

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2016.15701

## 翘嘴鲌♀×斑鲌♂杂交子一代早期生长速度

孙际佳<sup>1</sup>, 何建国<sup>2</sup>, 刘丽<sup>1</sup>, 王海芳<sup>2</sup>, 卢薛<sup>2</sup>, 胥鹏<sup>2,3</sup>, 李桂峰<sup>2,3</sup>

1. 华南农业大学 动物科学学院, 广东 广州 510642;
2. 中山大学 生命科学学院, 水生经济动物研究所, 南海生物资源开发与利用协同创新中心, 广东 广州 510275;
3. 佛山市南海百容水产良种有限公司, 广东省工程技术研究中心, 广东 佛山 528216

**摘要:** 对翘嘴鲌♀×斑鲌♂(*Siniperca chuatsi* ♀ × *S. scherzeri* ♂)杂交子一代和翘嘴鲌在0.3月龄、2月龄、7月龄和11月龄时的体重、体长和体高进行测量, 从变异系数、杂种优势率、相对/绝对生长率、体重与体长的幂函数曲线以及肥满度5方面, 对杂交子一代和母本翘嘴鲌的生长速度和杂种优势进行对比分析。结果显示, 7月龄时杂交子一代的体重(300.4 g±118.2 g)与翘嘴鲌(305.2 g±82.5 g)差异不显著, 且在7月龄时体重、体长和体高的月相对生长率(280.13%, 25.30%和27.55%)比翘嘴鲌显著增高(89.62%, 15.90%和12.72%); 在0.3月龄和11月龄时体长的超亲杂种优势率分别为2.48%和0.91%; 11月龄时杂交子一代的体重(540.88 g±173.66 g)显著低于与翘嘴鲌(624.45 g±154.11g)( $P<0.05$ ); 杂交子一代和翘嘴鲌体重与体长关系幂函数生长方程的决定性指数 $R^2$ (0.992和0.995)、条件因子 $a$ (0.059和0.058)和异速生长因子 $b$ (2.722和2.740)在数值上非常接近。结论认为, 尽管在总体生长速度上翘嘴鲌♀×斑鲌♂杂交子一代较母本翘嘴鲌略慢, 但其早期的生长趋势与翘嘴鲌相似, 并在体重与体长的生长关系方面具有良好的一致性。杂交子一代遗传了母本翘嘴鲌的快速生长性能, 并在体长性状上显现出一定的超亲杂种优势。本研究通过分析养殖翘嘴鲌♀×斑鲌♂杂交子一代的生长速度, 探讨杂交子一代的早期生长趋势及其杂种优势, 旨在为杂交子一代的规模化人工养殖和品种选育等提供参考数据。

**关键词:** 翘嘴鲌; 斑鲌; 杂交子一代; 生长速度; 杂种优势

中图分类号: S96

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2016)04-0890-10

翘嘴鲌(*Siniperca chuatsi*)作为淡水养殖的优质名贵鱼类, 在中国具有重要的养殖地位, 其主要养殖地区有广东、湖北、江苏和浙江等省。然而近年来, 由于环境污染、捕捞过度等原因, 其野生资源急剧下降<sup>[1]</sup>。同时, 每年7~10月高温期频繁暴发的鲌病毒性传染性疾病(传染性脾肾坏死病毒, ISKNV)也给鲌养殖生产带来巨大的经济损失<sup>[2-4]</sup>。此外, 亲本的累代繁殖已导致翘嘴鲌养殖品种出现严重的种质衰退现象, 表现为生长缓慢、抗病和抗逆性能下降等<sup>[5]</sup>。斑鲌以其鲜美的肉质和较强抗病能力而具有很高的经济价值<sup>[6-7]</sup>,

但其缓慢的生长速度严重制约了斑鲌养殖业的发展<sup>[8-9]</sup>。要从根本上解决上述问题, 必须建立良种的制种技术, 并开展鲌新品种的选育。

杂交育种是目前水产育种中应用最为广泛、最有成效的育种途径。通过杂交可以使双亲基因重新组合, 形成不同的组合类型, 为选择提供了丰富的遗传结构, 同时基因重组可以将双亲控制不同性状的优良基因结合于一体, 使子代获得杂种优势(heterosis), 甚至可能产生亲本从未出现过的超亲代的优良性状, 获得生长速率、产量、抗病性和品质等比双亲优秀的新品种<sup>[10-13]</sup>。目前,

收稿日期: 2015-07-01; 修订日期: 2015-08-24.

基金项目: 广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(2012A020800001); 广东省教育厅项目(cxzd1104); 佛山市引进科技创新团队资助计划(2014IT100122).

作者简介: 孙际佳(1976-), 女, 博士, 主要从事水产动物遗传育种研究. E-mail: jjsun@scau.edu.cn

通信作者: 李桂峰, 教授. E-mail: liguif@mail.sysu.edu.cn

杂交育种已在水产养殖领域获得了广泛应用, 在养殖新品种的开发和培育、以及已有品种的遗传改良中发挥了重要作用<sup>[14-16]</sup>。例如, 我国鲤科鱼类杂交育种中培育出的“建鲤”和“松浦鲤”生长速度均比亲本快, 且“建鲤”抗孢子虫病、烂鳃病的能力强, “松浦鲤”的抗寒能力强<sup>[17]</sup>。白鲈(*Morone chrysops*)×条纹鲈(*M. saxatilis*)杂交获得的杂交条纹鲈, 具有生长快、抗逆和抗病强、肉质鲜美等优点, 该杂种自 20 世纪 60 年代中期杂交育种成功后, 现已成为美国鱼类养殖的主要种类之一<sup>[11, 18]</sup>。

鳊类现已开展有目间<sup>[19]</sup>、科间<sup>[20-22]</sup>及种间<sup>[23-24]</sup>远缘杂交的研究。其中鳊类的种间杂交是近几年来鳊类杂交育种研究的热点, 主要围绕翘嘴鳊、斑鳊和大眼鳊(*Siniperca kneri*)这 3 个主要的经济鳊类进行开展, 目前已有翘嘴鳊与斑鳊<sup>[23]</sup>、翘嘴鳊与大眼鳊<sup>[24]</sup>种间杂交的研究报道。然而这些报道主要集中于杂交种的胚胎发育<sup>[23-26]</sup>、形态特征<sup>[27-29]</sup>、肌肉营养成分<sup>[30-31]</sup>以及遗传分析<sup>[28, 32-34]</sup>等方面, 对于杂交子代杂种优势和生长特征的研究报道极少。本研究对养殖翘嘴鳊♀×斑鳊♂杂交子一代的生长速度进行了分析, 探讨了杂交子一代的早期生长趋势及其杂种优势, 为杂交子一代的规模化人工养殖和品种选育等提供参考数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

选取野生的翘嘴鳊和斑鳊共 12 尾, 经人工繁殖后获得翘嘴鳊♀×斑鳊♂杂交子一代群体(以下简称 CS 组)和对照组翘嘴鳊群体(论文中简称为 CC 组)。实验鱼苗体长达 1 cm 以上时转入同一池塘中规格不同的不同围隔中养殖, 每个围隔面积为 1 亩(1 亩约合 667 m<sup>2</sup>), 放养密度为 4000 尾/亩(1 亩=667 m<sup>2</sup>), 每组设 1 个重复。各实验组投喂时间、活饵种类和投喂量均一致, 实验期间保证池塘中饵料鱼的充足。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 测量方法** 根据鱼类形态学数量性状的测

量标准, 测定体重、体长、体高 3 个性状, 分别在 0.3 月龄(第 9 天)、2 月龄时随机抽取 30 尾进行测定, 7 月龄、11 月龄时各抽取 100 尾进行测定。

**1.2.2 分析方法** 利用 Excel 2003 计算体重、体长和体高的变异系数(Coefficient of Variation, CV)、杂种优势率、相对生长率和绝对生长率, 绘制体重、体长和体高累积生长曲线、绝对生长曲线和相对生长曲线, 分析各组合的肥满度。运用 SPSS 17.0 软件计算均值和标准差, 将数据用平均数±标准差( $\bar{x} \pm SD$ )表示, 并进行 *t* 检验, 建立不同月龄体重和体长的生长方程并绘制曲线图。

以 *W* 表示体重, *L* 表示体长, *H* 代表体高, 则各指标的计算方法如下。

(1) 杂种优势率: 本文中计算的均为超亲杂种优势率, 即杂种超过双亲中最优亲本的杂种优势<sup>[35]</sup>。

$$H(\%) = \frac{F_1 - HP}{HP} \times 100 \quad (1)$$

式中,  $F_1$  为杂交子代的性状均值, HP 为最优亲本的性状均值。

(2) 绝对生长率: 体重/体长/体高的绝对生长率  $G_W$ 、 $G_L$ 、 $G_H$  定义为:

$$\begin{aligned} G_W &= (W_2 - W_1) / (t_2 - t_1) \\ G_L &= (L_2 - L_1) / (t_2 - t_1) \\ G_H &= (H_2 - H_1) / (t_2 - t_1) \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 相对生长率: 体重/体长/体高的相对生长率  $G'_W$ 、 $G'_L$ 、 $G'_H$  分别定义为:

$$\begin{aligned} G'_W &= (W_2 - W_1) / [W_1 \cdot (t_2 - t_1)] \times 100\% \\ G'_L &= (L_2 - L_1) / [L_1 \cdot (t_2 - t_1)] \times 100\% \\ G'_H &= (H_2 - H_1) / [H_1 \cdot (t_2 - t_1)] \times 100\% \end{aligned} \quad (3)$$

(4) 体重与体长的经典幂函数:  $W = a \cdot L^b$  (4) 式(4)中, *a* 为条件因子(condition factor), 反映种群所处环境的优劣程度; *b* 为异速生长因子(allometric factor), 反映体重和体长的相对增长速度。

(5) 肥满度:

Ricker 相对状态指数<sup>[36]</sup>定义为:

$$K' = 100 \cdot W / L^b \quad (5)$$

Le Cren 相对状态指数<sup>[37]</sup>定义为:

$$K_n = W / (a \cdot L^b) \quad (6)$$

Jones 状态指数<sup>[38]</sup>定义为:

$$B = W / (H \cdot L^2) \quad (7)$$

Richter 状态指数<sup>[39]</sup>定义为:

$$B' = W / (H^2 \cdot L) \quad (8)$$

## 2 结果与分析

**2.1 4 个测试时间点杂交子一代体重、体长和体高的生长比较** 0.3 月龄、2 月龄、7 月龄和 11 月龄时, 杂交 CS 组和 CC 组体重、体长和体高的测量值和变异系数见表 1, 不同月龄时体重、体长和体高的超亲杂种优势率如图 1 所示。

由表 1 和图 1 可知: (1) 在 0.3 月龄、7 月龄和 11 月龄时, CS 组的体重、体长和体高变异系数均比 CC 组高, 表明 CS 组在这 3 个时期组内个体

间的生长差异比 CC 组大, 生长均一性较 CC 组差。但随着生长时间的增加, 尤其是从 7 月龄到 11 月龄, CS 与 CC 组体重、体长和体高的变异系数差由(12.33%、3.65%和 4.32%)缩小到(7.43%、1.77%和 3.24%), 说明 CS 组内个体间的生长差异逐渐缩小; (2) CS 组与 CC 组在 0.3 月龄时体重、体长和体高差异均不显著; 7 月龄时两组体重相近且差异不显著, 11 月龄 CS 组体长大于 CC 组, 且差异不显著外, 其余时期其他各性状 CS 组均显著小于 CC 组( $P < 0.05$ ); (3) 杂交 CS 组仅体长在 0.3 月龄和 11 月龄时表现出超亲杂种优势( $H > 0$ ), 但优势不明显, 超亲杂种优势率分别为 2.48%和 0.91%, 而在其余时期杂交 CS 组均没有表现出超亲杂种优势。

表 1 翘嘴鲌♀×斑鲌♂杂交子一代体重、体长和体高的生长比较

Tab. 1 Comparative analysis of body weight, body length and body height between *S. chuatsi* ♀×*S. scherzeri* ♂ F<sub>1</sub> and *S. chuatsi*

性状 trait	群体 population	0.3 月龄 0.3 months of age	2 月龄 2 months of age	7 月龄 7 months of age	11 月龄 11 months of age
体重/g body weight	CC	0.11±0.01 <sup>a</sup> (11.38%)	55.68±16.72 <sup>a</sup> (30.03%)	305.16±82.48 <sup>a</sup> (27.03%)	624.45±154.11 <sup>a</sup> (24.68%)
	CS	0.11±0.02 <sup>a</sup> (15.04%)	20.01±1.53 <sup>b</sup> (7.63%)	300.35±118.21 <sup>a</sup> (39.36%)	540.88±173.66 <sup>b</sup> (32.11%)
体长/cm body length	CC	1.21±0.07 <sup>a</sup> (5.35%)	12.91±1.45 <sup>a</sup> (11.25%)	23.17±2.09 <sup>a</sup> (9.02%)	28.50±2.47 <sup>a</sup> (8.66%)
	CS	1.24±0.14 <sup>a</sup> (11.55%)	9.64±0.50 <sup>b</sup> (5.18%)	21.84±2.77 <sup>b</sup> (12.67%)	28.76±3.00 <sup>a</sup> (10.43%)
体高/cm body height	CC	0.44±0.02 <sup>a</sup> (4.36%)	4.91±0.59 <sup>a</sup> (12.01%)	8.03±0.77 <sup>a</sup> (9.56%)	10.52±0.96 <sup>a</sup> (9.16%)
	CS	0.44±0.04 <sup>a</sup> (7.82%)	3.16±0.25 <sup>b</sup> (7.80%)	7.50±1.04 <sup>b</sup> (13.88%)	9.09±1.13 <sup>b</sup> (12.40%)

注: 数据同列同性状右上角字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ ),  $n=100$ ;  $\bar{x} \pm SD$ . 括号中数值为变异系数. CS: 翘嘴鲌♀×斑鲌♂杂交子一代; CC: 对照组翘嘴鲌.

Note: Different superscripts in a column indicate significant difference ( $P < 0.05$ ),  $n=100$ ;  $\bar{x} \pm SD$ . Values in brackets are coefficient of variation. CS: F<sub>1</sub> of *Siniperca chuatsi* ♀ × *S. scherzeri* ♂; CC: *S. chuatsi* as control.

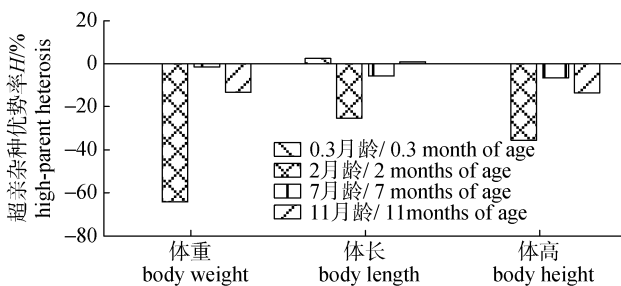


图 1 翘嘴鲌♀×斑鲌♂杂交子一代体重、体长和体高的超亲杂种优势率

Fig. 1 High-parent heterosis of body weight, body length and body height of *S. chuatsi* ♀×*S. scherzeri* ♂ F<sub>1</sub> (CS) and *S. chuatsi* (CC)

## 2.2 杂交子一代的生长曲线分析

**2.2.1 累积生长曲线比较** CS 组和 CC 组的体重、体长和体高的累积生长曲线如图 2 所示。

杂交子一代与翘嘴鲌体重、体长和体高的累积生长曲线基本一致(图 2)。杂交 CS 组和 CC 组从孵化出膜到 2 月龄, 体重的生长较为缓慢, 体长和体高的生长较快; 2 月龄至 11 月龄体重、体长和体高性状显著增长, 且 CC 组比 CS 组快。两组在 7 月龄时组内个体间生长分化明显: CS 组 62% 的个体体重低于均值, 体重范围为 79.5~

686.6 g, 体长范围为 15.0~28.6 cm, 体高范围为 5.1~10.1 cm; CC 组 52%的个体低于均值, 体重范围为 117.4~558.0 g, 体长范围为 17.6~28.1 cm, 体高范围为 5.9~9.8 cm。这种差异在 11 月龄时仍持续, 但两组的生长离散度均较 7 月龄时有所降低。

**2.2.2 绝对生长率曲线比较** CS 组和 CC 组的体重、体长和体高的绝对生长率曲线如图 3 所示。

在 0.3~11 月龄时期, CS 组和 CC 组体重的绝对生长率均呈逐渐增长的趋势[图 3(a)], 而体长、体高的绝对生长率呈明显下降的趋势[图 3(b)和(c)]。CS 组在 7 月龄时体重、体长和体高的绝对生长率分别高于 CC 组 6.2 g/月、0.39 cm/月和 0.25 cm/月, 并且在 11 月龄时 CS 组体长的绝对生长率仍高于 CC 组 0.4 cm/月。

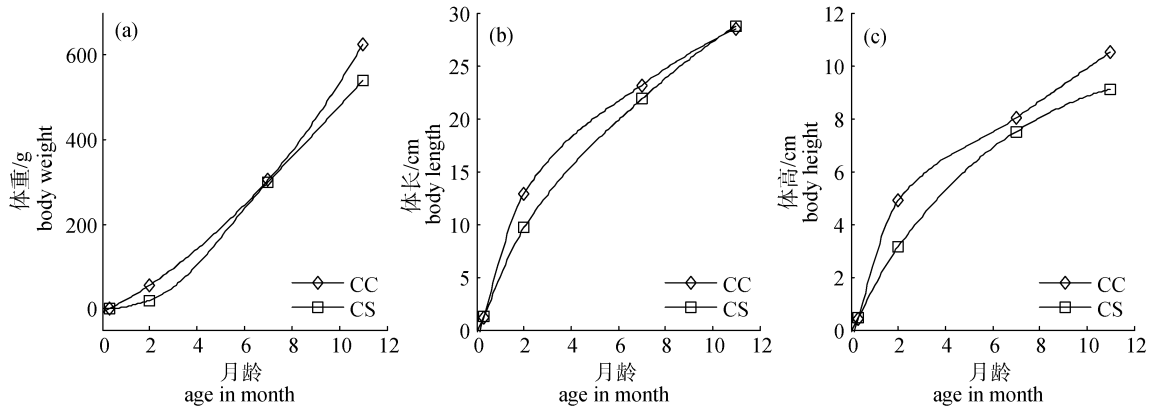


图 2 CS 组和 CC 组累积生长曲线

(a) 体重; (b) 体长; (c) 体高.

Fig. 2 Cumulative growth curves of *S. chuatsi* ♀ × *S. scherzeri* ♂ F<sub>1</sub> (CS) and *S. chuatsi* (CC) (a) body weight; (b) body length; (c) body height.

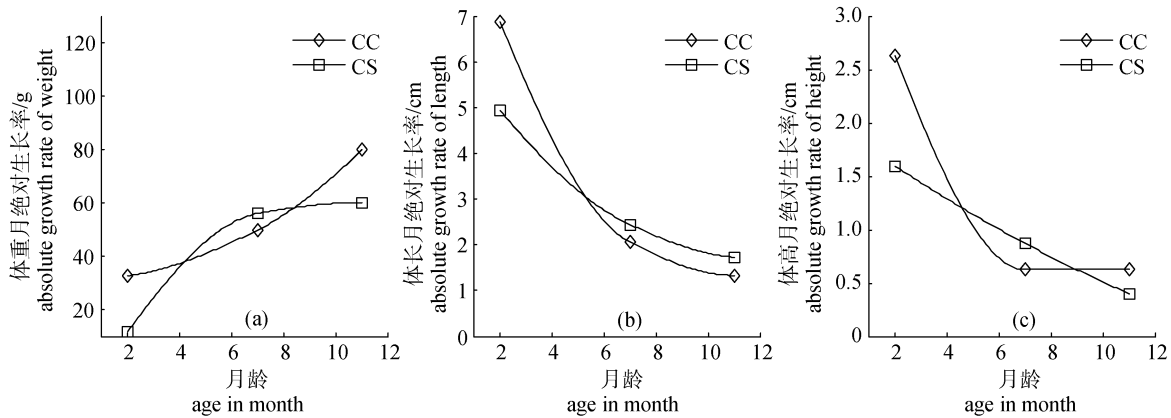


图 3 CS 组和 CC 组的绝对生长率曲线

(a) 体重; (b) 体长; (c) 体高.

Fig. 3 Absolute growth rate curves of *S. chuatsi* ♀ × *S. scherzeri* ♂ F<sub>1</sub> (CS) and *S. chuatsi* (CC) (a) body weight; (b) body length; (c) body height.

**2.2.3 相对生长率曲线比较** CS 组和 CC 组体重、体长和体高的相对生长率曲线如图 4 所示。

在 0.3~11 月龄时期, CS 组和 CC 组体重、体长、体高的相对生长率均呈明显下降的趋势(图 4)。

CS 组在 7 月龄时体重、体长、体高的相对生长率分别高于 CC 组 190.51%、9.40%和 14.83%, 并且在 11 月龄时 CS 组体长的相对生长率仍高于 CC 组 2.17%。

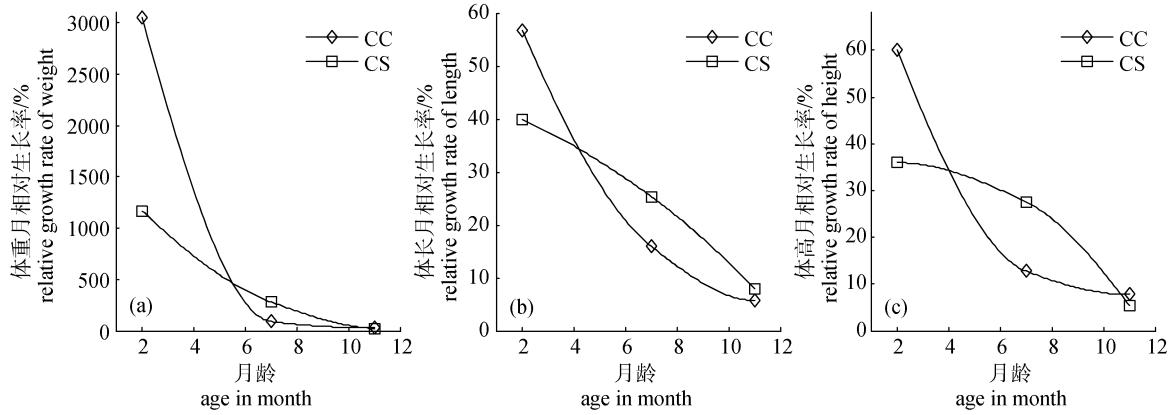


图 4 CS 组和 CC 组体重、体长和体高的相对生长率曲线

CS 组和 CC 组 2 月龄的体重、体长、体高相对生长率=实际绝对生长率/10

Fig. 4 Relative growth rate curves of body weight, body length and body height of *S. chuatsi* ♀ × *S. scherzeri* ♂ F<sub>1</sub>(CS) and *S. chuatsi*(CC)

Relative growth rate of CS and CC populations at the age of 2 months were a tenth of their true value

2.3 杂交子一代体重和体长的生长关系

CS 组和 CC 组体重与体长关系均可采用公式(4)所示的鱼类幂函数生长方程进行分析。通过对实际测量值进行拟合,可以得到 CS 组和 CC 组体重与体长的幂函数曲线,如图 5 所示。

CS 组体重与体长关系的幂函数生长方程为

$W=0.059 \times L^{2.722}$ , 决定性指数(coefficient of determination)  $R^2=0.992$ 。CC 组的幂函数生长方程为  $W=0.058 \times L^{2.740}$ ,  $R^2=0.995$ 。两曲线的决定性指数接近于 1, 说明拟合效果均较好; 两曲线拟合方程间参数  $a$  和  $b$  的差异很小, 说明在 0.3~11 月龄期间 CS 与 CC 组体重与体长的生长关系是接近一致的。

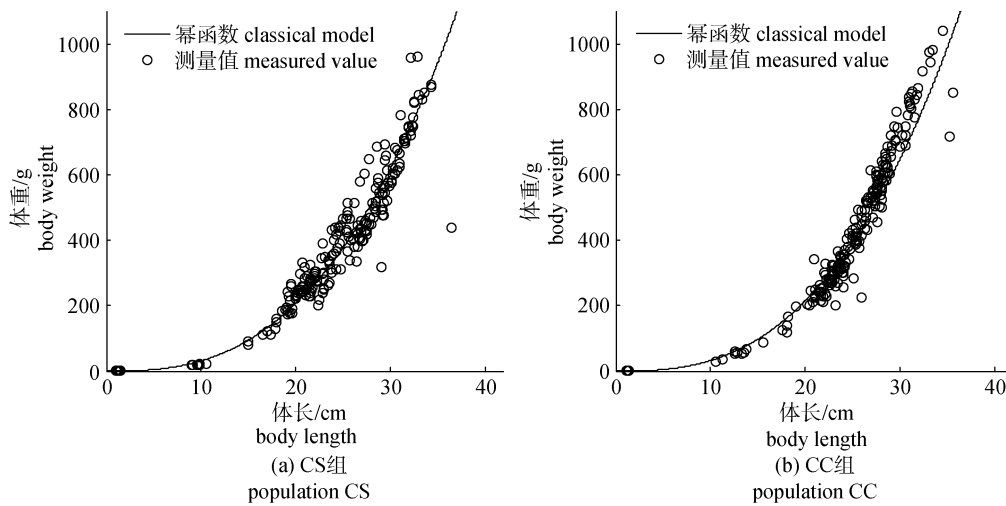


图 5 CS 组和 CC 组体重与体长关系

Fig. 5 Relationship between body weight and body length of *S. chuatsi* ♀ × *S. scherzeri* ♂ F<sub>1</sub>(CS) and *S. chuatsi* (CC)

2.4 杂交子一代的肥满度

根据公式(5)至(8)计算得到的 CS 组和 CC 组在 4 个测试时间点的肥满度见表 2。

由 4 种方法计算得到的肥满度, 在 0.3 月龄

到 2 月龄期间两组合均呈现下降趋势, 从 2 月龄到 7 月龄期间两组合均呈现上升趋势; 从 7 月龄到 11 月龄期间 CS 组的肥满度下降而 CC 组上升。

表 2 0.3 月龄、2 月龄、7 月龄和 11 月龄 CS 组和 CC 组的肥满度  
Tab. 2 Relative fatness of *S. chuatsi* ♀×*S. scherzeri* ♂ F<sub>1</sub> and *S. chuatsi* at the age of 0.3, 2, 7 and 11 months

月龄 age	Ricker 相对状态指数 $K'$ relative condition factor $K'$		Le Cren 相对状态指数 $K_n$ relative condition factor $K_n$		Jones 状态指数 $B$ condition factor $B$		Richter 状态指数 $B'$ condition factor $B'$	
	CC	CS	CC	CS	CC	CS	CC	CS
0.3	6.334	5.565	1.092	0.943	0.167	0.147	0.462	0.410
2	5.037	4.191	0.868	0.710	0.068	0.068	0.179	0.208
7	5.558	6.796	0.958	1.152	0.071	0.084	0.205	0.244
11	6.448	5.785	1.112	0.981	0.073	0.072	0.198	0.229

### 3 讨论

#### 3.1 杂交子一代的生长优势

杂种优势是指杂交子代获得双亲的优良性状,或者是产生双亲没有的优良性状。如耐盐的金斑罗非鱼(*Oreochromis spilurus*)与遗传改良后生长快速的尼罗罗非鱼进行杂交,将体重为 3.5 g 的罗非鱼养殖 180 d 后发现,金斑罗非鱼♀×改良尼罗罗非鱼♂反交种在海水中的生长性能显著高于纯种和正交种,其平均体重(mean weight, MWT)为 165.9 g,日生长率(daily growth rate, DGR)为 0.9 g/(ind·d),特定生长率(specified growth rate, SGR)为 2.14%/d,存活率为 96.3%,相应的杂种优势率分别达到了 41.3% (MWT)、42.5% (DGR)、10.7% (SGR) 和 22.1%(存活率)。而在淡水中,正反交种均比改良尼罗罗非鱼生长慢,表明反交种继承了改良尼罗罗非鱼的生长特性和金斑罗非鱼的耐盐性能<sup>[36]</sup>。斑点叉尾鮰♀×长鳍真鮰♂的杂种在生长速度、食物转化率、耐低氧和耐高密度养殖等性能上优于其父母本<sup>[37-38]</sup>,并且相对于亲本,该杂种对柱状黄杆菌和鲧败血症病原菌等有较高的抗病性<sup>[43-44]</sup>。

本实验结果显示,池塘养殖的翘嘴鲻♀×斑鳊♂杂种 F<sub>1</sub> 在生长性能上具有一定的杂种优势,在 0.3 月龄和 11 月龄时杂种 F<sub>1</sub> 体长生长速度比母本翘嘴鲻快,其超亲杂种优势率分别为 2.48%和 0.91%,并且在 7 月龄时体重与翘嘴鲻差异不显著,而体重、体长和体高月绝对生长率和月相对生长率均大于翘嘴鲻,表现优于母本的阶段生长优势。据研究报道,1 龄时野生翘嘴鲻平均体重为 119 g,养殖翘嘴鲻体重为 300~500 g<sup>[45-46]</sup>,斑鳊

池塘养殖至 1 龄时平均体重为 40~60 g<sup>[47]</sup>,网箱养殖至 1.5 龄时平均体重为 213 g<sup>[48]</sup>。对比上述翘嘴鲻和斑鳊的生长数据可见,翘嘴鲻♀×斑鳊♂杂种 F<sub>1</sub> 在生长速度上改良了父本斑鳊生长慢的缺点,遗传了母本翘嘴鲻的快速生长性能,11 月龄时杂种 F<sub>1</sub> 平均体重已达到商品规格(540.9 g±173.7 g)。此外,与钱叶周等<sup>[49]</sup>报道的反交种 F<sub>1</sub>(斑鳊♀×翘嘴鲻♂)网箱养殖近 8 月龄时体重(221.3 g±35.4 g)相比,翘嘴鲻♀×斑鳊♂杂种 F<sub>1</sub> 在 7 月龄时的体重(300.35 g±118.21 g)已超过其反交种,翘嘴鲻♀×斑鳊♂的杂交组合比反交组合更具有生长优势。

#### 3.2 杂交子一代生长曲线

鱼类的生长一般可分为 3 个阶段,即快速生长、稳定生长和衰老阶段,且体重、体长和体高的生长进入下一阶段的时间可能各自不同。鱼类体重与体长的生长方程大多可采用幂函数公式  $W = a \cdot L^b$  来拟合,公式中如果  $b < 3$ ,为负异速增长,即体长的增长快于体重的增加;如果  $b = 3$ ,为等速增长,体长和体重的增加等速;如果  $b > 3$ ,为正异速增长,体重的增加快于体长的增长<sup>[50-53]</sup>。本研究中,0.3~11 月龄期间杂交子一代的体重、体长和体高均处于快速生长阶段,与已报道的母本翘嘴鲻( $W = 0.02252 \times L^{3.0924}$ )和父本斑鳊( $W = 2.1317 \times 10^{-3} \times L^{3.0156}$ )的体重与体长的关系相一致<sup>[54-55]</sup>。杂交子一代的体重与体长的幂函数的生长方程( $W = 0.059 \times L^{2.722}$ ,  $R^2 = 0.992$ )中  $a$  和  $b$  值与对照组翘嘴鲻( $W = 0.058 \times L^{2.740}$ ,  $R^2 = 0.995$ )接近,表明杂交子一代与母本翘嘴鲻在这一时期均呈强负异速性生长( $b < 3$ ),即体长的增长快于体重的增加。此外,尽管在总体生长速度上杂交子一代较翘嘴鲻略慢,但其生长曲线与翘嘴鲻的变化趋势一致,说明其

早期的生长趋势与母本翘嘴鲻相似。

肥满度指数,也称身体状况指数,在养殖业中常用于分析不同饲养条件下动物的生长状况或繁殖能力与个体营养状况之间的关系<sup>[56-57]</sup>。与已报道的黑海鲈(*Salmo labrax*)与虹鳟的杂种在 200 d (近 7 月龄)时肥满度低于双亲的现象不同<sup>[58]</sup>,杂交子一代从 2 月龄到 7 月龄时肥满度指数升高,且数值比母本翘嘴鲻高,生长性状主要表现为体重的生长速度快于体长和体高速度,而在 11 月龄时肥满度下降且总体比母本翘嘴鲻数值低。杂交子一代肥满度的下降可能与其性成熟年龄提前相关。李忠焘等<sup>[59]</sup>研究发现在大的捕捞压力下小黄鱼个体生长加快,性成熟年龄提前,导致了肥满度降低。本研究中杂交子一代 11 月龄的生长数据是孵化后次年的 4 月测量的,此时雌雄个体的性腺发育成熟系数较高,1 龄的雄性杂交子一代已具有繁殖力,可以进行回交试验,这与其父母本的繁殖季节(每年的 4~6 月)相一致。通常情况下斑鲻和翘嘴鲻的性成熟年龄为雄鱼 1~2 龄,雌鱼 2~3 龄,因而杂交子一代 1 龄即达到性成熟可能是导致杂交子一代肥满度降低的原因之一。

#### 参考文献:

- [1] Zhang S, Tang Y J. Study on water pollution control in Baiyangdian area[M]. Beijing: Science Press, China, 1995: 6-14. [章申, 唐以剑. 白洋淀区域水污染控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 6-14.]
- [2] He J G, Zeng K, Weng S P, et al. Systemic disease caused by an iridovirus-like agent in cultured mandarin fish *Siniperca chuatsi* (Basillewsky), in China[J]. J Fish Dis, 2000, 23(3): 219-222.
- [3] Guo C J, Yang X B, Wu, Y Y, et al. Involvement of caveolin-1 in the Jak-Stat signaling pathway and infectious spleen and kidney necrosis virus infection in mandarin fish (*Siniperca chuatsi*)[J]. Mol Immunol, 2011, 48(8): 992-1000.
- [4] Fu X Z, Li N Q, Liu L H, et al. Genotype and host range analysis of infectious spleen and kidney necrosis virus (ISKNV)[J]. Virus Genes, 2011, 42(1): 97-109.
- [5] Fang Z Q, Chen J, Zheng W B, et al. RAPD analysis of wild population and cultivated population in *Siniperca chuatsi* Basilewsky[J]. Journal of Dalian Fisheries College, 2005, 20(1): 16-19. [方展强, 陈军, 郑文彪, 等. 鳊野生群体与养殖群体的 RAPD 分析[J]. 大连水产学院学报, 2005, 20(1): 16-19.]
- [6] Zheng W B. Culture of *Siniperca* Fishes[M]. Guangzhou: Guangdong Higher Education Press, 1993: 1-5. [郑文彪. 鳊鱼的人工养殖[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1993: 1-5.]
- [7] Su S Q, Zhang H Q, He Z Y, et al. A comparative study of the nutrients and amino acid composition of the muscle of *Siniperca chuatsi* and *Siniperca scherzeri*[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2005, 27(6): 898-901. [苏胜齐, 张海琪, 何中央, 等. 翘嘴鲻和斑鲻肌肉营养成分及氨基酸组成比较[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 27(6): 898-901.]
- [8] Zhang L, Fan Q X, Fang W, et al. Feeding and growth of *Siniperca scherzeri* larvae reared in circular racy way[J]. Acta Hydrobiol Sin, 2009, 33(6): 1152-1159.
- [9] Huang W, Liang X F, Qu C M, et al. 2013. Development and characterization of novel polymorphic microsatellite loci in *Siniperca scherzeri* Steindachner and *Siniperca chuatsi* (Basilewsky)[J]. Mol Biol Rep, 2013, 40(2): 751-756.
- [10] Chevassus B. Hybridization in fish[J]. Aquaculture, 1983, 33(1-4): 245-262.
- [11] Harrell R M. Chapter 8 Hybridization and genetics, in: Harrel, R.M. (Eds.), Striped Bass and Other Morone Culture[M]. Amsterdam: Elsevier Science Press, 1997: 217-234.
- [12] Akinwande A A, Fagbenro O A, Adebayo O T. Comparative Growth and Survival of Reciprocal Hybrids Between *Clarias gariepinus* and *Clarias anguillaris*[J]. J Appl Aquac, 2012, 24(4): 349-355.
- [13] Koolboona U, Koonawootrittriron S, Kamolrat W, et al. Effects of parental strains and heterosis of the hybrid between *Clarias macrocephalus* and *Clarias gariepinus*[J]. Aquaculture, 2014, 424-425: 131-139.
- [14] Calcagnotto D, Almeida-Toledo L F, Bernardino G, et al. Biochemical genetic characterization of F<sub>1</sub> reciprocal hybrids between neotropical pacu (*Piaractus mesopotamicus*) and tambaqui (*Colossoma macropomum*) reared in Brazil[J]. Aquaculture, 1999, 174(1-2): 51-57.
- [15] Bartley D M, Rana K, Immink A J. The use of inter-specific hybrids in aquaculture and fisheries[J]. Rev Fish Biol Fish, 2001, 10(3): 325-337.
- [16] Suplicy F M. Freshwater fish seed resources in Brazil. In: Bondad-Reantaso, M.G. (Ed.), Assessment of Freshwater Fish Seed Resources for Sustainable Aquaculture[M]. Rome: Food Agriculture Organization of United Nations, 2007.
- [17] Lou Y D. Fish Breeding[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001. [楼允东. 鱼类育种学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.]

- 版社, 2001.]
- [18] Gaylord T G, Gatlin D M. Dietary lipid level but not L-carnitine affects growth performance of hybrid striped bass (*Morone chrysops* ♀ × *M. saxatilis* ♂)[J]. *Aquaculture*, 2000, 190(3-4): 237-246.
- [19] Yangtze River Fisheries Research Institute. Artificial Propagation of Fish[M]. Beijing: Agriculture Press, 1973: 83. [长江水产研究所. 家鱼人工繁殖技术[M]. 北京: 农业出版社, 1973: 83.]
- [20] Yu J H, Xia D Q, Yang H, et al. Morphology of the progenies of *Oreochromis aurea*(♀) × *Siniperca chuatsi*(♂)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2003, 27(5): 431-435. [俞菊华, 夏德全, 杨弘, 等. 奥利亚罗非鱼(♀)×斑鲌(♂)杂交后代的形态[J]. *水产学报*, 2003, 27(5): 431-435.]
- [21] Yang H, Xia D Q, Liu L, et al. Studies on hereditary relationship between *Oreochromis aurea*(♀), *Siniperca chuatsi*(♂) and their offspring[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(5): 594-598. [杨弘, 夏德全, 刘蕾, 等. 奥利亚罗非鱼(♀)×斑鲌(♂)及其子代间遗传关系的研究[J]. *水产学报*, 2004, 28(5): 594-598.]
- [22] Wang J L, Yang H, Wu T T. Comparison on haematological indices between distant hybridization offsprings of *Oreochromis aurea*(♀) × *Siniperca chuatsi*(♂) and their parents[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, 15(5): 766-772. [王金龙, 杨弘, 吴婷婷. 奥利亚罗非鱼(♀)×斑鲌(♂)远缘杂交子代与亲本血液学指标的比较[J]. *中国水产科学*, 2008, 15(5): 766-772.]
- [23] Mi G Q, Lian Q P, Wang Y C, et al. Observation on embryonic development of crossbreed F<sub>1</sub> by *Siniperca scherzeri*(♀) × *Siniperca chuatsi*(♂)[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2009, 28(3): 254-269. [宓国强, 练青平, 王雨辰, 等. 杂交斑鲌胚胎发育观察[J]. *浙江海洋学院学报: 自然科学版*, 2009, 28(3): 254-269.]
- [24] Lu X, Sun J J, Wang H F, et al. Observations on embryonic development of reciprocal hybrids of *Siniperca kneri* Garman × *Siniperca chuatsi* Basilewsky and F<sub>2</sub> of *S. kneri* females × *S. chuatsi* males F<sub>1</sub>[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(5): 975-981. [卢薛, 孙际佳, 王海芳, 等. 大眼鲌与翘嘴鲌正反交及其正交子代自交的胚胎发育观察[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(5): 975-981.]
- [25] Liu Y H, Chen Y L, Zhu X P, et al. Morphological comparison of embryonic and post-embryonic developments in mandarin fish *Siniperca chuatsi*, spotted mandarin fish *Siniperca scherzeri* and their hybrids[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2012, 27(1): 6-11. [刘毅辉, 陈永乐, 朱新平, 等. 翘嘴鲌、斑鲌及其杂交后代的胚胎和配后发育比较[J]. *大连海洋大学学报*, 2012, 27(1): 6-11.]
- [26] Yuan Y C, Liang X F, Tian C X, et al. Identification of Embryonic Development Hybrids F<sub>1</sub> of *Siniperca chuatsi* (♀) × *Siniperca scherzeri* (♂) and Its F<sub>2</sub>[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(20): 4920-4923. [袁勇超, 梁旭方, 田昌绪, 等. 翘嘴鲌、斑鲌杂交子代 F<sub>1</sub> 及其自交子代 F<sub>2</sub> 胚胎发育的研究及鉴定[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(20): 4920-4923.]
- [27] Zhao J, Zhu X P, Chen Y L, et al. Morphological Variations of *Siniperca chuatsi*, *Siniperca scherzeri* and Their Hybrid (*S. chuatsi* × *S. scherzeri*)[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2008, 27(4): 506-509. [赵建, 朱新平, 陈永乐, 等. 翘嘴鲌、斑鲌及其杂交种形态差异分析[J]. *华中农业大学学报*, 2008, 27(4): 506-509.]
- [28] Mi G Q, Zhao J L, Jia Y Y, et al. Morphological and microsatellite analysis of *Siniperca chuatsi*♀ × *Siniperca scherzeri*♂ hybrid with their parents[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(2): 145-151. [宓国强, 赵金良, 贾永义, 等. 斑鲌(♀)×翘嘴鲌(♂)杂种 F<sub>1</sub> 的形态特征与微卫星分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(2): 145-150.]
- [29] Xu M Y, Guo J T, Zhao J L, et al. Morphological Characterization of Hybrids F<sub>1</sub> and F<sub>2</sub> in Spotted Mandarinfish *Siniperca scherzeri* ♀ × Mandarinfish *S. chuatsi* ♂[J]. *Fisheries Science*, 2013, 32(11): 636-640. [许淼洋, 郭金涛, 赵金良, 等. 斑鲌(♀)×翘嘴鲌(♂)杂交子一代、子二代的形态特征分析[J]. *水产科学*, 2013, 32(11): 636-640.]
- [30] Wang J L, Yang H, Wu T T. Comparison of the Ratio of Flesh and Nutrient Components between F<sub>3</sub> Offspring of *Oreochromis aurea* × *Siniperca chuatsi* and *O. aurea*[J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2006, 14(6): 879-883. [王金龙, 杨弘, 吴婷婷. 奥利亚罗非鱼×斑鲌杂交 F<sub>3</sub> 与其母本含肉率及肌肉营养成分的比较分析[J]. *农业生物技术学报*, 2006, 14(6): 879-883.]
- [31] Mi G Q, Chen J M, Lian Q P, et al. A comparison of muscle proximate analysis and amino acids composition among mandarin fish hybrid, mandarin fish and *Siniperca scherzeri*[J]. *Journal of Aquaculture*, 2009, 30(4): 35-37. [宓国强, 陈建明, 练青平, 等. 杂交斑鲌与斑鲌肌肉营养成分和氨基酸含量比较[J]. *水产养殖*, 2009, 30(4): 35-37.]
- [32] Wang J L, Yang H, Wu T T, et al. Genetic constitutions of distant hybridization offsprings between *Oreochromis aurea* (♀) × *Siniperca chuatsi* (♂)[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2007, 14(1): 32-38. [王金龙, 杨弘, 吴婷婷, 等. 奥利亚罗非鱼(♀)×斑鲌(♂)远缘杂交子代的遗传结构[J]. *中国水产科学*, 2007, 14(1): 32-38.]
- [33] Li C Y, Xu M Y, Zhao J L, et al. Microsatellite analysis of genetic characteristics in spotted mandarin fish *Siniperca scherzeri* ♀ × mandarin fish *S. chuatsi* ♂ hybrids[J]. *Fisheries*



- Science, 2014, 33(2): 97–102. [李传阳, 许森洋, 赵金良, 等. 斑鳊(♀)×鳊鱼(♂)杂交后代遗传特征的微卫星分析[J]. 水产科学, 2014, 33(2): 97–102.]
- [34] Wang H F, Sun J J, Lu X, et al. Identification of insulin-like growth factor I gene polymorphisms using high-resolution melting and its effect on growth traits in siniperoid species [J]. Fish Sci, 2013, 79(3): 439–446.
- [35] Taboada-Gaytan O, Pollak L M, Johnson L A, et al. Physical, compositional, and wet milling characteristics of grain from crosses of corn inbreds with exotic and nonexotic background[J]. Cereal Chem, 2010, 87(5): 486–496.
- [36] Richer W E. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations[J]. Bull Fish Res Board Can, 1975, 191: 1–382.
- [37] Le Cren E D. The length-weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in Perch (*Perca fluviatilis*)[J]. J Anim Ecol, 1951, 20: 201–219.
- [38] Jones R E, Petrell R J, Pauly D. Using modified length-weight relationships to assess condition of fish[J]. Aquac Eng, 1999, 20(4): 261–276.
- [39] Richter H, Luckstadt C, Focken U L, et al. An improved procedure to assess fish condition on basis of length-weight relationship[J]. Arch Fish Mar Res, 2000, 48(3): 226–235.
- [40] Ridha M T. Preliminary observations on growth and survival of *Oreochromis spilurus*×GIFT *Oreochromis niloticus* F<sub>1</sub> reciprocal hybrids in fresh and seawater[J]. Aquac Res, 2014, 45(3): 528–536.
- [41] Dunham R A, Brummett R E, Ella M O, et al. Genotype-environment interactions for growth of blue, channel and hybrid catfish in ponds and cages at varying densities[J]. Aquaculture, 1990, 85(1–4): 143–151.
- [42] Green B W, Rawles S D. Comparative growth and yield of channel catfish and channel×blue hybrid catfish fed a full or restricted ration[J]. Aquac Res, 2010, 41(9): e109–e119.
- [43] Dunham R A, Umali G M, Beam R, et al. Comparison of production traits of NWAC103 channel catfish, NWAC103 channel catfish× blue catfish hybrids, Kansas Select 21 channel catfish, and blue catfish grown at commercial densities and exposed to natural bacterial epizootics[J]. North Am J Aqu, 2008, 70(1): 98–106.
- [44] Arias C R, Cai W, Peatman E, et al. Catfish hybrid *Ictalurus punctatus* × *I. furcatus* exhibits higher resistance to columnaris disease than the parental species[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2012, 100(1): 77–81.
- [45] Zhang F Y, Hu W, Zhou Y X, et al. Growth speed of *Siniperca chuatsi* with consideration of its effect on water quality in East Lake[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2000, 24(1): 97–100. [张甫英, 胡炜, 周永欣. 武汉东湖鳊鱼生长速率与其它几种养殖鱼类对水质影响的比较研究[J]. 水生生物学报, 2000, 24(1): 97–100.]
- [46] Li M F. Research progress on biology of mandarin fish[J]. Modern Fisheries Information, 2010, 25(7): 16–21. [李明锋. 鳊鱼生物学研究进展[J]. 现代渔业信息, 2010, 25(7): 16–21.]
- [47] Li H J, Liu C, Cui Y Y. Highly benefits pond culture techniques of spotted mandarin fish[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2011, 24(3): 398–400. [李红敬, 刘超, 崔亚勇. 斑鳊池塘高效养殖技术[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2011, 24(3): 398–400.]
- [48] Zhao X L, Xia D M, Luo X N, et al. Growth characteristics and culture pattern of *Siniperca scherzeri* Steindachner cultured in cage[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2009, 22(2): 26–28, 48. [赵晓临, 夏大明, 骆小年, 等. 网箱养殖的鸭绿江斑鳊生长特性及饲养模式[J]. 水产学杂志, 2009, 22(2): 26–28, 48.]
- [49] Qian Y Z, Wu C, Qian D, et al. Comparison on growth-out performance between the hybrid of *Siniperca scherzeri* (♀) × *S. chuatsi* (♂) and their first selected generation in cage culture[J]. Journal of Aquaculture, 2013, 34(7): 1–4. [钱叶周, 吴超, 钱德, 等. 斑鳊(♀)×鳊(♂)杂交一代及其选育一代网箱养殖性能比较[J]. 水产养殖, 2013, 34(7): 1–4.]
- [50] Pitcher T J, Hart P B. Fisheries ecology[M]. Westport: AVI Publishing Company, 1982.
- [51] Huang Z L, Chang J B. Fractal characteristics of length-weight relationship in fish[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1999, 23(4): 330–336. [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.]
- [52] Froese R. Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations[J]. J Appl Ichthyol, 2006, 22(4): 241–253.
- [53] 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. [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.]
- [54] Wu L X, Jiang Z Q, Qin K J, et al. Study on the Age and Growth of *Siniperca scherzeri* in Biliuhe Reservoir[J]. Journal of Dalian Fisheries College, 1996, 11(2): 30–38. [吴立新, 姜志强, 秦克静, 等. 碧流水库斑鳊年龄和生长的研究[J]. 大连水产学院学报, 1996, 11(2): 30–38.]
- [55] Li D, Yang C, Xv G L, et al. Biology of mandarin fish (*Siniperca chuatsi* Basilesky) in Poyang Lake[J]. Acta Agri-

- culture Jiangxi, 1998, 10(4): 14–22.[李达, 杨春, 徐光龙, 等. 鄱阳湖鳊鱼的生物学[J]. 江西农业学报, 1998, 10(4): 14–22.]
- [56] Badiani A, Stipa S, Nanni N, et al. Physical indices, processing yields, compositional parameters and fatty acid profile of three species of cultured sturgeon (*Genus Acipenser*)[J]. J Sci Food Agr, 1997, 74(2): 257–264.
- [57] Dai Q, Dai J H, Li C, et al. Discussion on relative fatness[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2006, 12(5): 715–718.[戴强, 戴建洪, 李成, 等. 关于肥满度指数的讨论[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(5): 715–718.]
- [58] Akhan S, Sonay F D, Okumus I, et al. Inter-specific hybridization between Black Sea trout (*Salmo labrax* Pallas, 1814) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792) [J]. Aquac Res, 2011, 42(11): 1632–1638.
- [59] Li Z L, Jin X S, Shan X J, et al. Inter-annual changes on body weight-length relationship and relative fatness of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(3): 602–610.[李忠炉, 金显仕, 单秀娟, 等. 小黄鱼体长-体质量关系和肥满度的年际变化[J]. 中国水产科学, 2011, 18(3): 602–610.]

## Analysis of early-stage growth rate of the hybrid F<sub>1</sub> of *Siniperca chuatsi* ♀ × *S. scherzeri* ♂

SUN Jijia<sup>1</sup>, HE Jianguo<sup>2</sup>, LIU Li<sup>1</sup>, WANG Haifang<sup>2</sup>, LU Xue<sup>2,3</sup>, XU Peng<sup>2,3</sup>, LI Guifeng<sup>2,3</sup>

1. Animal Science College, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2. South China Sea Bio-Resource Exploitation and Utilization Collaborative Innovation Center, Institute of Aquatic Economic Animals, School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Guangdong Engineering Technology Research Center, Foshan Nanhai Bairong Aquatic Breeding Co. Ltd, Foshan 528216, China.

**Abstract:** Based on the measured data of three important economic traits (body weight, body length and body height) of the hybrids F<sub>1</sub> of *Siniperca chuatsi* ♀ × *S. scherzeri* ♂ and *Siniperca chuatsi* individuals at the ages of 0.3 months, 2 months, 7 months and 11 months, the growth rate and heterosis of the hybrids F<sub>1</sub> were analyzed and compared with *Siniperca chuatsi*, using the performance metrics of coefficient of variation, high-parent heterosis, relative and absolute growth rate, relationship curve of body weight and body height, and relative fatness. At age of 7 months, the mean body weight of the hybrids F<sub>1</sub> (300.4 g ± 118.2 g) was not significantly different with *S. chuatsi* (305.2 g ± 82.5 g), while the mean monthly relative growth rate of body weight, body length and body height (280.13%, 25.30% and 27.55%) of the hybrids F<sub>1</sub> were higher than that of *S. chuatsi* (89.62%, 15.90% and 12.72%). The high-parent heterosis of the hybrids F<sub>1</sub> for body length at age of 0.3 months and 11 months was 2.48% and 0.91%, respectively. All growth rate curves of the hybrids F<sub>1</sub> were similar with their female parent *S. chuatsi*. However, the mean body weight of the hybrids F<sub>1</sub> (540.88 g ± 173.66 g) was significantly lower than *S. chuatsi* (624.45 g ± 154.11 g) at age of 11 months. The coefficient of determination (0.992 and 0.995), condition factor (0.059 and 0.058) and allometric growth factor (2.722 and 2.740) for relationship curve of body weight and body height of the hybrids F<sub>1</sub> and *Siniperca chuatsi* were almost identical. These results indicated that the primary growth trend of the hybrids F<sub>1</sub> was similar to *S. chuatsi*, the relationship curve of body weight and body height of the hybrids F<sub>1</sub> was consistent with that of *S. chuatsi*, even though their overall growth rate was slightly slower than *S. chuatsi*. The hybrids F<sub>1</sub> successfully inherited the fast growth trait from their female parent *S. chuatsi*, with some high-parent heterosis in body length.

**Key words:** *Siniperca chuatsi*; *Siniperca scherzeri*; first hybrid filial generation; growth rate; heterosis

**Corresponding author:** LI Guifeng. E-mail: liguif@mail.sysu.edu.cn