

文章编号: 1000-0615(2018)06-0932-09

DOI: 10.11964/jfc.20170710891

## 基于C-R模型比较大菱鲂快速生长品系和 普通养殖群体的生长特征

王新安<sup>1,2</sup>, 马爱军<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室,

青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋生物学与生物技术功能实验室, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 大规模家系选育技术也称为现代育种技术, 具有选择效率高、可抑制遗传衰退等优点, 是进行分子辅助育种技术的基础。基于此, 采用这项技术开展了大菱鲂快速生长性状遗传改良研究。为了系统评估大菱鲂快速生长选育的育种成效, 运用C-R模型分别对选育出的大菱鲂快速生长品系和普通养殖群体的非线性生长曲线进行了拟合和比较分析, 深入揭示选育出的大菱鲂快速生长品系和普通养殖群体的生长差异。研究结果显示, 快速生长品系和普通养殖群体C-R模型的拟合度、拐点月龄、拐点体质量、最大月增体质量分别为0.999和0.997、15.228和16.858月龄、716.712和619.862 g、111.711和78.061 g; 快速生长品系的瞬时生长率、瞬时生长加速度、相对生长率分别在4.5~25月龄、3~13.8月龄、3~15月龄, 高于普通养殖群体, 在其他相应阶段, 快速生长品系的瞬时生长率和瞬时生长加速度低于普通养殖群体, 而相对生长率无显著差异; 快速生长品系的始速点、拐点和终速点均比普通养殖群体提前, 并且快速生长期时间区间长度(12.35月龄)小于普通养殖群体(15.28月龄), 其对应的体质量区间长度(1 187.680 g)大于普通养殖群体(1 027.120 g), 即基于家系选育技术获得的大菱鲂快速生长品系在较短的快速生长时间区间范围内, 获得了更大的净增体质量, 取得了更大的遗传进展。

**关键词:** 大菱鲂; C-R模型; 快速生长品系; 生长特征

中图分类号: S 965.3

文献标志码: A

大菱鲂(*Scophthalmus maximus*)是原产于欧洲的一种优质鲆鲽鱼种, 具有生长速率快、肉质鲜美等优点<sup>[1]</sup>。1992年, 黄海水产研究所将其引入中国, 经过一系列开发研究, 目前已成为北方沿海工厂化养殖业的主导品种<sup>[2-6]</sup>。由于大菱鲂是引进种, 亲本数量较少, 群体种类也较为单一; 此外, 国内在早期进行大菱鲂繁育时, 缺乏严格的亲鱼管理计划, 结果导致近亲交配, 加之累代养殖, 因此国内大菱鲂的种质退化较为严重。在繁育及养殖过程中, 生长速率减慢、成活率低、抗逆性变差等种质退化现象

不断发生<sup>[2-9]</sup>。基于大菱鲂产业的发展现状, 对其生长、成活率等重要经济性性状进行遗传改良, 选育出优质、高产的新品种, 是维持大菱鲂产业可持续发展的重要保障。

国家“十一五”期间, 黄海水产研究所采用大规模家系选育技术开始对大菱鲂进行良种选育工作。2007年, 在国家级原良种场山东烟台天源水产有限公司成功构建了选育一代家系<sup>[10-11]</sup>。当所构建家系的体质量均值均达到商品鱼规格时( $\geq 500$  g), 采用动物模型BLUP (best linear unbiased prediction)育种方法对体质量性状进行了遗

收稿日期: 2017-07-04 修回日期: 2017-09-21

资助项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-47-01); 青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山人才”培养计划项目(2017ASTCP-OS04); 山东省重点研发计划(2016GSF115019); 山东省农业良种工程项目(2016LZGC031)

通信作者: 马爱军, E-mail: maaj@ysfri.ac.cn

传评定,根据预测的体质量个体育种值和计算的近交系数,基于0-1整数线性规划原理制订了配种方案。2010年,根据制订的传代选育配种方案构建了选育二代家系<sup>[12]</sup>。采用动物模型BLUP法对选育二代家系进行遗传评估,预测不同生长阶段的体质量性状育种值,并结合其相应的表型值均值进行综合评定,选育出大菱鲆快速生长新品系。在一个完善的育种体系内选育出的新品系(或新品种)能否满足育种的目的,最终要通过与普通养殖群体的相应性能进行比较。通常情况下,比较不同群体生物的生长性能更多的是采用“点估计”的方法,即采用某一特定时间点(一般采用成熟期或商品生物阶段)的资料进行分析。然而,生物的生长发育是一个极其复杂的动态过程,对某一特定时刻的资料比较不能完整地揭示一个新品系(或新品种)选育性状的优良性能。因此,基于典型非线性“S”型生长曲线,采用“曲线估计”的方法深入挖掘选育新品系(或新品种)和普通养殖群体的生长发育信息,比较其生长发育特征,对于充分显示育种成效具有更为重要的意义。

典型“S”型生长曲线主要包括Logistic、Gompertz、von Bertalanffy和Chapman-Richards模型(C-R模型),其中,C-R模型是当前对生物生长过程描述最准确、适用性最强的生长方程,对生长过程描述的准确性达到前所未有的水平。基于C-R模型的优越性,在当前的研究中,作者基于C-R生长方程<sup>[13]</sup>,采用不同生长阶段的资料对大菱鲆快速生长品系和普通养殖群体的生长发育规律进行分析比较,充分挖掘大菱鲆两个群体生长发育的生物学信息差异。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料与设 计

2007年4—5月,在国家级原良种场烟台开发区天源水产有限公司,选取从国外引进的4个群体(英国、法国、丹麦和挪威)的大菱鲆为选育亲鱼,采用巢式设计方法和人工采卵技术,按照1雄配2雌的原则,构建了56个选育一代母系全同胞家系(所构建的全同胞家系来源于28个父系半同胞家系)。在选育家系早期培育阶段,测量各家系体质量,并利用动物模型BLUP对体质量性状进行遗传评定,根据其预测的个体育种值

和计算的近交系数,基于0-1整数线性规划原理制订构建选育二代家系和对照系的配种方案。构建选育二代家系所需亲鱼来源于高育种值个体;构建对照系所需亲鱼来源于平均育种值个体。2010年5月和10月,根据制订的选育配种方案分两批次共构建选育二代母系全同胞家系57个(包括26个父系半同胞家系)和10个对照系。

对所构建的选育家系,在标记混养前的早期培育阶段,为了降低环境效应,对其进行数量和环境标准化处理。(1)数量标准化:孵化后15、30和45 d时,从每个家系随机选取1 000、5 000和2 000尾鱼分池培育。发育到2月龄时,从每个家系随机选取1 000尾鱼放置到分离的水泥池(容积12 m<sup>3</sup>)内培育;发育到3月龄时,每个家系随机取样120尾个体进行荧光标记(VIE)混养。9月龄时,从每个家系被VIE标记的个体中选取60尾个体进行PIT标记混养。(2)环境标准化:不同生长阶段的环境条件不同,在仔、稚鱼阶段,水温、光照、盐度、溶解氧和pH分别为13~18℃,500~2 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s),30~40,>6 mg/L和7.8~8.2。在成鱼生长阶段,上述5项指标分别为15~18℃,25~30,500~1 500 μmol/(m<sup>2</sup>·s),7.6~8.2和>6 mg/L。

在3~27月龄期间,每隔3个月对选育二代家系、对照系和同期相同养殖条件下的普通养殖群体进行体质量统计。在标记混养前,每个全同胞家系随机选取60尾个体测量体质量(用电子天平);在标记混养后,测量所有标记个体。对采集的资料记录和整理,并对选育家系和对照系进行遗传和表型评定。根据对选育二代家系和对照系不同生长发育阶段生长性能育种值和表型值均值的综合评定,选育出大菱鲆快速生长品系并对快速生长品系和普通养殖群体的生长性能进行比较。

### 1.2 统计分 析

采用C-R模型<sup>[13]</sup>拟合快速生长品系和普通养殖群体的生长曲线,据此曲线比较快速生长品系和普通养殖群体的生长性能。C-R模型的数学表达式: $W_t = A(1 - Be^{-kt})^{1/(1-m)}$ ;模型中各参数A、B、k、t、w和m的生物学意义分别为累积生长的饱和值、生长初始值、生长速率、生长时间、体质量和异速生长参数。

其拐点坐标： $t = \frac{\ln \left[ \frac{B}{1-m} \right]}{k}$ ， $W_t = Am^{1/(1-m)}$

在该点上瞬时生长率达到最大值(最大月增体质量)： $\frac{dW}{dt} = Akm^{m/(1-m)}$

瞬时生长率[GR,  $g(t)$ ]是生长性状在单位时间内的增长量，用来比较相同时期内不同生长性状的绝对增量<sup>[14]</sup>。瞬时生长率的方程 $g(t)$ 可表示为：

$$g(t) = d(W_t)/d_t = \frac{Ak}{1-m} (1 - Be^{-kt})^{\frac{m}{1-m}} \cdot Be^{-kt}$$

$$= \frac{kW_t}{1-m} \left[ \left( \frac{A}{W_t} \right)^{1-m} - 1 \right]$$

方程 $g(t)$ 的轨迹有2个生长速率变化率极大值点，这2点的坐标可表示为 $t = \frac{\ln X}{k}$ ， $W_t = A \left( 1 - \frac{B}{X} \right)^{1/(1-m)}$

其中 $X_{1,2} = -\frac{B(m+2 \pm \sqrt{m^2+4m})}{2(m-1)}$

瞬时生长加速度(GAR)为衡量瞬时生长率(GR)变化快慢的指标，是瞬时生长率在单位时间内的变化率<sup>[14]</sup>。GAR方程 $d[g(t)]/dt$ ：

$$d[g(t)]/d_t = \frac{Ak}{1-m} (1 - Be^{-kt})^{\frac{m}{1-m}} \cdot Bke^{-kt} \left[ \frac{m}{1-m} \cdot (1 - Be^{-kt})^{-1} \cdot Be^{-kt} - 1 \right]$$

$$= g(t) \cdot k \cdot \left\{ \frac{m}{1-m} \cdot \left( \frac{W_t}{A} \right)^{m-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{W_t}{A} \right)^{1-m} \right] - 1 \right\}$$

相对生长率(RGR)为衡量机体生长强度的指标，是单位时间内某单位组织的生长量<sup>[14]</sup>。以C-R生长方程求解相对生长率 $r(t)$ ：

$$r(t) = d(W_t)/W_t d_t = \frac{Ak}{1-m} (1 - Be^{-kt})^{\frac{m}{1-m}} \cdot Be^{-kt}$$

$$= \frac{k}{1-m} \left[ \left( \frac{A}{W_t} \right)^{1-m} - 1 \right]$$

利用SAS软件NLIN程序中的试位法(DUD法)，进行迭代计算，得出选育新品系和普通养殖群体两个模型中参数 $A$ 、 $B$ 、 $k$ 和 $m$ 的最优估计值，建立这两类生长模型，其收敛标准为 $10^{-8}$ 。

## 2 结果

### 2.1 大菱鲂快速生长品系和普通养殖群体不同月龄体质量的变化

在每一统计月龄，大菱鲂快速生长品系的体质量均显著大于普通养殖群体( $P < 0.05$ ) (表1)。显然，选育出的快速生长品系比普通养殖群体显示出优良的生长性能。

### 2.2 大菱鲂快速生长品系和普通养殖群体生长模型的拟合结果

快速生长品系和普通养殖群体经C-R模型拟合后的模型参数( $A$ 、 $B$ 、 $k$ 和 $m$ )、拟合度( $R^2$ )、拐点月龄、拐点体质量和最大月增体质量的结果显示，快速生长品系和普通养殖群体C-R模型的拟合度分别为0.999和0.997，说明快速生长品系和普通养殖群体经C-R模型的拟合效果均较好，能够利用C-R模型解释这两类大菱鲂群体的生长发育规律。其在不同生长发育期的体质量呈现“S”型增长。进一步分析发现，快速生长品系和普通养殖群体的拐点月龄分别为15.23和16.86月龄；拐点体质量分别为716.712和619.862 g；最大月增体质量分别为111.711和78.061 g (表2)。可见，尽管快速生长品系到达拐点的时间较普通养殖群体早，但其对应的拐点体质量及最大月增体质量均大于普通养殖群体，显示出良好的选育效果。

### 2.3 大菱鲂快速生长品系和普通养殖群体的生长发育规律

为了更为系统地比较快速生长品系和普通

表 1 大菱鲂快速生长品系和普通养殖群体不同月龄的平均体质量

Tab. 1 Mean body weight of the fast-growing strain and the common cultured strain of *S. maximus* at different age of months

| 群体<br>strain                     | 月龄/月 month old           |                            |                             |                             |                             |                                |                                |                                |                                |
|----------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                                  | 3                        | 6                          | 9                           | 12                          | 15                          | 18                             | 21                             | 24                             | 27                             |
| 快速生长品系<br>fast-growing strain    | 1.890±0.490 <sup>a</sup> | 49.420±10.940 <sup>a</sup> | 162.020±35.300 <sup>a</sup> | 334.990±65.890 <sup>a</sup> | 689.640±97.420 <sup>a</sup> | 1 058.270±179.660 <sup>a</sup> | 1 273.330±234.260 <sup>a</sup> | 1 504.040±273.910 <sup>a</sup> | 1 701.980±248.630 <sup>a</sup> |
| 普通养殖群体<br>common cultured strain | 0.990±0.190 <sup>b</sup> | 41.840±9.920 <sup>b</sup>  | 123.290±25.280 <sup>b</sup> | 282.280±57.180 <sup>b</sup> | 418.490±83.710 <sup>b</sup> | 747.840±125.910 <sup>b</sup>   | 944.120±108.290 <sup>b</sup>   | 1 100.280±201.570 <sup>b</sup> | 1 279.570±212.720 <sup>b</sup> |

注：统计数值上标字母表示群体体质量比较结果，体质量同列字母不同表示群体间体质量差异达到显著水平( $P < 0.05$ )

Notes: superscripts letters are the result of comparisons between the two strains, different letters mean significantly different ( $P < 0.05$ )

表 2 大菱鲂快速生长品系和普通养殖群体的C-R模型参数和拟合度

Tab. 2 The parameter values and the goodness of fit of C-R models of the fast-growing and the common cultured strains of *S. maximus*

| 群体 strain                        | 模型参数 model parameters |         |       |       | 拟合度( $R^2$ )<br>goodness of fit ( $R^2$ ) | 拐点月龄/月<br>time to inflection | 拐点体质量/g<br>weight at inflection | 最大月增体质量/g<br>maximum month gain |
|----------------------------------|-----------------------|---------|-------|-------|---|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                                  | A                     | B       | K     | m     |   |                              |                                 |                                 |
| 快速生长品系<br>fast-growing strain    | 1 948.386             | 0.001 8 | 0.156 | 0.999 | 0.999                                     | 15.23                        | 716.712                         | 111.711                         |
| 普通养殖群体<br>common cultured strain | 1 684.977             | 0.000 2 | 0.126 | 0.999 | 0.997                                     | 16.86                        | 619.862                         | 78.061                          |

养殖群体的生长性能, 通过计算瞬时增长率(图1)、瞬时生长加速度(图2)和相对增长率(图3)来比较两类大菱鲂群体的生长发育规律。快速生长品系和普通养殖群体的瞬时生长加速度和相对增长率均呈相同的变化趋势, 瞬时增长率、瞬时生长加速度和相对生长率的轨迹依次为倒钟形、横S形和下降曲线(图1)。对于瞬时生

长率(图1), 在4.5~25月龄, 快速生长品系高于普通养殖群体, 在3~4.5月龄和25~27月龄2个阶段, 快速生长品系低于普通养殖群体。对于瞬时生长加速度(图2), 在3~13.8月龄, 快速生长品系高于普通养殖群体, 在3月龄和13.8~27月龄, 快速生长品系低于普通养殖群体。对于相对生长率, 在3~15月龄, 快速生长品系高于普通养殖

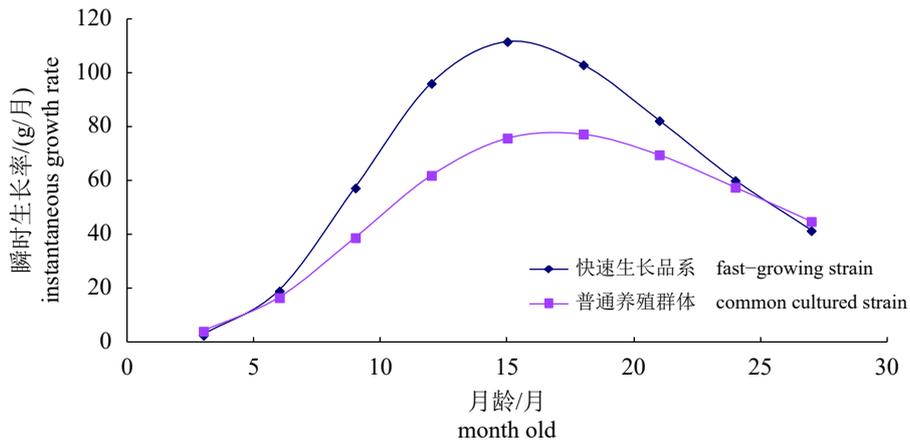


图 1 大菱鲂快速生长品系和普通养殖群体的瞬时生长曲线

Fig. 1 Instantaneous growth rates of the fast-growing strain and the common cultured strain of *S. maximus*

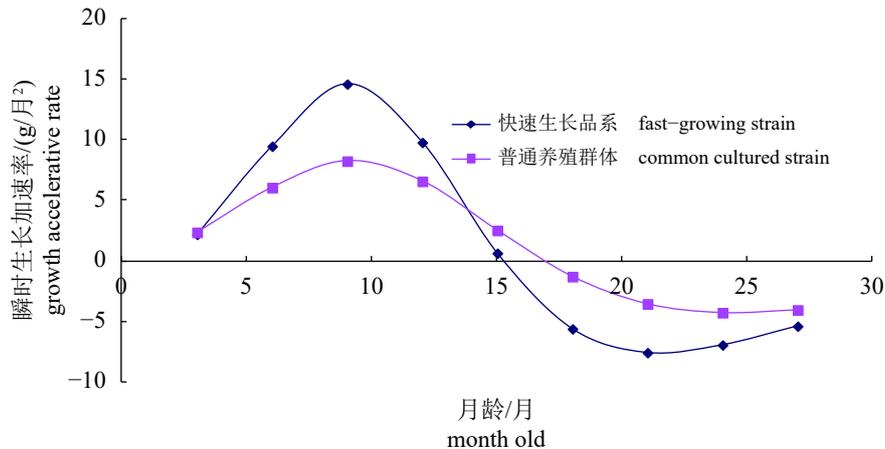


图 2 大菱鲂快速生长品系和普通养殖群体的瞬时生长加速度

Fig. 2 Growth accelerative rates of the fast-growing strain and the common cultured strain of *S. maximus*

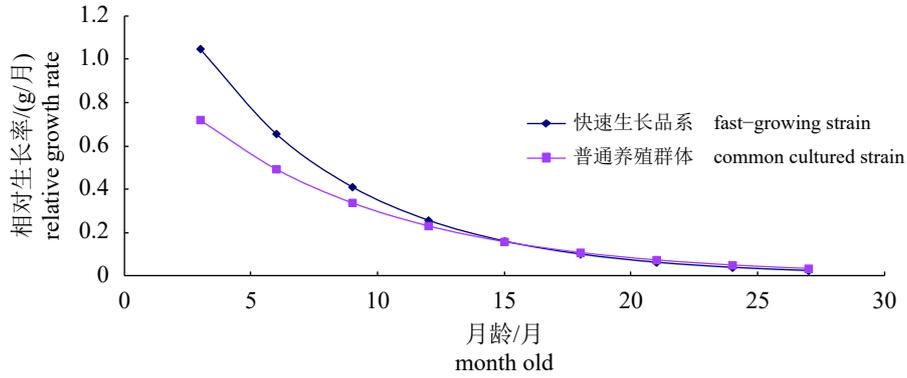


图 3 大菱鲂快速生长品系和普通养殖群体的相对生长曲线

Fig. 3 Relative growth rate of the fast-growing strain and the common cultured strain of *S. maximus*

群体，在15~27月龄，两个群体的相对生长率一致(图3)。

本研究中以始速点、拐点和终速点为界，将整个生长过程分为缓慢生长期、快速生长前期、快速生长后期和渐近生长期4个阶段。利用本研究推导出的C-R模型的始速点、拐点和终速点公式，计算得到快速生长品系和普通养殖群体不同生长期的区间范围(表3，图4，图5)，可

以发现，大菱鲂快速生长品系进入快速生长前期的始速点、进入快速生长后期的拐点以及进入缓慢生长期的终速点均比普通养殖群体提前。计算两个群体快速生长期时间及对应体质量的净增量发现，快速生长品系的快速生长期时间区间长度(12.35月龄)小于普通养殖群体(15.28月龄)，但其对应的体质量区间长度(1 187.680 g)却大于普通养殖群体(1 027.120 g)，即快速生长

表 3 快速生长品系和普通养殖群体的生长过程区间

Tab. 3 Growth stages interval of body weight of the fast-growing strain and the common cultured strain of *S. maximus*

| 群体<br>strain                     | 缓慢生长期/<br>[月龄/(体质量/g)]<br>slow-growing period | 快速生长期<br>fast-growing period                         |   |   | 渐进生长期/<br>[月龄/(体质量/g)]<br>asymptotic growing period |
|----------------------------------|---|--|---|---|---|
|                                  |   | 快速生长前期/<br>[月龄/(体质量/g)]<br>fast-growing early period | 快速生长后期/<br>[月龄/(体质量/g)]<br>fast-growing late period | 快速生长期净<br>增体质量/g<br>net increment of<br>fast-growing period |   |
| 快速生长品系<br>fast-growing strain    | 0/0~9.05/142.070                              | 9.05/142.079~15.23/716.710                           | 15.23/716.710~21.40/1329.760                        | 12.35/1 187.680   | 21.40/1 329.760                                     |
| 普通养殖群体<br>common cultured strain | 0/0~9.22/122.910                              | 9.22/122.910~16.86/619.860                           | 16.86/619.860~24.50/1 150.020                       | 15.28/1 027.120   | 24.50/1 150.020                                     |

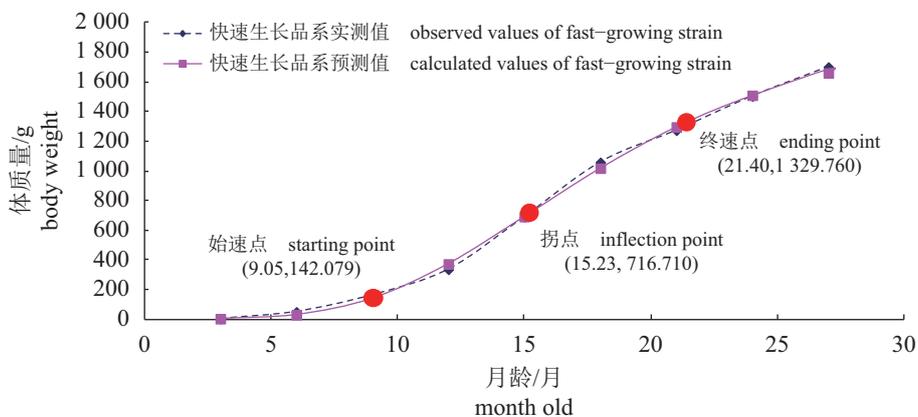


图 4 大菱鲂快速生长品系体质量的实测值和预测值生长曲线

Fig. 4 Growth curves of observed and calculated values of fast-growing strain of *S. maximus*

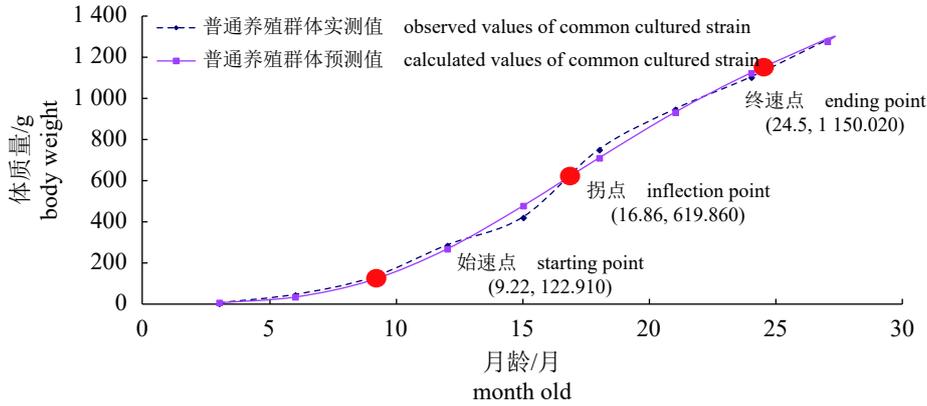


图5 大菱鲂普通养殖群体体质量的实测值和预测值生长曲线

Fig. 5 Growth curves of observed and calculated values of common cultured strain of *S. maximus*

品系在较短的快速生长时间区间范围内获得了更大的净增体质量, 比普通养殖群体显示出更好的生长性能。

### 3 讨论

本研究采用大规模家系选育技术开展了大菱鲂快速生长性状遗传改良研究, 并获得了快速生长新品系。在不同生长阶段, 比较快速生长品系和普通养殖群体的生长性能发现, 在各月龄, 二者差异均达到显著水平, 快速生长品系的体质量均高于普通养殖群体。选育出的快速生长品系比普通养殖群体显示出更优良的生长性能。在某一时间点进行生长性能比较, 即“点评估”是评估不同动物群体生长差异最常用、最直观也是最简单的方法。然而, 动物的生长是一个极其复杂的过程, 在此过程中所展现的生长发育规律含有极其深奥的生物学信息。动物生长具有典型的非线性特征, 其生长曲线也称为“S”型曲线<sup>[15]</sup>。近年来, 多种与生命现象有关的非线性数学模型被建立并被广泛应用于生长规律的研究<sup>[16-18]</sup>。这为采用适当的模型进行生物信息挖掘, 更为深刻、全面地比较动物不同群体间的生长差异提供了有力的工具。

应用于研究生物生长发育规律的常用生长曲线模型主要有Logistic、Gompertz、von Bertalanffy和C-R模型<sup>[19-21]</sup>, 其中C-R模型是当前对生物生长过程描述最准确、适用性最强的生长方程<sup>[20]</sup>。C-R模型是一个4参数非线性方程, 通过异速生长参数(*m*)滑动取值, 使C-R模型既包含Logistic、Gompertz和von Bertalanffy模型, 又包含这

3个模型的中间过渡形式, 显然, C-R模型对生长过程刻画更为灵活和准确<sup>[20]</sup>。采用C-R模型对大菱鲂选育出的快速生长品系和普通养殖群体的生长性能进行分析发现, 不同于“点评估”的结论, 基于“曲线评估”快速生长品系的瞬时生长率、瞬时生长加速率和相对生长率在统计期(3~27月龄)并非均始终高于普通养殖群体, 而是存在一定的波动。这表明, 在某一特定时间点上, 不同生长性能群体体质量大小并不能完全反映其对应的瞬时生长率、瞬时生长加速率和相对生长率的变化。比较快速生长品系和普通养殖群体生长曲线的拐点和对应的拐点体质量及最大月增体质量发现, 快速生长品系到达拐点的时间较普通养殖群体早, 其对应的拐点体质量及最大月增体质量均大于普通养殖群体, 这表明基于“曲线评估”的方法比较不同群体生长性能更为准确和合理。对于“S”型生长曲线, 以“拐点”为界, 分为快速生长期和减速生长期两个阶段; 而以“始速点”和“终速点”为界, 则可分为三个阶段, 如苏建平<sup>[14]</sup>以始速点和终速点为界, 将生长过程划分为缓慢生长期、快速生长期和渐近生长期3个阶段。进入缓慢生长期, 瞬时生长率降低, 体质量增加缓慢。到达始速点, 进入快速生长期, 瞬时生长率仍继续增加, 但瞬时生长加速度开始下降。到达曲线拐点, 瞬时生长加速率为0, 而在拐点后, 瞬时生长加速率为负值。显然, 快速生长期包括加速生长期和减速生长期两部分, 这一时期, 体质量增加很快, 瞬时生长率高于缓慢生长期和渐近生长期。进入渐近生长期, 瞬时生长率持续

下降并逐渐趋于0, 体质量也缓慢趋于渐近值。在当前的研究中, 根据始速点、拐点和终速点, 将整个生长过程划分为4个阶段, 即缓慢生长期、快速生长前期、快速生长后期和渐近生长期。与普通养殖群体比较, 快速生长品系到达始速点、拐点和终速点的时间提前。进一步分析两个群体的快速生长区间速率发现, 快速生长品系和普通养殖群体在快速生长期的生长速率分别为3.206 g/d和2.241 g/d。显然, 快速生长品系在较短的快速生长时间区间范围内, 获得了更大的净增体质量, 比普通养殖群体显示出更好的生长性能。通过对快速生长品系和普通养殖群体生长曲线所蕴含的生物生长信息的挖掘, 发现选育出的快速生长品系在进入快速生长前期、快速生长后期和缓慢生长期的时间均比普通养殖群体提前, 且快速生长品系的快速生长区间的时间短, 但在这一阶段的净增体质量幅度大。这表明, 分析特殊生长期的生长特征可以更深入地揭示出快速生长品系比普通养殖群体具有良好的生长性能。总体上看, 比较不同群体生长性能差异时, 分析特殊生长期生长性能的效果优于分析某一特定时间点的效果, 即“曲线评估”的效果优于“点评估”。通过这一比较进一步表明, 大菱鲆快速生长品系比普通养殖群体达到商品鱼规格的时间显著缩短, 大大提高了经济效益。

#### 参考文献:

- [1] Howell B R. Development of turbot farming in Europe[J]. Bulletin of the Aquaculture Association of Canada, 1998, 98(1): 4-10.
- [2] 雷霖霖, 刘新富. 大菱鲆*Scophthalmus maximus* L.引进养殖的初步研究[J]. 现代渔业信息, 1995, 10(11): 1-3.
- Lei Q L, Liu X F. An primary study on culture of Turbot, *Scophthalmus maximus* L.[J]. Modern Fisheries Information, 1995, 10(11): 1-3(in Chinese).
- [3] Ma A J, Chen C, Lei J L, et al. Turbot *Scophthalmus maximus*: stocking density on growth, pigmentation and feed conversion[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2006, 24(3): 307-312.
- [4] Wang X A, Ma A J, Huang Z H, et al. Heritability and genetic correlation of survival in turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(6): 1200-1205.
- [5] Ruan X H, Wang W J, Kong J, et al. Genetic linkage mapping of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) using microsatellite markers and its application in QTL analysis[J]. Aquaculture, 2010, 308(3-4): 89-100.
- [6] 夏丹丹, 马爱军, 黄智慧, 等. 环境胁迫对大菱鲆C-型凝集素功能的影响[J]. 水产学报, 2017, 41(2): 161-170.
- Xia D D, Ma A J, Huang Z H, et al. Effect of environmental stress on the function of C-type lectin in turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(2): 161-170(in Chinese).
- [7] Liang X M, Ma A J, Wang X A, et al. Morphological comparison between a selected fast-growing strain and the common cultured strain of turbot *Scophthalmus maximus*[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(4): 563-568.
- [8] Wang X A, Ma A J, Ma D Y. Developmental quantitative genetic analysis of body weights and morphological traits in the turbot, *Scophthalmus maximus*[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 34(2): 55-62.
- [9] Wang X A, Ma A J. Comparison of four nonlinear growth models for effective exploration of growth characteristics of turbot *Scophthalmus maximus* fish strain[J]. African Journal of Biotechnology, 2016, 15(40): 2251-2258.
- [10] 马爱军, 王新安, 雷霖霖. 大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)不同生长阶段体质量的遗传参数和育种值估计[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(2): 187-194.
- Ma A J, Wang X A, Lei Q L. Genetic parameterization for turbot *scophthalmus maximus*: implication to breeding strategy[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(2): 187-194(in Chinese).
- [11] 马爱军, 王新安, 薛宝贵, 等. 大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)选育家系的构建和培育技术研究[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(3): 301-306.
- Ma A J, Wang X A, Xue B G, et al. Investigation on family construction and rearing techniques for turbot (*Scophthalmus maximus* L.) family selection[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(3): 301-306(in Chinese).
- [12] 马爱军, 王新安, 黄智慧, 等. 大菱鲆(*Scophthalmus maximus* L.)家系选育F2早期选择反应和现实遗传力估计[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(1): 57-61.
- Ma A J, Wang X A, Huang Z H, et al. Response to selection and realized heritability for early growth in the

- second-generation bred line of turbot (*Scophthalmus maximus* L.)[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(1): 57-61(in Chinese).
- [13] Richards F J. A flexible growth function for empirical use[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1959, 10(2): 290-301.
- [14] 苏建平, 刘季科. 甘肃鼠兔幼子生长的初步研究[J]. *兽类学报*, 2001, 21(2): 94-100.
- Su J P, Liu J K. A primary study on the postnatal growth of Gansu pika (*Ochotona cansus*)[J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2001, 21(2): 94-100(in Chinese).
- [15] 张顺华, 杨润林, 沈林圃, 等. 凉山猪的生长发育规律及其生长曲线拟合研究[J]. *四川农业大学学报*, 2013, 31(4): 419-422.
- Zhang S H, Yang R L, Shen L H, *et al.* The study of the growth development and the growth curve fitting of liangshan pig[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2013, 31(4): 419-422(in Chinese).
- [16] Kuhl H D, Kebreab E, Lopez S, *et al.* An evaluation of different growth functions for describing the profile of live weight with time (age) in meat and egg strains of chicken[J]. *Poultry Science*, 2003, 82(10): 1536-1543.
- [17] Khamis A, Ismail Z, Horan K, *et al.* Nonlinear growth models for modeling oil palm yield growth[J]. *Journal of Mathematics and Statistics*, 2005, 1(3): 225-233.
- [18] Roush W B, Branton S L. A comparison of fitting growth models with a genetic algorithm and nonlinear regression[J]. *Poultry Science*, 2005, 84(3): 494-502.
- [19] 王新安, 马爱军, 黄智慧, 等. 大菱鲂(*Scophthalmus maximus*)大规模家系选育优良家系的生长发育规律[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(2): 266-273.
- Wang X A, Ma A J, Huang Z H, *et al.* Growth patterns of selectively bred turbot *Scophthalmus maximus*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(2): 266-273(in Chinese).
- [20] 刑黎峰, 孙明高, 王元军. 生物生长的Richards模型[J]. *生物数学学报*, 1998, 13(3): 349-353.
- Xing L F, Sun M G, Wang Y J. Richards growth model of living-organism[J]. *Journal of Biomathematics*, 1998, 13(3): 349-353(in Chinese).
- [21] 李玉华, 宋芹芹, 张志怀, 等. 凡纳滨对虾生长发育规律及生长曲线拟合研究[J]. *南方水产科学*, 2015, 11(1): 89-95.
- Li Y H, Song Q Q, Zhang Z H, *et al.* Analysis of growth and development rules and growth curve fitting of *Litopenaeus vannamei*[J]. *South China fisheries science*, 2015, 11(1): 89-95(in Chinese).

## Comparison of growth dynamics between a selected fast-growing strain and the common cultured strain of turbot (*Scophthalmus maximus*) based on C-R model

WANG Xin'an<sup>1,2</sup>, MA Aijun<sup>1,2\*</sup>

(1. Qingdao Key Laboratory for Marine Fish Breeding and Biotechnology,  
Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture,  
Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences,

Qingdao 266071, China;

2. Laboratory for Marine Biology and Biotechnology,  
Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** In order to evaluate success in selective breeding of *Scophthalmus maximus*, the nonlinear growth curves of a selected fast-growing strain and the common cultured strain were fitted using Chapman-Richards (C-R) model, and the differences in growth performance of the two strains have been deeply investigated. The results showed that the goodness of fit ( $R^2$ ), time to inflection, weight at inflection and maximum month gain of fast-growing strain and common cultured strain were respectively 0.999 and 0.997, 15.228 and 16.858 months old, 716.712 and 619.862 g, 111.711 and 78.061 g. The instantaneous growth rate, growth acceleration rate and relative growth rate of fast-growing strain were higher than those of common cultured strain during months of 4.5–25, 3–13.8 and 3–15 months old, respectively. However, the instantaneous growth rate and growth acceleration rate of fast-growing strain were lower than those of common cultured strain in other growth stages, and the relative growth rate is almost the same. Furthermore, the fast-growing strain showed earlier starting point (9.05 months old), inflection point (15.23 months old) and ending point (21.40 months old), shorter fast-growing period time interval (12.35 months old) and longer fast-growing body weight intervals (1 187.680 g) than those of common cultured strain. Obviously, the selected fast-growing strain has obtained greater net body weight increment during fast-growing period in a relatively short time.

**Key words:** *Scophthalmus maximus*; Chapman-Richards model; fast-growing strain; growth characteristics

**Corresponding author:** MA Aijun. E-mail: maaj@ysfri.ac.cn

**Funding projects:** China Agriculture Research System (CARS-47-01); 'Aoshan' Talent Plan of Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology(2017ASTCP-OS04); Key Research and Development Plan of Shandong Province (2016GSF115019); Agricultural Fine Breed Project of Shandong Province (2016LZGC031)