的主成分提取规则决定了对原始信息的解释程度,而解释程度又会影响所建立关系式的拟合效果^[45]。另外,多元逐步回归关系式中保留了较多的解释变量也是造成该结果的原因之一。多元逐步回归关系式拟合效果优于基于主成分关系式的拟合效果,说明火枪乌贼胴长和体质量与角质颚的多个形态特征具有较强的相关关系,这在单因素回归的结果中也有所体现。分析 3 种类型的拟合结果,相较于胴长的拟合,均存在角质颚形态特征与体质量拟合效果更好的现象,这是因为对比长度测量,质量的称量不仅简单且结果客观,具有更高的可靠度^[33]。

4 结论

本研究通过拟合渤海湾火枪乌贼多项式胴长与体质量关系,得到总体、雌性和雄性的形态学初次性成熟胴长分别为(3.513±0.016)cm、(3.522±0.009)cm 和(3.505±0.026)cm。分析角质颚形态特征,明确上角质颚和下角质颚存在明显的形态差异,上角质颚 UHL/UCL 可作为群体及种类鉴别的依据,上角质颚 UCL/URL 和 UHL/ULWL 可分别作为性别和发育阶段区分的指标。对比 3 类角质颚形态特征与胴长、体质量拟合关系,认为基于多元逐步回归法建立的生长模型更适于进行渤海湾火枪乌贼胴长和体质量的预测。

参考文献:

- [1] SMITH S C, WHITEHEAD H. The diet of galápagos sperm whales *Physeter macrocephalus* as indicated by fecal sample analysis [J]. *Marine Mammal Science*, 2000, 16(2): 315-325.
- [2] 胡飞飞,陈新军,刘必林,等. 头足类分类鉴定的研究进展[J]. *海洋渔业*, 2017, 39(1): 110-120.
HU F F, CHEN X J, LIU B L, et al. Review on identification of cephalopods classification [J]. *Marine Fisheries*, 2017, 39(1): 110-120.

- [3] 陈新军, 刘必林, 王尧耕. 世界头足类[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 399-400.
CHEN X J, LIU B L, WANG Y G. World cephalopods [M]. Beijing: China Ocean Press, 2009: 399-400.
- [4] 杨林林, 姜亚洲, 刘尊雷, 等. 东海火枪乌贼角质颚的形态特征[J]. 中国水产科学, 2012, 19(4): 586-593.
YANG L L, JIANG Y Z, LIU Z L, et al. Analysis of beak morphology of *Loligo beka* in the East China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(4): 586-593.
- [5] 沈长春, 刘勇. 东海区火枪乌贼数量分布及其群体组成[C]//中国南方十六省(市、区)水产学会渔业学术论坛第二十六次学术交流大会论文集. 重庆: 重庆市科学技术协会, 2010: 221-225.
SHEN C C, LIU Y. Quantity distribution and population composition of *Loligo beka* in the East China Sea [C]// Proceedings of the Fisheries Academic Forum and the 26th Academic Exchange Conference of the Fisheries Society of 16 Provinces (Cities and Districts) in Southern China. Chongqing: Chongqing Society of Fisheries, 2010: 221-225.
- [6] 杨纪明. 渤海无脊椎动物的食性和营养级研究[J]. 现代渔业信息, 2001, 16(9): 8-16.
YANG J M. A study on food and trophic levels of Bohai Seainvertebrates[J]. Modern Fisheries Information, 2001, 16(9): 8-16.
- [7] 王娜, 徐海龙, 武子山, 等. 塘沽上岸渔获物组成变化趋势分析[J]. 河北渔业, 2011(11): 32-34.
WANG N, XU H L, WU Z S, et al. The change trend of the Catch Component in Tanggu Tianjin [J]. Hebei Fisheries, 2011(11): 32-34.
- [8] 李永振, 陈国宝, 孙典荣. 珠江口鱼类组成分析[J]. 水产学报, 2000, 24(4): 312-317.
LI Y Z, CHEN G B, SUN D R. Analysis of the composition of fishes in the Pearl River Estuarine waters[J]. Journal of Fisheries of China, 2000, 24(4): 312-317.
- [9] MISEREZ A, LI Y L, WAITE J H, et al. Jumbo squid beaks: inspiration for design of robust organic composites [J]. Acta Biomaterialia, 2007, 3(1): 139-149.
- [10] QUEIROZ P, CHERE Y, CEIA F R, et al. Ontogenic changes in habitat and trophic ecology in the Antarctic squid *Kondakovia longimana* derived from isotopic analysis on beaks[J]. Polar Biology, 2018, 41(12): 2409-2421.
- [11] 方舟, 陈新军, 陆化杰, 等. 头足类角质颚研究进展 I: 形态、结构与生长[J]. 海洋渔业, 2014, 36(1): 78-89.
FANG Z, CHEN X J, LU H J, et al. Progress of beak in cephalopod I: Morphogenesis, biochemistry and growth[J]. Marine Fisheries, 2014, 36(1): 78-89.
- [12] 陈子越, 陆化杰, 童玉和, 等. 个体差异对西沙群岛海域鸢乌贼角质颚外部形态变化的影响[J]. 水产学报, 2019, 43(12): 2501-2510.
CHEN Z Y, LU H J, TONG Y H, et al. Effects of difference of individual size on beak morphology of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the Xisha Islands of South China Sea [J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(12): 2501-2510.
- [13] CASTANHARI G, TOMÁS A R G. Beak increment counts as a tool for growth studies of the common octopus *Octopus vulgaris* in southern Brazil [J]. Boletim do Instituto de Pesca, 2012, 38(4): 323-331.
- [14] PEDÀC, BATTAGLIA P, SCUDERI A, et al. Cephalopod prey in the stomach contents of odontocete cetaceans stranded in the western Mediterranean Sea [J]. Marine Biology Research, 2015, 11(6): 593-602.
- [15] 刘必林, 陈新军. 头足类角质颚的研究进展[J]. 水产学报, 2009, 33(1): 157-164.
LIU B L, CHEN X J. Review on the research development of beaks in Cephalopoda [J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(1): 157-164.
- [16] FROESE R, BINOHLAN C. Empirical relationships to estimate asymptotic length, length at first maturity and length at maximum yield per recruit in fishes, with a simple method to evaluate length frequency data [J]. Journal of Fish Biology, 2000, 56(4): 758-773.
- [17] 徐海龙, 薛薇, 谷德贤, 等. 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[J]. 水产学报, 2022, 46(2): 207-214.
XU H L, XUE W, GU D X, et al. Establishing length - weight relationship and predicting size at first maturity of *Oratosquilla oratoria* based on polyphasic model [J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(2): 207-214.
- [18] 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 [J]. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, 2017: 173-178.
- [19] 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.
- [20] KAISER H F. A second generation little jiffy [J]. Psychometrika, 1970, 35(4): 401-415.
- [21] 韩青鹏, 陆化杰, 陈新军, 等. 南海北部海域中国枪乌贼角质颚的形态学分析[J]. 南方水产科学, 2017, 13(4): 122-130.
HAN Q P, LU H J, CHEN X J, et al. Morphological analysis of beaks of *Uroteuthis chinensis* in the northern South China Sea [J]. South China Fisheries Science, 2017, 13(4): 122-130.
- [22] 赵慧琴, 石立, 刘金山, 等. SPSS 软件计算主成分分析的缺陷与纠正[J]. 统计与决策, 2020, 36(15): 56-59.
ZHAO H Q, SHI L, LIU J S, et al. Defects and correction of principal component analysis in SPSS software calculation [J]. Statistics & Decision, 2020, 36(15): 56-59.
- [23] 张聿琛, 谷德贤, 徐海龙, 等. 基于栖息地指数的渤海湾鱼卵环境适应性[J]. 中国水产科学, 2021, 28(12): 1568-1575.
ZHANG Y C, GU D X, XU H L, et al. Environmental

- adaptability of fish eggs in Bohai Bay assessed using habitat suitability index method[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(12): 1568-1575.
- [24] HUXLEY J S. Constant differential growth-ratios and their significance[J]. Nature, 1924, 114(2877): 895-896.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] DE SILVA FREITAS T M, DA CONSOLAÇÃO ALMEIDA V H, DE ASSIS MONTAG L F, 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.
- [28] 徐海龙, 赵荣荣, 梁茜, 等. 基于性腺发育阶段估算渤海湾雌性口虾姑初次性成熟体长[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(3): 721-728.
- XU H L, ZHAO R R, LIANG Q, et al. Length at first sexual maturity of female mantis shrimp (*Oratosquilla oratoria*) in Bohai Bay based on gonad[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(3): 721-728.
- [29] MESQUITA C, DOBBY H, SWEETING S, et al. Size-at-maturity of Brown Crab (*Cancer pagurus*) in Scottish waters based on gonadal and morphometric traits [J]. Fisheries Research, 2020, 229: 105610.
- [30] POLLOCK D E. Changes in maturation ages and sizes in crustacean and fish populations[J]. South African Journal of Marine Science, 1995, 15(1): 99-103.
- [31] YAMADA R, KODAMA K, YAMAKAWA T, et al. Growth and reproductive biology of the small penaeid shrimp *Trachysalambria curvirostris* in Tokyo Bay [J]. Marine Biology, 2007, 151(3): 961-971.
- [32] WAIHO K, FAZHAN H, BAYLON J C, et al. On types of sexual maturity in brachyurans, with special reference to size at the onset of sexual maturity [J]. Journal of Shellfish Research, 2017, 36(3): 807-839.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] IKICA Z, VUKOVIĆ V, ĐUROVIĆ M, et al. Analysis of beak morphometry of the horned octopus *Eledone cirrhosa*, Lamarck 1798 (Cephalopoda: Octopoda), in the south-eastern Adriatic Sea [J]. Acta Adriatica, 2014, 55(1): 43-56.
- [36] MERCER M C, MISRA R K, HURLEY G V. Sex determination of the ommastrephid squid *Illex illecebrosus* using beak morphometrics [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37(2): 283-286.
- [37] 何静茹, 陆化杰, 陈炫好, 等. 冬春季西北印度洋鸢乌贼角质颚外部形态及生长特性[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2775-2784.
- HE J R, LU H J, CHEN X Y, et al. Beak morphological and growth characteristic of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the northwest Indian Ocean in winter and spring [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2775-2784.
- [38] 徐杰, 刘尊雷, 李圣法, 等. 东海剑尖枪乌贼角质颚的外部形态及生长特性 [J]. 海洋渔业, 2016, 38(3): 245-253.
- XU J, LIU Z L, LI S F, et al. Morphology and growth characteristics of *Uroteuthis edulis* beak in the East China Sea [J]. Marine Fisheries, 2016, 38(3): 245-253.
- [39] 董正之. 世界大洋经济头足类生物学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991.
- DONG Z Z. Biology of the economic species of Cephalopods in the world oceans [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1991.
- [40] OGDEN R S, ALLCOCK A L, WATTS P C, et al. The role of beak shape in octopodid taxonomy [J]. South African Journal of Marine Science, 1998, 20(1): 29-36.
- [41] YAKUBU A, AYOADE J A. Application of principal component factor analysis in quantifying size and morphological indices of domestic rabbits [J]. International Journal of Morphology, 2009, 27(4): 1013-1017.
- [42] RIVA J, RIZZI R, MARELLI S, et al. Body measurements in Bergamasca sheep [J]. Small Ruminant Research, 2004, 55(1/3): 221-227.
- [43] 徐海龙, 许莉莉, 王芮, 等. pH、指示剂种类及用量对络合滴定法测定碳酸钙的影响 [J]. 水生态学杂志, 2016, 37(1): 9-15.
- XU H L, XU L L, WANG R, et al. Effects of pH and indicator type and concentration on calcium determination by complexometry [J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(1): 9-15.
- [44] TIPPING M E, BISHOP C M. Probabilistic principal component analysis [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology, 1999, 61(3): 611-622.
- [45] LLOYD S, MOHSENI M, REBENTROST P. Quantum principal component analysis [J]. Nature Physics, 2014, 10(9): 631-633.

Morphology of beak and effect of gender and growth stage on beak for *Loligo beka* in the Bohai bay

XU Hailong^{1,2,3}, WANG Haoqiu¹, DING Yu^{1,4}, SU Yuanyuan¹, GU Dexian⁵, XU Lili^{1,2,3}

(1. Department of Fishery Sciences, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Aquaculture and Aquaculture, Tianjin 300384, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Aquaculture and Aquaculture Education, Tianjin 300384, China; 4. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 5. Tianjin Fishery Institute, Tianjin 300221, China)

Abstract: In order to better understand the morphological growth characteristics of beak and fisheries biology, polynomial growth model was established for the relationship between mantle length and body mass for *Loligo beka* collected from fishery independent surveys by trawl net in the Bohai Bay from Jul. to Nov. 2021, and the size at first maturity was estimated. Wilcoxon rank-sum test was employed to analyze the influence of maturity and gender on the morphologic growth of beak. In addition, multivariate statistical analysis based on the principal components were applied to establish the relationships between morphologic traits of beak and mantle length or weight for *Loligo beka*. The analyses showed that polynomial growth model was more suitable for fitting the relationship between mantle length and body mass, and the sizes at first maturity was estimated at (3.522 ± 0.009) cm, (3.505 ± 0.026) cm and (3.513 ± 0.016) cm for female, male and total *Loligo beka*, respectively. There were obvious differences in the morphologic between upper beak and lower beak. Some ratios between beak length indices, such as hood length and crest length, were nearly consistent with the change of sex and sexual maturity, but others were different, such as the ratios between upper crest length and upper rostrum length and between upper hood length and upper lateral wall length, and there were significant differences in gender and sexual maturity, respectively. Taking the coefficient of determination and Akaike's information criterion (AIC) as the criterion of goodness-of-fit, the optimal relationships between morphologic indices of beak versus mantle length or weight were established by means of stepwise multiple linear regression. The information above mentioned suggested that the behavior of fishing *Loligo beka* with shorter than 3.513 cm in mantle length should be forbidden. The ratio of upper hood length and upper crest length could be used as stable beak index of the morphological characteristics of *Loligo beka*, the ratios between upper crest length and upper rostrum length and between upper hood length and upper lateral wall length could be used as the indexes of gender and sexual maturity, respectively. Besides, the relationships described by stepwise multiple linear function were more suitable for predicting the mantle length or weight on the basis of data of beak for *Loligo beka*.

Key words: *Loligo beka*; beak; phenotypic trait; multivariate statistical analysis; Bohai bay