

徐志杰,何绪刚,张美琪,等.基于池塘圈养条件的大口黑鲈生长特征与模型构建[J].华中农业大学学报,2024,43(2):30-39.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.02.004

## 基于池塘圈养条件的大口黑鲈生长特征与模型构建

徐志杰<sup>1,2</sup>,何绪刚<sup>3</sup>,张美琪<sup>1</sup>,聂可<sup>1,2</sup>,曹清<sup>1,2</sup>,江善晨<sup>1,2</sup>,牛智有<sup>1,2</sup>

1. 华中农业大学工学院,武汉 430070; 2. 农业农村部智慧养殖技术重点实验室,武汉 430070;  
3. 华中农业大学水产学院,武汉 430070

**摘要** 为掌握池塘圈养条件下大口黑鲈养殖周期的生长特征变化规律,测定体质量为(16.3±4.9)~(424.9±27.2) g生长周期内大口黑鲈的体长、全长、吻长、眼径、头长、尾柄长、头高、体高、尾柄高、体宽和体质量生长特征参数,分析其生长特征参数之间的相关性,分别建立基于支持向量回归(SVR)、径向基神经网络(RBF)和随机森林回归(RF)的体质量预测模型,将预测值与实测值拟合确定最佳模型;并运用模型拟合的方法建立各个生长特征参数的最佳生长模型。结果显示:体质量与生长特征参数均呈极显著相关性;基于支持向量回归(SVR)的体质量预测模型预测效果最佳,预测模型的决定系数 $R^2$ 为0.996,均方根误差为9.004,平均绝对误差为6.598;体质量与体长呈幂函数关系 $W=0.0127\times L^{3.224}$ ,决定系数 $R^2$ 为0.977;全长、体长、吻长和头长的最佳生长模型为Logistic模型,头高、体高、眼径和体宽最佳生长模型为Von Bertalanffy模型,体质量、尾柄长和尾柄高最佳生长模型为Gompertz模型;在养殖周期内大口黑鲈肥满度在2.26%~2.93%波动。以上结果表明,可以利用生长模型和体质量预测模型预测掌握圈养条件下大口黑鲈的生长过程,并通过精准投喂达最佳养殖效果。

**关键词** 大口黑鲈;生长特征;模型拟合;体质量预测模型

**中图分类号** S965.211 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)02-0030-10

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*),俗称加州鲈,原产于北美洲的密西西比河流域,在20世纪80年代被引入我国,并逐渐成为我国重要的水产养殖品种之一<sup>[1]</sup>。目前,大口黑鲈的养殖方式多为传统池塘养殖<sup>[2]</sup>,但这种养殖方式存在投饲率高、劳动成本高、病害频发等问题,制约了大口黑鲈养殖业的发展<sup>[3]</sup>。基于“时时打扫卫生”理念创制的池塘圈养模式,变池塘散养为圈养,养殖固形废弃物排出率高,生态、经济和社会效益等综合效益好于普通池塘养殖,成为当下备受关注的新型绿色高效养殖模式<sup>[4]</sup>。

随着人工智能的不断发展,机器学习方法已在动物体质量预测中得到广泛应用。如支持向量机(support vector machine, SVM)算法可用于构建羊的体尺参数与体质量的预测模型<sup>[5]</sup>;基于肩高、腰长、臀长、胸围和大腿宽度等牛体特征建立牛体质量的支持向量回归(support vector regression, SVR)预测模型,预测效果较好<sup>[6]</sup>。建立生长模型是了解鱼类生长规律的重要方法<sup>[7]</sup>,生长模型可以预测和分析鱼类生

长过程中的潜能和差异,养殖人员可以根据生长模型合理地制定养殖策略,提高养殖经济收益。国内对于大口黑鲈生长特性研究主要集中于幼鱼<sup>[8]</sup>,国外多对于野生或普通池塘养殖的大口黑鲈进行研究<sup>[9-10]</sup>,关于圈养条件下大口黑鲈的生长特性研究较少。

本研究以池塘圈养条件下的大口黑鲈为研究对象,测定其全长、体长、吻长、眼径、头长、尾柄长、头高、体高、尾柄高、体宽和体质量等生长特征参数,分析大口黑鲈从鱼种[(16.3±4.9) g]到商品鱼(400 g以上)的生长特征参数变化规律及各生长特征参数之间的相关性,通过模型拟合和机器学习的方法,分别建立池塘圈养条件下大口黑鲈生长模型和体质量预测模型,以期掌握大口黑鲈动态生长过程提供基础数据和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

大口黑鲈样品采捕于华中农业大学水产养殖基

收稿日期:2023-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(32172773)

徐志杰, E-mail: 996016001@qq.com

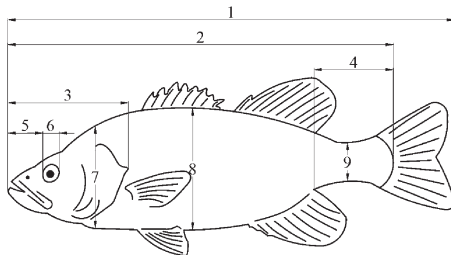
通信作者:牛智有, E-mail: nzhy@mail.hzau.edu.cn

地池塘中的1号和4号圈养桶。圈养桶上部分为直径4 m、高2 m的圆柱体,下部分为倒圆锥体。上部分为主要养殖区域,有效养殖水体为20 m<sup>3</sup>,养殖密度为2 000尾/圈(100尾/m<sup>3</sup>)。试验周期为2022年7月8日至2023年4月24日,共290 d。

## 1.2 试验方法

试验用饲料为大口黑鲈专用商业饲料(粗蛋白质≥50%,粗灰分≤18%,粗纤维≤6%,粗脂肪≥6%),每天投喂2~3次,日投喂量为养殖区域鱼总体质量的1%~3%,试验期间圈养桶平均水温为5.61~34.80℃。

2022年5月5日将大口黑鲈鱼苗放入圈养桶中进行苗种培育,设为试验鱼的养殖开始时间即第0天,养殖65 d进行第1次测定试验。每间隔15 d左右用抄网在1号和4号圈养桶各随机捕捞25尾鱼,根据气候条件适当调整捕捞时间间隔。用直尺(精确到0.01 cm)测量大口黑鲈全长、体长,用游标卡尺(精确到0.01 mm)测量眼径、吻长、头长、尾柄长、头高、体高、尾柄高、体宽(鱼体左右侧最大距离),用电子天平(精确到0.1 g)测量体质量。大口黑鲈生长特征参数如图1所示。



1. 全长;2. 体长;3. 头长;4. 尾柄长;5. 吻长;6. 眼径;7. 头高;8. 体高;9. 尾柄高。下同。1.Total length;2.Body length;3.Head length;4.Caudal length;5.Snout length;6.Eye diameter;7.Head height;8.Body height;9.Caudal stalk height.The same as below.

图1 大口黑鲈生长特征参数测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of measuring the growth characteristic parameters of largemouth bass

## 1.3 数据分析

1)大口黑鲈体质量预测模型构建。在MATLAB(MathWorks,美国)软件中进行分层抽样,将每次试验测得的50组数据,按照7:3比例划分训练集与测试集,共获得700组试验数据,其中训练集490组数据,测试集210组数据<sup>[11]</sup>。

为了消除数据的量纲影响,在MATLAB软件中根据公式(1)对数据进行归一化处理:

$$x_{\text{new}} = \frac{x - u}{s} \quad (1)$$

其中, $x_{\text{new}}$ 为归一化后参数值, $x$ 为当前参数值, $u$ 为样本数据的均值, $s$ 为样本数据的标准差。

利用Origin(OriginLab,美国)软件分析大口黑鲈体质量与各生长特征参数之间的相关性,选择与体质量相关性较高的生长特征参数作为输入变量,在MATLAB软件中利用训练集的490组数据分别建立大口黑鲈体质量的支持向量回归(SVR)、径向神经网络(radial basis function, RBF)和随机森林回归(random forest, RF)预测模型,并用测试集210组数据对大口黑鲈体质量进行预测,将预测值和实测值进行线性拟合,采用决定系数 $R^2$ 、均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、平均相对误差(mean relative error, MRE)对预测模型进行评价,确定最佳回归模型。决定系数 $R^2$ 、均方根误差RMSE(公式中以 $E_{\text{MS}}$ 表示)、平均绝对误差MAE(公式中以 $E_{\text{MA}}$ 表示)和平均相对误差MRE(公式中以 $E_{\text{MR}}$ 表示)的计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$E_{\text{MS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2} \quad (3)$$

$$E_{\text{MA}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - f_i| \quad (4)$$

$$E_{\text{MR}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - f_i|}{y_i} \quad (5)$$

其中, $n$ 为数据集样本个数; $\bar{y}$ 为体质量的平均值, $g$ ;  $y_i$ 为实测体质量, $g$ ;  $f_i$ 为预测体质量, $g$ 。

2)大口黑鲈生长模型构建及生长特征参数分析。分别用Logistic、Gompertz和Von Bertalanffy 3种生长模型<sup>[12-13]</sup>,对大口黑鲈的生长特征参数进行拟合分析,生长模型的计算公式分别如式(6)、(7)和(8)所示,根据决定系数 $R^2$ 和赤池信息准则<sup>[14]</sup>(akaike information criterion, AIC,公式中以 $A_{\text{IC}}$ 表示)选出最佳生长模型,并对大口黑鲈肥满度( $K$ )、体长( $L$ )与体质量( $W$ )的关系等进行分析,计算公式分别如式(10)和(11)。所获生长特征参数数据均用Excel 2019(Microsoft,美国)进行统计分析,结果以平均值±标准差的形式表示,并通过Origin软件进行图表制作。各计算公式如下:

$$W_i = \frac{L_{\infty}}{1 + e^{-K_0(t-t_0)}} \quad (6)$$

$$W_t = L_\infty e^{-K_0(t-t_0)} \quad (7)$$

$$W_t = L_\infty [1 - e^{-K_0(t-t_0)}]^3 \quad (8)$$

$$A_{IC} = 2k + n \ln \left( \frac{R_{SS}}{n} \right) \quad (9)$$

$$K = 100 \times \frac{W_t}{L_t^3} \quad (10)$$

$$W = aL^b \quad (11)$$

其中,  $K_0$  为生长系数;  $W_t$  为  $t$  时刻的体质量, g;  $t_0$  为假设的理论生长起点年龄, d;  $L_\infty$  为渐进体长, mm;  $W_\infty$  为渐进体质量, g;  $t$  为养殖时间, d;  $R_{SS}$  为残差平方和;  $k$  为参数数量;  $n$  为样本数量;  $K$  为肥满度, g/cm<sup>3</sup>;  $L_t$  为  $t$  时刻下的体长, mm;  $a$ 、 $b$  为常数。

## 2 结果与分析

### 2.1 生长特征参数及相关性分析

大口黑鲈不同阶段的生长特征参数如表1所示。由表1可知, 大口黑鲈在试验开始时体质量为(16.3±4.9) g, 试验结束时体质量为(424.9±27.2) g, 体质量的日均增长量和相对增长率最大, 分别为1.4 g/d和2506.7%。

大口黑鲈鱼生长特征参数之间的相关性分析结果如表2所示。由表2可知, 大口黑鲈各生长特征参数与体质量均呈现极显著正相关性( $P < 0.01$ ), 其中体高与体质量相关程度最高, 相关系数为0.976; 头高与体质量相关程度最低, 相关系数为0.644。除体质量外的其他生长特征参数之间均呈极显著相关( $P < 0.01$ ), 其中全长和体长之间相关程度最高, 相关系数为0.998, 头高和眼径之间相关程度最低, 相关系数为0.611。

### 2.2 生长特征参数变化规律与模型构建

1) 生长特征参数变化规律。大口黑鲈生长特征参数累计生长曲线如图2所示。从图2可以看出, 生长曲线均呈近似指数增长。养殖时间为65~170 d时体质量处于快速生长时期, 体质量最快增长速度出

现在养殖时间的155~170 d; 全长与体长变化规律一致, 最快增长速度均出现在养殖时间的140~155 d, 在养殖的230 d后生长速度基本趋近于0。吻长、头长、头高、体高、体宽、眼径、尾柄高等最快增长速度均出现在养殖时间的65~80 d, 尾柄长最快增长速度出现在80~95 d, 其中吻长、头长、体高、体宽、尾柄长、尾柄高在养殖的155~170 d再次出现较大幅度增长。

对测得的大口黑鲈的体长、体质量用幂函数  $W = aL^b$  进行拟合。拟合结果如图3所示。拟合得到体长与体质量的关系为:  $W = 0.0127 \times L^{3.224}$ , 决定系数  $R^2$  为0.977。拟合所得方程中,  $b$  为3.224。

2) 生长模型的构建。分别用 Logistic、Von Bertalanffy 和 Gompertz 3种生长模型拟合各生长特征参数累计生长曲线, 拟合得到的生长模型参数结果如表3所示。由表3可知, 各生长特征参数拟合所得模型决定系数  $R^2$  均大于0.970。根据 AIC 最小原则选择各生长特征参数的最佳拟合模型, 结果如下: 全长、体长、吻长和头长的最佳生长模型为 Logistic 模型; 头高、体高、眼径和体宽最佳生长模型为 Von Bertalanffy 模型; 体质量、尾柄长和尾柄高最佳生长模型为 Gompertz 模型。

为更直观地比较3种生长模型的拟合效果, 将养殖时间代入生长模型方程式算出模型拟合值, 将拟合值与实测值进行比较, 采用平均绝对误差 MAE 和平均相对误差 MRE 进行评价。结果如表4所示, 各生长特征参数的3种生长模型误差均较小, 综合对比模型选择与表3所得结论一致。

### 2.3 生长速度与肥满度的变化规律

生长模型方程都是积分曲线, 仅反映生长过程的总和, 为进一步探究鱼类生长过程变化特征, 分别对生长模型方程进行一次微分得到生长速度, 分别如图4和图5所示。从图4可看出体质量、全长和体

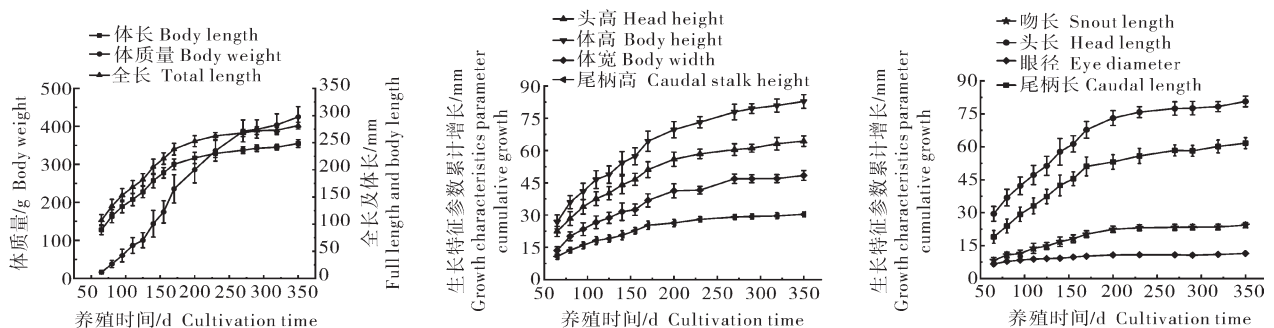


图2 大口黑鲈生长特征参数累计生长曲线

Fig.2 Cumulative growth curve of largemouth bass growth characteristic parameters

表 1 大口黑鲈不同时期生长特征参数的统计量  
Table 1 Growth characteristic parameters statistics of largemouth bass in different periods

项目 Item	体质量/g Body weight ( $X_1$ )	全长/mm Total length ( $X_2$ )	体长/mm Body length ( $X_3$ )	吻长/mm Snout length ( $X_4$ )	眼径/mm Eye diameter ( $X_5$ )	头长/mm Head length ( $X_6$ )	尾柄长/mm Caudal length ( $X_7$ )	头高/mm Head height ( $X_8$ )	体高/mm Body height ( $X_9$ )	尾柄高/mm Caudal stalk height ( $X_{10}$ )	体宽/mm Body width ( $X_{11}$ )
养殖时间/d Days of cultivation											
65	16.30±4.90	107.10±10.40	89.50±9.10	8.24±1.38	6.62±0.94	29.48±3.35	18.96±2.91	22.42±2.36	26.81±3.25	13.57±1.75	13.56±1.75
80	38.10±9.60	133.20±12.30	114.60±11.90	10.75±1.28	7.82±0.84	36.85±3.79	23.95±3.16	28.36±3.20	35.97±3.05	20.13±2.04	20.13±2.04
95	60.30±16.70	153.20±12.20	132.30±11.60	11.41±1.53	8.37±0.71	42.23±4.02	29.26±3.29	33.83±3.36	41.02±3.80	23.44±2.98	23.43±2.98
110	86.70±20.60	168.20±11.90	145.30±11.40	13.77±2.31	8.86±0.76	47.16±4.38	33.10±3.61	37.60±3.18	46.49±4.16	26.65±2.96	26.65±2.95
125	100.50±20.00	182.00±11.10	159.30±10.50	14.78±1.61	9.09±0.60	51.34±4.33	37.38±3.26	40.14±3.02	48.84±4.03	28.69±2.60	28.68±2.59
140	143.90±35.10	205.50±14.00	180.10±13.40	16.75±2.15	9.24±0.71	57.74±6.06	42.40±4.74	44.04±4.14	54.22±5.29	31.57±4.05	31.57±4.05
155	174.90±29.30	220.70±10.50	194.40±9.70	18.10±1.80	9.77±0.74	61.31±3.70	45.45±3.16	46.59±2.80	64.34±4.71	32.61±2.64	32.51±2.64
170	235.60±37.20	238.10±10.70	210.10±10.00	20.22±1.52	10.24±0.49	67.76±3.78	51.08±4.30	51.10±3.68	64.34±4.70	36.82±3.03	36.82±3.03
200	286.00±34.50	252.80±10.00	221.90±10.30	22.41±1.47	10.74±0.57	73.10±3.36	53.09±3.30	55.94±3.32	69.67±3.74	41.26±3.27	41.25±3.26
230	335.80±27.20	262.50±6.10	230.10±7.30	23.12±1.33	10.81±0.63	75.79±2.50	55.85±3.45	58.45±2.20	73.14±2.59	41.57±1.77	41.57±1.77
270	387.10±27.80	267.90±6.60	236.10±6.30	23.31±1.39	10.83±0.53	77.45±3.01	58.35±2.55	60.43±2.71	77.90±3.62	46.87±2.20	46.87±2.20
290	392.10±22.90	272.10±7.00	239.70±6.00	23.40±1.24	10.63±0.49	77.61±3.08	58.16±2.50	61.07±1.82	79.50±2.22	46.91±1.82	46.91±1.82
319	403.90±25.40	273.00±5.30	241.60±5.20	23.47±1.30	10.96±0.41	78.31±2.31	60.16±2.92	63.16±2.90	80.93±3.04	46.96±1.84	46.96±1.84
350	424.90±27.20	281.50±6.20	248.50±7.10	24.33±1.16	11.45±0.48	80.67±2.44	61.65±2.54	61.38±2.45	82.83±3.19	48.42±2.28	48.42±2.28
日均增长量 Daily increment	1.40	0.61	0.56	0.05	0.01	0.18	0.15	0.14	0.20	0.12	0.12
相对增长率/% Relative growth rate	2 506.74	162.83	177.65	195.26	72.96	173.64	225.15	173.77	280.95	256.81	254.72



表2 生长特征参数相关性

Table 2 Correlation of growth characteristic parameters

参数 Parameter	体质量 $X_1$	全长 $X_2$	体长 $X_3$	吻长 $X_4$	眼径 $X_5$	头长 $X_6$	尾柄长 $X_7$	头高 $X_8$	体高 $X_9$	尾柄高 $X_{10}$	体宽 $X_{11}$
体质量 $X_1$											
全长 $X_2$	0.957**										
体长 $X_3$	0.955**	0.998**									
吻长 $X_4$	0.937**	0.972**	0.970**								
眼径 $X_5$	0.851**	0.900**	0.900**	0.879**							
头长 $X_6$	0.955**	0.991**	0.990**	0.976**	0.900**						
尾柄长 $X_7$	0.947**	0.983**	0.983**	0.956**	0.881**	0.975**					
头高 $X_8$	0.644**	0.673**	0.672**	0.652**	0.611**	0.666**	0.669**				
体高 $X_9$	0.976**	0.980**	0.979**	0.958**	0.895**	0.978**	0.970**	0.664**			
尾柄高 $X_{10}$	0.956**	0.978**	0.977**	0.957**	0.898**	0.978**	0.965**	0.659**	0.981**		
体宽 $X_{11}$	0.967**	0.972**	0.971**	0.947**	0.887**	0.969**	0.962**	0.662**	0.988**	0.972**	

注:\*\*表示极显著( $P<0.01$ )。Note:\*\* means extremely significant.

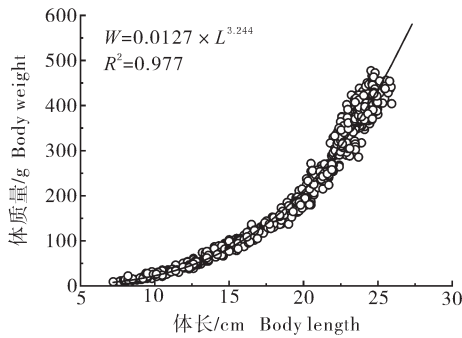


图3 大口黑鲈体长与体质量的关系

Fig.3 Relationship between body length and body weight of largemouth bass

长的生长速度曲线随养殖时间的增加先增大后减小,呈现一种单峰状,在峰顶前一段养殖时间内为上述生长特征参数的快速生长期。从图5可看出尾柄长、头长和吻长的生长速度曲线随养殖时间的增加先增大后减小;眼径、头高、体高、尾柄高、体宽生长速度随着养殖时间的增加而减小,试验开始时生长速度最大,表明在试验开始前已经渡过快速生长期。Logistic模型、Von Bertalanffy模型、Gompertz模型对应的拐点坐标分别为 $(t_0, L_\infty/2)$ 、 $(\ln 3/K_0 + t_0, 8L_\infty/27)$ 、 $(t_0, L_\infty/e)$ ,算得体质量、全长、体长、头长、吻长、尾柄长的生长拐点分别为(145 d, 163.20 g)、(87 d, 139.28 mm)、(89 d, 122.62 mm)、(91 d, 40.14 mm)、(97 d, 12.11 mm)、(76 d, 22.66 mm)。

大口黑鲈肥满度随养殖时间的变化曲线如图6所示。从图6可看出,在整个养殖期间大口黑鲈肥满度在2.26%~2.93%波动,随着养殖时间的增加,肥满度总体呈上升趋势。

## 2.4 体质量预测模型构建与验证

各生长特征参数均与体质量有较高的相关性,均作为输入变量,分别建立基于支持向量回归(SVR)、径向基神经网络(RBF)和随机森林回归(RF)的体质量预测模型,3种预测模型预测结果如表5所示。从表5可以看出,支持向量回归(SVR)预测模型的决定系数 $R^2$ 最大,其均方根误差RMSE、平均绝对误差MAE和平均相对误差MRE最小。

为直观比较3种模型的预测结果,分别以实测值为横坐标,模型预测值为纵坐标绘制了散点图,建立预测值与实测值一元线性回归方程(图7)。从图7可以看出,支持向量回归(SVR)模型的预测值与实测值之间具有最好的相关性。

## 3 讨论

### 3.1 大口黑鲈体长与体质量关系

在鱼类研究中鱼类体长与体质量的关系常用幂函数方程来表达: $W = aL^b$ <sup>[15]</sup>。本研究得出零排放圈养条件下大口黑鲈体长与体质量关系方程为 $W = 0.0127 \times L^{3.224}$ ,其中参数 $a$ 为0.0127, $b$ 为3.224。参数 $b$ 大于3,表明大口黑鲈为正异速增长,即生长过程中体长增长速度慢于体质量增加速度。本研究结果与莫介化等<sup>[16]</sup>研究的工厂化循环水养殖的大口黑鲈( $b=3.208 \sim 3.250$ )结果相似,而与贾松鹏等<sup>[2]</sup>研究的陆基推水集装箱养殖的大口黑鲈( $b=3.515$ )以及韩晓磊等<sup>[17]</sup>研究的工厂化循环水养殖的大口黑鲈( $b=3.045$ )结果有较大差异,究其原因主要是养殖环境和饲养条件不同<sup>[18-19]</sup>。

表3 3种生长模型参数模拟结果  
Table 3 The results of three growth model parameters

生长特征参数 Growth characteristic parameter	模型 Model	$L_{\infty}$	$K_0$	$t_0$	$R^2$	AIC
体质量 $X_1$	Logistic	415.56	0.025 2	166.36	0.996	65.82
	Gompertz	443.60	0.014 9	145.56	0.997	62.75
	Bertalanffy	466.09	0.011 5	37.84	0.995	69.97
全长 $X_2$	Logistic	278.56	0.019 6	87.14	0.996	39.10
	Gompertz	282.83	0.015 1	63.46	0.995	42.99
	Bertalanffy	284.88	0.013 5	-28.21	0.994	45.18
体长 $X_3$	Logistic	245.23	0.020 2	89.66	0.996	37.34
	Gompertz	249.08	0.015 4	66.35	0.994	39.71
	Bertalanffy	256.16	0.010 8	26.82	0.992	46.70
吻长 $X_4$	Logistic	24.22	0.020 4	97.46	0.992	-15.33
	Gompertz	24.67	0.015 1	73.27	0.988	-9.61
	Bertalanffy	24.90	0.013 4	-19.91	0.986	-7.49
眼径 $X_5$	Logistic	11.11	0.017 6	36.80	0.973	-36.45
	Gompertz	11.15	0.015 3	18.06	0.974	-37.41
	Bertalanffy	11.17	0.014 6	-64.50	0.975	-37.52
头长 $X_6$	Logistic	80.14	0.019 8	91.15	0.996	5.65
	Gompertz	81.47	0.015 0	67.09	0.994	11.50
	Bertalanffy	82.13	0.013 4	-25.95	0.993	14.04
尾柄长 $X_7$	Logistic	60.38	0.021 1	100.12	0.996	2.12
	Gompertz	61.60	0.015 5	76.67	0.996	1.69
	Bertalanffy	62.22	0.013 7	-14.67	0.995	3.56
头高 $X_8$	Logistic	63.97	0.071 5	93.69	0.995	2.59
	Gompertz	65.30	0.013 2	67.30	0.996	-2.12
	Bertalanffy	65.96	0.011 8	-38.02	0.996	-2.75
体高 $X_9$	Logistic	83.22	0.016 4	100.81	0.994	13.27
	Gompertz	85.49	0.012 0	72.28	0.996	9.31
	Bertalanffy	86.65	0.010 6	-44.94	0.996	8.69
尾柄高 $X_{10}$	Logistic	30.26	0.018 3	92.51	0.994	-16.23
	Gompertz	30.83	0.013 8	67.05	0.994	-16.88
	Bertalanffy	31.11	0.012 4	-33.18	0.994	-16.13
体宽 $X_{11}$	Logistic	48.59	0.017 2	104.92	0.987	10.90
	Gompertz	49.84	0.012 7	77.32	0.990	7.35
	Bertalanffy	50.48	0.011 2	-34.35	0.991	6.29

注:  $L_{\infty}$ 表示理论渐进生长值;  $K_0$ 表示生长系数;  $t_0$ 表示假设的理论生长起点年龄。Note:  $L_{\infty}$  represents the theoretical asymptotic growth value;  $K_0$  represents the growth coefficient;  $t_0$  represents t assumed theoretical age at the start of growth.

### 3.2 大口黑鲈各生长特征参数最佳生长模型

鱼类的生长发育受到遗传、环境和营养水平等多种因素的影响,在同一个地区鱼类养殖方式基本固定,并且来自遗传和环境的影响相对稳定,生长规律也会相对稳定<sup>[20]</sup>。本研究结果显示,大口黑鲈体质量最佳生长模型为Gompertz模型,拐点处体质量为163.2 g;体长最佳生长模型为Logistic模型,拐点处体长为12.26 cm。而何小燕等<sup>[21]</sup>研究了网箱养殖

的大口黑鲈早期生长发育规律,结果表明采用Logistic生长模型能很好地拟合大口黑鲈体质量和体长的早期生长,拐点处体质量为146.35 g、体长为13.75 cm,与本研究结果有差异,原因是大口黑鲈养殖环境、饲养条件和试验时的生长阶段不同<sup>[22]</sup>,本研究的大口黑鲈试验结束时已渡过快速生长阶段。在大口黑鲈的养殖过程中,根据大口黑鲈的生长规律,通过对生长拐点的把握,精准投喂饲料,科学日常管理,

表4 各生长特征参数生长模型误差对比

Table 4 Comparison of growth model errors of each growth characteristic parameter

生长特征参数 Growth characteristic parameter	平均绝对误差MAE			平均相对误差MRE		
	Logistic	Gompertz	Bertalanffy	Logistic	Gompertz	Bertalanffy
体质量 $X_1$	6.731 3 g	6.293 4 g	8.745 1 g	0.095 5	0.053 9	0.100 8
全长 $X_2$	2.648 9 mm	3.028 4 mm	3.253 4 mm	0.013 7	0.014 8	0.016 1
体长 $X_3$	2.552 5 mm	2.624 3 mm	3.398 1 mm	0.015 6	0.014 9	0.020 0
吻长 $X_4$	0.409 1 mm	0.492 6 mm	0.533 8 mm	0.024 0	0.030 3	0.033 2
眼径 $X_5$	0.191 2 mm	0.187 9 mm	0.186 5 mm	0.020 5	0.019 9	0.019 7
头长 $X_6$	0.882 8 mm	1.022 9 mm	1.109 1 mm	0.015 3	0.017 4	0.019 2
尾柄长 $X_7$	0.702 5 mm	0.581 8 mm	0.598 2 mm	0.015 5	0.013 4	0.014 5
头高 $X_8$	0.753 7 mm	0.684 3 mm	0.657 6 mm	0.019 0	0.016 3	0.015 2
体高 $X_9$	1.033 7 mm	0.929 9 mm	0.902 4 mm	0.023 5	0.020 6	0.019 5
尾柄高 $X_{10}$	0.941 7 mm	0.865 3 mm	0.851 4 mm	0.037 5	0.032 7	0.031 2
体宽 $X_{11}$	0.370 6 mm	0.338 6 mm	0.336 1 mm	0.019 6	0.016 8	0.016 0

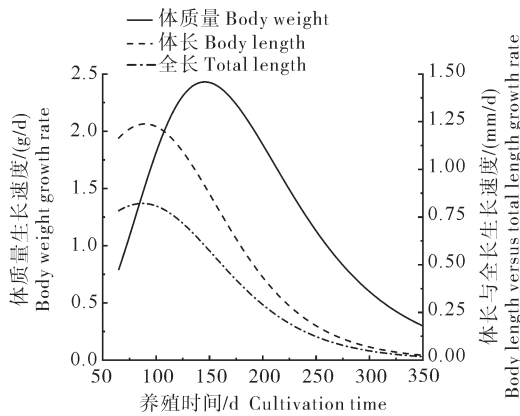


图4 大口黑鲈体质量、体长和全长的生长速度与养殖时间的关系

Fig.4 Relationship between the growth rate of largemouth bass body weight, body length and total length and cultivation time

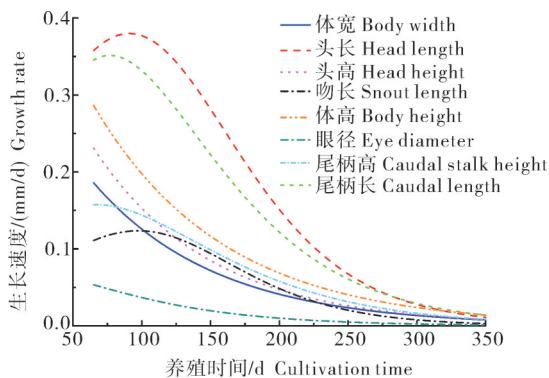


图5 大口黑鲈除体质量、全长和体长外其他生长特征参数的生长速度与养殖时间的关系

Fig.5 Relationship between the growth rate of largemouth bass except body weight, total length and body length and cultivation time

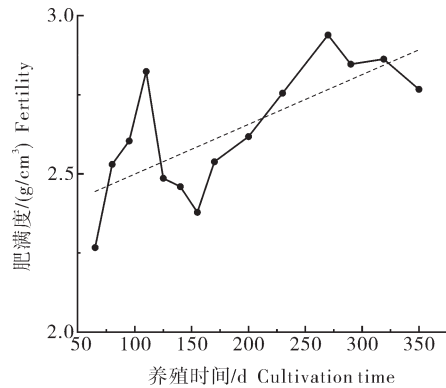


图6 大口黑鲈肥满度与养殖时间的关系

Fig.6 Relationship between fertility and cultivation time of largemouth bass

表5 3种模型预测结果

Table 5 Predictive results of three models

模型 Model	决定系数 $R^2$	均方根误差RMSE	平均绝对误差/g MAE	平均相对误差 MRE
支持向量回归SVR	0.996	9.004	6.598	0.039
径向基神经网络RBF	0.993	11.885	8.206	0.062
随机森林回归RF	0.995	10.171	7.042	0.041

可以达到最佳的养殖效果,创造最大的经济效益。

### 3.3 大口黑鲈肥满度

肥满度又称为条件系数,是反映鱼类营养状况和生理健康的重要指标,可用于分析鱼体型肥瘦程度与饲养条件下个体营养吸收状况<sup>[23]</sup>。林军等<sup>[24]</sup>研究表明长江口雌性凤鲊(*Coilia mystus*)的肥满度均值为0.32,雄性为0.37;廖传松等<sup>[25]</sup>研究表明三峡水库的光泽黄颡鱼[*Pelteobagrus nitidus* (Sauvage et Dabry)]肥满度为1.063。推测鱼的肥满度还受到体型和性别的影响。本研究是在池塘圈

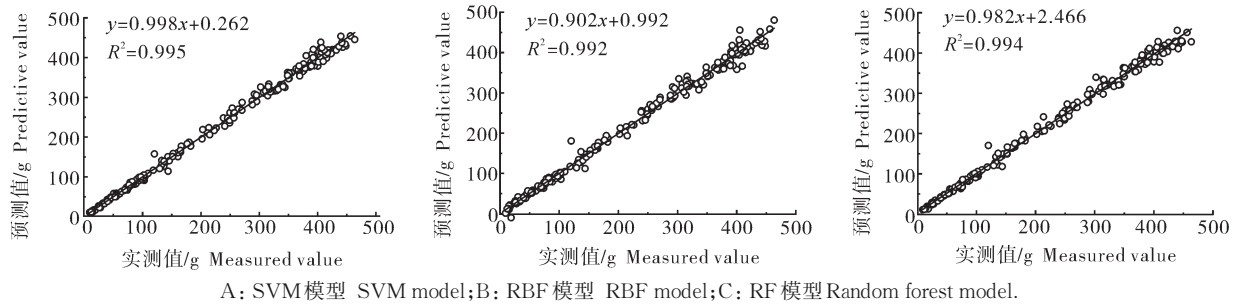


图7 大口黑鲈体质量实测值与各模型预测值比较

Fig.7 Comparison between the measured body mass of largemouth bass and the predicted value of each model

养条件下测定分析大口黑鲈的肥满度(2.26~2.93),影响大口黑鲈的可食用部分因素众多,还需要对大口黑鲈的形体和营养指标进行进一步测定和分析<sup>[26]</sup>。

### 3.4 大口黑鲈生长特征参数相关性及体质量回归模型

本研究生长特征参数与体质量相关性分析结果表明,大口黑鲈各生长特征参数与体质量均呈极显著相关性。何小燕等<sup>[27]</sup>研究表明体质量在431.0~967.5 g的大口黑鲈体宽与体质量相关性最高,吻长与体质量相关性最低。王新安等<sup>[28]</sup>研究发现,大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)幼鱼全长是影响体质量的主要因素。以上研究结果与本研究存在一定差异,表明鱼类生长特征参数与体质量之间的相关性物种和生长阶段等因素有关。

在鱼体质量预测研究中,主要通过建立各生长参数与体质量的一元或多元回归模型,实现对体质量的预测<sup>[29-30]</sup>。但对于生长特征参数之间存在多重共线性和部分生长特征参数与体质量存在非线性关系的情况,采用简单的线性回归分析拟合效果较差。本研究采用了支持向量回归(SVR)、径向基神经网络(RBF)和随机森林回归(RF)3种机器学习方法,建立了大口黑鲈的体质量预测模型,并对模型精度进行评估。该方法能够容纳多重共线性和能够处理大量特征变量与体质量之间的复杂非线性关系。结果表明基于10项生长特征参数所建立的体质量支持向量回归(SVR)预测模型的预测结果最准确。本研究基于对各生长特征参数的生长模型和体质量预测模型,可为大口黑鲈圈养条件下生长参数和生产效应的无接触性预测提供理论基础。

### 参考文献References

[1] BAI J J, LUTZ-CARRILLO D J, QUAN Y C, et al. Taxonomic status and genetic diversity of cultured largemouth bass

*Micropterus salmoides* in China[J]. Aquaculture, 2008, 278(1/2/3/4):27-30.

[2] 贾松鹏,王磊,徐双阳,等.陆基推水集装箱养殖大口黑鲈生长特点分析[J].水产科学,2022,41(4):622-628. JIA S P, WANG L, XU S Y, et al. Growth characteristics of largemouth bass *Micropterus salmoides* cultured in land-based container with recycling water[J]. Fisheries science, 2022, 41(4): 622-628 (in Chinese with English abstract).

[3] 张振东,肖友红,范玉华,等.池塘工程化循环水养殖模式发展现状简析[J].中国水产,2019(5):34-37. ZHANG Z D, XIAO Y H, FAN Y H, et al. Brief analysis on the development status of engineering circulating water culture mode in pond[J]. China fisheries, 2019(5):34-37 (in Chinese).

[4] 何绪刚,侯杰.池塘圈养模式研究进展[J].华中农业大学学报,2021,40(3):21-29. HE X G, HOU J. Research progress on pond Juanyang mode[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(3):21-29 (in Chinese with English abstract).

[5] 张丽娜.基于跨视角机器视觉的羊只体尺参数测量方法研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017. ZHANG L N. Study on sheep's body size measurement based on cross-angle computer vision[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).

[6] ALONSO J, CASTAÑÓN Á R, BAHAMONDE A. Support vector regression to predict carcass weight in beef cattle in advance of the slaughter[J]. Computers and electronics in agriculture, 2013, 91:116-120.

[7] 朱书礼,李新辉,李跃飞,等.珠江中下游广东鲂种群结构及生长的空间差异[J].华中农业大学学报,2023,42(1):75-81. ZHU S L, LI X H, LI Y F, et al. Population structure and growth differences of *Megalobrama terminalis* from different water areas in middle and lower reaches of Pearl River[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(1):75-81 (in Chinese with English abstract).

[8] 孙洪庆,王洋,杨广,等.投喂频率对大口黑鲈幼鱼生长及消化的影响[J].饲料工业,2023,44(20):58-65. SUN H Q, WANG Y, YANG G, et al. Effect of feeding frequency on growth and digestion of *Micropterus salmoides*[J]. Feed industry, 2023, 44(20):58-65 (in Chinese with English abstract).



- [9] BEAMESDERFER R C P, NORTH J A. Growth, natural mortality, and predicted response to fishing for largemouth bass and smallmouth bass populations in North America [J]. North American journal of fisheries management, 1995, 15 (3):688-704.
- [10] NAKAMURA T, KATANO O, YAMAMOTO S. Effects of water flow and water temperature on the growth of smallmouth bass *Micropterus dolomieu* and largemouth bass *M. salmoides* [J]. Nippon Suisan gakkaiishi, 2004, 70(5):745-749.
- [11] HAO Y F, YIN H J, LI D L. A novel method of fish tail fin removal for mass estimation using computer vision [J/OL]. Computers and electronics in agriculture, 2022, 193:106601 [2023-10-31]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2021.106601>.
- [12] KATSANEVAKIS S. Modelling fish growth: model selection, multi-model inference and model selection uncertainty [J]. Fisheries research, 2006, 81(2/3):229-235.
- [13] JAKES-COTA U, CHAVÉZ-ARELLANO R, SEPULVEDA C, et al. Estimating age and growth of roosterfish (*Nemastilus pectoralis*) from otoliths [J/OL]. Fisheries research, 2021, 240:105958 [2023-10-31]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2021.105958>.
- [14] PLANQUE B, BELLIER E, LAZURE P. Modelling potential spawning habitat of sardine (*Sardina pilchardus*) and anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Bay of Biscay [J]. Fisheries oceanography, 2007, 16(1):16-30.
- [15] 黄真理, 常剑波. 鱼类体长与体重关系中的分形特征 [J]. 水生生物学报, 1999, 23(4):330-336. HUANG Z L, CHANG J B. Fractal characteristics of length-weight relationship in fish [J]. Acta hydrobiologica sinica, 1999, 23(4):330-336 (in Chinese with English abstract).
- [16] 莫介化, 李春枝, 王晓斌, 等. 不同养殖密度大口黑鲈在室内工厂化循环水养殖系统中的生长特性 [J]. 淡水渔业, 2022, 52(3):98-104. MO J H, LI C Z, WANG X B, et al. The growth characteristics of *Micropterus salmoides* with different stocking densities in indoor recirculating aquaculture system (RAS) [J]. Freshwater fisheries, 2022, 52(3):98-104 (in Chinese with English abstract).
- [17] 韩晓磊, 王浩, 高俊杰, 等. 工厂化循环水养殖条件下大口黑鲈生长特点分析 [J]. 水产科学, 2020, 39(4):567-572. HAN X L, WANG H, GAO J J, et al. Analysis of growth characteristics of largemouth bass *Micropterus salmoides* in a recirculating aquaculture system (RAS) [J]. Fisheries science, 2020, 39(4):567-572 (in Chinese with English abstract).
- [18] 张奇, 侯杰, 杨军, 等. 池塘圈养密度对大口黑鲈生长性能和健康状况的影响 [J]. 水生生物学报, 2022, 46(5):671-678. ZHANG Q, HOU J, YANG J, et al. Captive density on growth performance and health status of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Acta hydrobiologica sinica, 2022, 46(5):671-678 (in Chinese with English abstract).
- [19] 刘宇岩, 李凤辉, 朱文静, 等. 狼鲛幼鱼生长特性的研究 [J]. 水产科学, 2022, 41(4):629-635. LIU Y Y, LI F H, ZHU W J, et al. Growth characteristics of juvenile wolf eel *Anarrhichthys ocellatus* [J]. Fisheries science, 2022, 41(4):629-635 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王学耕, 余杰, 苗玉涛, 等. 云斑尖塘鳢研究进展与前景展望 [J]. 水产学报, 2023, 47(6):3-18. WANG X G, YU J, MIAO Y T, et al. Research progress and prospect of marble goby (*Oxyeleotris marmorata*) [J]. Journal of fisheries of China, 2023, 47(6):3-18 (in Chinese with English abstract).
- [21] 何小燕, 白俊杰, 樊佳佳, 等. 大口黑鲈早期生长发育规律的研究 [J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(1):23-29. HE X Y, BAI J J, FAN J J, et al. Analysis of fitting growth model in early stages of largemouth bass *Micropterus salmoides* [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2011, 26(1):23-29 (in Chinese with English abstract).
- [22] 姜作发, 尹家胜, 徐伟, 等. 人工养殖条件下哲罗鱼生长的初步研究 [J]. 水产学报, 2003, 27(6):590-594. JIANG Z F, YIN J S, XU W, et al. A preliminary study on the growth of *Hucho taimen* under artificial rearing conditions [J]. Journal of fisheries of China, 2003, 27(6):590-594 (in Chinese with English abstract).
- [23] 祖岫杰, 刘艳辉, 李改娟, 等. 二龄拉氏鲮在池塘养殖条件下的生长特性 [J]. 渔业现代化, 2015, 42(4):26-29. ZU X J, LIU Y H, LI G J, et al. The pond culture and growth performances of two-year *Phoxinus lagowskii* Dybowski [J]. Fishery modernization, 2015, 42(4):26-29 (in Chinese with English abstract).
- [24] 林军, 李增光, 万荣, 等. 长江口凤鲚产卵群体繁殖力特征 [J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(5):1023-1031. LIN J, LI Z G, WAN R, et al. Fecundity characteristics of spawning stocks of *Coilia mystus* in Yangtze Estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(5):1023-1031 (in Chinese with English abstract).
- [25] 廖传松, 李为, 苑晶, 等. 三峡水库光泽黄颡鱼年龄、生长与死亡特征研究 [J]. 水生生物学报, 2022, 46(1):29-36. LIAO C S, LI W, YUAN J, et al. Age, growth, and mortality characteristics of *Pelteobagrus nitidus* (Sauvage et Dabry) in the Three Gorges Reservoir [J]. Acta hydrobiologica sinica, 2022, 46(1):29-36 (in Chinese with English abstract).
- [26] 汪福保, 孙成飞, 董浚键, 等. 投喂配合饲料和活饵对翘嘴鲻形体和肌肉品质的影响 [J]. 淡水渔业, 2022, 52(6):102-111. WANG F B, SUN C F, DONG J J, et al. Effects of compound feed and live bait on the nutrient composition and meat quality of *Siniperca chuatsi* [J]. Freshwater fisheries, 2022, 52(6):102-111 (in Chinese with English abstract).
- [27] 何小燕, 刘小林, 白俊杰, 等. 大口黑鲈形态性状对体重的影响效果分析 [J]. 水产学报, 2009, 33(4):597-603. HE X Y, LIU X L, BAI J J, et al. Effect analysis of morphological characters on body weight of largemouth bass [J]. Journal of fisheries of China, 2009, 33(4):597-603 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- [28] 王新安, 马爱军, 许可, 等. 大菱鲂幼鱼表型形态性状与体重之间的关系[J]. 动物学报, 2008, 54(3): 540-545. WANG X A, MA A J, XU K, et al. Relationship between morphometric attributes and body weight of juvenile turbot *Scophthalmus maximus* [J]. Acta zoologica sinica, 2008, 54(3): 540-545 (in Chinese with English abstract).
- [29] 李银康, 钟金香, 鲍虞园, 等. 中国鲞幼鲞形态性状与体重的通径分析及异速生长研究[J]. 水产学报, 2023, 47(4): 113-121. LI Y K, ZHONG J X, BAO Y Y, et al. Path analysis and allometric growth of morphological characters and body mass of juvenile *Tachypleus tridentatus* [J]. Journal of fisheries of China, 2023, 47(4): 113-121 (in Chinese with English abstract).
- [30] 李艳慧, 陈生熬, 程勇. 叶尔羌高原鳊形态性状与体重的通径分析及曲线拟合[J]. 中国水产科学, 2022, 29(1): 49-57. LI Y H, CHEN S A, CHENG Y. Path analysis and growth curve fitting of morphological traits and body weight of *Triplophysa yarkandensi* [J]. Journal of fishery sciences of China, 2022, 29(1): 49-57 (in Chinese with English abstract).

## Growth characteristics and model construction of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) based on pond captivity

XU Zhijie<sup>1,2</sup>, HE Xugang<sup>3</sup>, ZHANG Meiqi<sup>1</sup>, NIE Ke<sup>1,2</sup>, CAO Qing<sup>1,2</sup>, JIANG Shanchen<sup>1,2</sup>, NIU Zhiyou<sup>1,2</sup>

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Smart Farming for Agricultural Animals, Wuhan 430070, China;

3. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract** To investigate the growth characteristics and patterns of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) during pond cultivation, various growth parameters including length, total length, snout length, eye diameter, head length, caudal peduncle length, head height, body height, caudal peduncle height, body width, and body mass were measured from individuals ranging from (16.3±4.9) g to (424.9±27.2) g. The correlations among these growth parameters were analyzed, and the predictive models for body mass were constructed using support vector regression (SVR), radial basis function neural network (RBF), and random forest regression (RF). The best-fit model was determined by comparing the predicted values with the actual measured values. Optimal growth models were also developed for each growth parameter using model-fitting approach. The results revealed a highly significant correlation between body mass and growth parameters. The SVR-based predictive model exhibited the highest accuracy, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.996, a root mean square error (RMSE) of 9.004, and a mean absolute error (MAE) of 6.598. A power function relationship was observed between body mass and body length, with an equation of  $W=0.0127 \times L^{3.224}$  and a  $R^2$  of 0.977. The Logistic models were the best for total length, body length, snout length, and head length. Von Bertalanffy models were the best models for head height, body height, eye diameter, and body width, while Gompertz models were most suitable for body mass, caudal peduncle length, and caudal peduncle height. The condition factor of largemouth bass fluctuated from 2.26% to 2.93% during the cultivation period. These findings suggest that growth models and body mass predictive models can be utilized to understand the growth process of largemouth bass under pond-cultured conditions. Accurate feeding based on these models can lead to optimal cultivation outcomes.

**Keywords** *Micropterus salmoides*; growth characteristics; model fitting; body mass prediction model

(责任编辑:边书京)