

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19326

4 个企鹅珍珠贝 F_3 选育系的生长存活差异及其生长规律

魏海军^{1, 2, 3, 4}, 陈明强^{1, 2, 3}, 邓正华^{1, 2, 3}, 李有宁^{1, 2, 3}, 王雨^{1, 2, 3}, 马振华^{1, 2, 3}, 于刚¹

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东 广州 510300;
2. 中国水产科学研究院南海水产研究所热带水产研究开发中心, 海南 三亚 572018;
3. 三亚热带水产研究院, 海南 三亚 572018;
4. 海南大学海洋学院, 海南 海口 570228

摘要: 为比较企鹅珍珠贝 [*Pteria penguin* (Röding, 1798)] 海南金唇选育系 (GLHH)、海南白唇选育系 (WLHH)、广西金唇选育系 (GLGG) 和广西白唇选育系 (WLGG) 的生长存活差异, 及了解 4 个选育系的生长规律, 自 2018 年 1 月底至 2018 年 12 月底连续监测养殖于海南陵水黎族自治县新村港的 4 个企鹅珍珠贝选育系 F_3 的存活率及其壳长、壳高、壳宽、铰合线长和体重的生长情况。使用单因素方差分析和生长模型拟合等方法对数据进行分析。结果显示, 4 个企鹅珍珠贝选育系的生长及存活率存在显著差异 ($P < 0.05$), 海南金唇选育系的生长及存活率最优, 广西白唇选育系的生长及存活率最差, 表明企鹅珍珠贝的生长存活可能与环境、贝龄、壳色和地理种群有关。SGompertz 生长模型为企鹅珍珠贝 5 个生长性状的通用生长模型。研究表明, 4 个企鹅珍珠贝选育系的生长规律存在差异, 且企鹅珍珠贝 5 个生长性状的生长规律存在差异, 其中壳长和铰合线长的生长拐点出现得最早, 分别出现在 7.9 (GLHH)~8.5 (WLHH) 月龄和 7.9 (GLHH)~9.1 (WLGG) 月龄; 其次是壳高和壳宽, 生长拐点分别出现在 11.6 (GLHH)~15.9 (WLGG) 月龄和 11.8 (GLHH)~14.3 (WLGG) 月龄时; 体重的生长拐点出现得最晚, 在 15.8 (GLHH)~18.7 (WLGG) 月龄。该研究结果表明海南金唇选育系早期生长阶段具有高存活率和优良的生长性能, 广西白唇选育系可能具有最大的生长潜力 (生长性状的生长极限最大), 本研究可为企鹅珍珠贝的良种选育、健康养殖及优质珍珠的生产提供借鉴。

关键词: 企鹅珍珠贝; 金唇选育系; 白唇选育系; 生长性状; 存活率; 生长模型

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)06-0624-13

企鹅珍珠贝 [*Pteria penguin* (Röding, 1798)] 贝壳内面珍珠层边缘一般呈古铜色, 中间为银白色, 并带有虹彩光泽^[1-2], 是热带和亚热带培育大规模附壳珍珠和正圆形珍珠的大型珍珠贝类。因其个体大, 生长和分泌珍珠质速度快, 适应环境能力强及存活率高等特点^[3-4], 已成为中国培育海水

珍珠的主要贝种之一。本课题组在企鹅珍珠贝的选种过程中发现企鹅珍珠贝珍珠层边缘颜色存在多样性, Gu 等^[5]和 Ky 等^[6]研究表明珍珠的颜色在一定程度上取决于细胞小片贝壳珍珠层颜色, 而贝壳珍珠层的颜色很大程度上由遗传因素决定^[7]。因此, 选育具有优良生长性状及特殊珍珠层边缘

收稿日期: 2019-11-06; 修订日期: 2020-01-21.

基金项目: 广东省渔港建设和渔业产业发展专项 (B201601-Z06); 南海海洋资源利用国家重点实验室开放课题项目 (2018010); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (中国水产科学研究院南海水产研究所) 资助项目 (2016TS29); 海南省重点科技计划项目 (ZDXM2015057); 三亚市配套资金专项 (2016PT05); 农业农村部财政专项 (NHYYSWZZZYKZX2020).

作者简介: 魏海军 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事贝类遗传育种与苗种繁育, E-mail: whjocean@163.com; 陈明强 (1968-), 并列第一作者, 男, 助理研究员, 主要从事海水珍珠贝增养殖技术研究, E-mail: chenmingqiang@163.com

通信作者: 李有宁 (1958-), 男, 研究员, 主要从事海水珍珠贝育种及养殖技术研究. E-mail: liyouningc@tom.com

王雨 (1967-), 女, 副研究员, 主要从事海水养殖技术研究. E-mail: winterrose@163.com

颜色的企鵝珍珠贝选育系是可行的, 且对提高中国企鵝珍珠贝珍珠的产量和质量具有重大意义。

不同珍珠贝珍珠层颜色及所产珍珠颜色各不相同。种间差异造就了三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)^[8-9]、大珠母贝(*Pinctada maxima*)^[10]、珠母贝(*Pinctada margaritifera*)^[11]、马氏珠母贝(*Pinctada martensii*)^[5]、企鵝珍珠贝^[12]等珍珠贝贝壳珍珠层颜色和所产珍珠颜色的丰富性。种内遗传多样性表明珍珠贝贝壳珍珠层颜色及所产珍珠颜色是可以遗传改良的^[6, 13]。以壳色作为遗传标记, 对贝类进行遗传育种及种质遗传改良的研究工作正在逐渐开展, 如在四角蛤蜊(*Macrta veneriformis*)^[14]、文蛤(*Meretrix meretrix*)^[15-16]、长牡蛎(*Crassostrea gigas*)^[17-18]、合浦珠母贝(*Pinctada fucata*)^[19]和三角帆蚌^[20-21]等中均有壳色选育系相关的报道, 且双壳贝类的壳色与生长发育相关联^[22]。

建立生长模型有利于生物个体生长发育规律的研究。近些年, 生长模型越来越多地应用到了贝类的生长发育规律研究中, 如在食用贝类中有墨西哥湾扇贝(*Argopecten irradians concentricus*)^[23-24]、背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)^[25]、九孔鲍(*Haliotis diversicolor supertexta*)^[26]、岩生牡蛎(*Saccostrea cucullata*)^[27]、长牡蛎^[28-29]和扁牡蛎(*Ostrea angasi*)^[30]等, 在珍珠贝类中有淡水珍珠蚌(*Margaritifera margaritifera*)^[31]、马氏珠母贝^[32-33]、彩虹唇珍珠贝(*Pteria sterna*)^[34-35]和大珠母贝^[36]等种类, 其中常用的生长模型有 Gompertz、Logistic、von Bertalanffy 和 Richards 等。关于企鵝珍珠贝的研究现主要集中在人工育苗^[37]、养殖^[38]、珍珠培育^[39]、形态学^[40]、行为学^[41]、组织学^[42]等方面。国内外还尚未有企鵝珍珠贝金唇和白唇选育系的相关报道, 且企鵝珍珠贝生长发育规律相关研究的报道也较少, 仅见郭华阳等^[43]用 Gompertz、Logistic 和 von Bertalanffy 生长模型对海南新村港养殖的常规企鵝珍珠贝各生长性状(壳长、壳高、壳宽、体重)的生长进行拟合研究。

本研究以吊养于海南省陵水黎族自治县新村港的企鵝珍珠贝海南金唇选育系、海南白唇选育系、广西金唇选育系和广西白唇选育系 F_3 为实验对象, 评价不同地理群体金唇和白唇选育系的生

产性能及其生长发育规律, 以期为企鵝珍珠贝的良种选育、健康养殖及特色优质珍珠的生产提供借鉴及理论支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 企鵝珍珠贝苗种繁育 以海南和广西两地的野生企鵝珍珠贝为亲本, 分别选育金唇和白唇企鵝珍珠贝群体, 并通过闭锁群体继代选育进行金唇和白唇性状的纯化。2017 年 9 月中旬, 挑选金唇和白唇性状纯正、发育良好、性腺成熟的 4 个选育系 F_2 (海南金唇选育系、广西金唇选育系、海南白唇选育系和广西白唇选育系) 各 40 只以上(雌雄比为 3:1)作为亲本, 通过阴干刺激自然排卵(精)授精构建 4 个选育系 F_3 群体。进入直线铰合期的幼虫, 按 2~4 ind/mL 的密度移入育苗池中培养。早期幼虫培育以湛江等鞭金藻(*Isochrysis zhanjiangensis*)和巴夫藻(*Pavlova viridis*)为饵料, 后期主要投喂亚心形扁藻(*Platymon subcordiformis*), 每天换水 1/3, 连续 24 h 充气培养。约有 20% 幼虫出现色素点(眼点)时, 投放采苗器。

1.1.2 企鵝珍珠贝养殖管理 2017 年 12 月底, 苗种壳长至 4.0 mm 以上时(3.5 月龄), 移至中国水产科学研究院南海水产研究所热带水产研究开发中心陵水试验基地养殖海区的浮筏架养殖。该养殖海区水深 9 m, 水温为(27.2±3.1) °C, 盐度为 30.1±2.6, 透明度为(2.3±0.8) m。出池苗采用 60 目网袋套在 30 cm×30 cm×20 cm 的拱形铁框笼中养殖, 放养密度为 300 只/笼。海上吊养期间定期调整养殖密度, 清理附着生物, 更换笼具, 4 个选育系的养殖密度和管理方法相同, 具体参照珍珠贝常规养殖方法^[1]。

1.2 实验方法

自放企鵝珍珠贝稚贝于海区养殖后, 每月月底清点死亡数统计存活率, 第 1 次清点时间为 2018 年 1 月底(月龄为 4.5), 每个选育系清点 3 笼($N_0=300$ 只, 调整养殖密度时单独分笼), 计算每笼的存活率后取其平均值。最后 1 次清点时间为 2018 年 12 月月底(月龄为 15.5)。每隔 1 月随机抽取 4 个选育系各 30 只个体(取样群体>800 只), 清

除贝体附着生物后,使用游标卡尺测量其壳长、壳高、壳宽和铰合线长 4 个形态性状,精确到 0.01 mm;体重用电子天平称量,精确到 0.01 g。第 1 次测量时间为 2018 年 1 月底(4.5 月龄),最后 1 次测量时间为 2018 年 11 月月底(14.5 月龄)。

1.3 数据分析

实验数据用 Excel 2003 进行初步整理,计算存活率(survival rate, SR)、绝对生长速度(absolute growth rate, AGR)和相对生长速度(relative growth rate, RGR),统计结果以平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)表示。用 SPSS 18.0 进行单因素方差分析,比较 4 个选育系各个时期的生长和存活率的差异,差异显著度为 0.05。用 Origin 9.0 中的 SGompertz、Slogistic1 和 SRichard2 3 个生长曲线方程拟合企鹅珍珠贝形态性状和体重的生长,从中挑选出一个通用的生长模型。用该通用模型分别拟合 4 个选育系的 5 个生长性状,并计算其拐点性状值和最大月增量,其中拐点性状值为该性状在拐点时间的值,最大月增量为曲线方程在拐点时间的一阶导数值(用 DPSv9.50 数值分析求得)。相关计算公式和生长模型如下:

$$SR_{it} = N_{it} / N_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$AGR_{ijt} = y_{ijt} - y_{ijt(t-2)} \quad (2)$$

$$RGR_{ijt} = (y_{ijt} - y_{ijt(t-2)}) / y_{ijt(t-2)} \quad (3)$$

式中, SR_{it} 为第 i 组企鹅珍珠贝在 t 时的存活率,单位为%; N_{it} 为第 i 组企鹅珍珠贝每笼在 t 时的存活数, N_0 为每笼的初始企鹅珍珠贝数, $N_0=300$ 只; AGR_{ijt} 为第 i 组企鹅珍珠贝第 j 个生长性状从 $t-2$ 到 t 时的绝对生长速度,单位为 mm/(2 月), g/(2 月); RGR_{ijt} 为第 i 组企鹅珍珠贝第 j 个生长性状从 $t-2$ 到 t 时的相对生长速度; y_{ijt} 为第 i 组企鹅珍珠贝第 j 个生长性状在 t 时的测量均值。 i 表示 4 个企鹅贝选育系,取值为 1、2、3 和 4,分别表示海南金唇选育系、广西金唇选育系、海南白唇选育系和广西白唇选育系; j 表示企鹅珍珠贝的 5 个生长性状,取值为 1、2、3、4 和 5,分别表示企鹅珍珠贝的壳长、壳高、壳宽、铰合线长和体重; t 为企鹅珍珠贝的月龄,在式(1)中其取值为 4.5、5.5、6.5、7.5、8.5、9.5、10.5、11.5、12.5、13.5、14.5 和 15.5,在式(2)和(3)中其取值为 6.5、8.5、10.5、

12.5 及 14.5。

生长模型及其表达式:

$$\text{SGompertz: } y = L_{\infty} \times \exp\{-\exp[-k \times (t - t_0)]\}$$

$$\text{Slogistic1: } y = L_{\infty} / \{1 + \exp[-k \times (t - t_0)]\}$$

SRichards2:

$$y = L_{\infty} \times \{1 + (d-1) \times \exp[-k \times (t - t_0)]\}^{1/(1-d)}$$

3 个模型的参数意义存在一定的差异(3 个模型中 L_{∞} 参数意义一致),其中 SGompertz 中 y 为待拟合生长性状在 t 时的值, L_{∞} 为该生长性状的生长极限(mm, g), k 为增长常数(mm/月, g/月), t 为企鹅贝的月龄, t_0 为生长拐点时间^[44]。

2 结果与分析

2.1 海区养殖期间企鹅珍珠贝的存活率差异

如图 1 所示,4 个企鹅珍珠贝选育系的存活率随养殖时间的变化趋势基本一致,金唇选育系的存活率一般高于白唇选育系,海南选育系的存活率一般高于广西选育系的存活率;其中海南金唇选育系的存活率一般最高,广西白唇选育系的存活率一般最低。在企鹅珍珠贝 3.5~11.5 月龄期间,各选育系的存活率间均无显著差异($P>0.05$)。在

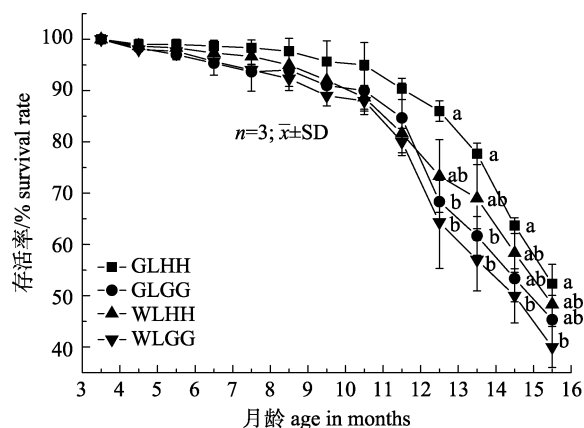


图 1 不同选育系企鹅珍珠贝存活率差异

GLHH 为海南金唇选育系, GLGG 为广西金唇选育系, WLHH 为海南白唇选育系, WLGG 为广西白唇选育系, 不同小写字母表示相同月龄的 4 个选育系间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 1 Differences in survival rate of different *Pteria penguin* breeding lines

GLHH means golden-lip breeding line of Hainan; GLGG means golden-lip breeding line of Guangxi; WLHH means white-lip breeding line of Hainan; WLGG means white-lip breeding line of Guangxi. Different letters indicate significant difference among the four breeding lines at the same age of month ($P<0.05$).

12.5~15.5月龄时,海南金唇选育系的存活率显著高于广西白唇选育系($P<0.05$),且海南金唇选育系的存活率显著高于广西金唇选育系(12.5月龄和13.5月龄, $P<0.05$);但海南金唇选育系与海南白唇选育系的存活率间差异不显著($P>0.05$),广西金唇选育系与广西白唇选育系的存活率间的差异亦不显著($P>0.05$)。

2.2 企鹅珍珠贝的生长性状差异

在6.5月龄、8.5月龄、10.5月龄和14.5月龄时,4个企鹅珍珠贝选育系的壳长间存在显著差异($P<0.05$);但在4.5月龄和12.5月龄时差异不显著($P>0.05$,图2A)。其中海南金唇选育系的壳长一般最大,广西白唇选育系的壳长一般最小。在6.5月龄、8.5月龄、10.5月龄和12.5月龄时,4个壳色选育系企鹅珍珠贝的壳高间存在显著差异($P<0.05$);在4.5月龄和12.5月龄时,差异不显著($P>0.05$,图2B);其中海南金唇选育系的壳高一般最大,广西白唇选育系的壳高一般最小。在6.5月龄、8.5月龄、10.5月龄、12.5月龄和14.5月龄时,4个选育系企鹅珍珠贝的壳宽间存在显著差异($P<0.05$);但在4.5月龄时差异不显著($P>$

0.05,图2C);其中海南金唇选育系的壳宽一般最大,广西白唇选育系的壳宽一般最小。在6.5月龄、8.5月龄和10.5月龄时,4个壳色选育系的企鹅珍珠贝的铰合线长间存在显著差异($P<0.05$);在4.5月龄、12.5月龄和14.5月龄时,差异不显著($P>0.05$,图2D);其中海南金唇选育系的铰合线长一般最大,广西白唇选育系的铰合线长一般最小。在6.5月龄、8.5月龄、10.5月龄、12.5月龄和14.5月龄时,4个选育系的企鹅珍珠贝的体重间存在显著差异($P<0.05$);但在4.5月龄时差异不显著($P>0.05$,图2E);其中海南金唇选育系的体重一般最大,广西白唇选育系的体重一般最小。

图2结果表明,4.5月龄时,4个企鹅珍珠贝选育系的生长性状(壳长、壳高、壳宽、铰合线长和体重)无显著差异($P>0.05$),之后其生长速度有所差异;其中海南金唇选育系的生长性能最优,其次是海南白唇选育系和广西金唇选育系,广西白唇选育系的生长性能最差。

2.3 企鹅珍珠贝的绝对生长速度及相对生长速度

4个企鹅珍珠贝选育系生长性状的绝对生长速度如图3所示。在6.5~14.5月龄时,企鹅珍珠

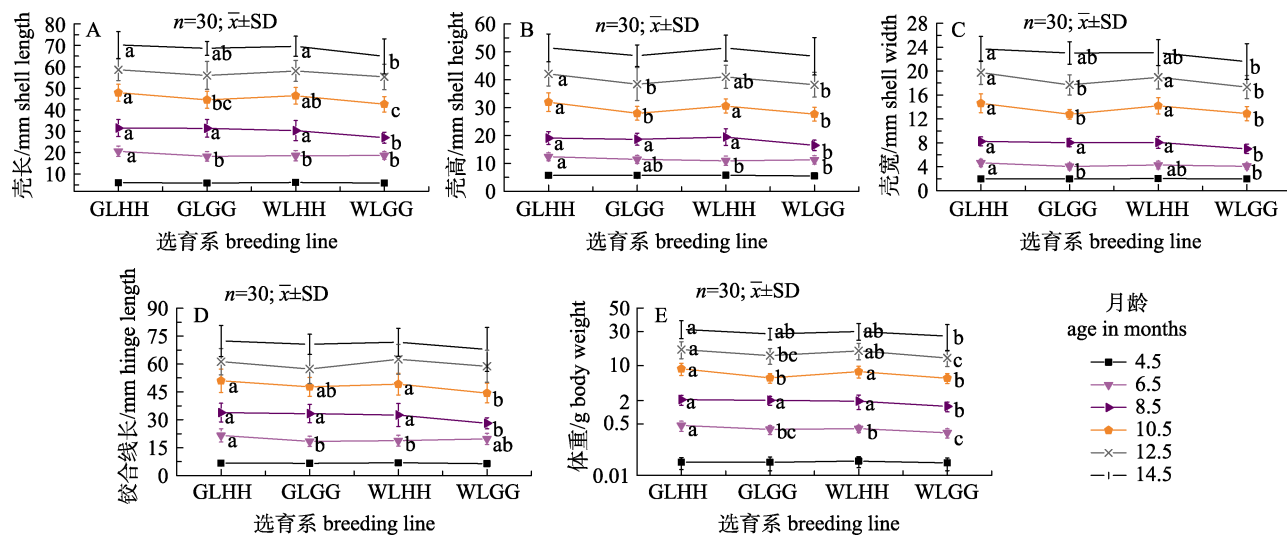


图2 4个企鹅珍珠贝选育系壳长(A)、壳高(B)、壳宽(C)、铰合线长(D)和体重(E)的生长差异
GLHH为海南金唇选育系, GLGG为广西金唇选育系, WLHH为海南白唇选育系, WLGG为广西白唇选育系。

不同小写字母表示相同月龄的4个选育系间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 2 Differences in growth of the shell length (A), shell height (B), shell width (C), hinge length (D) and body weight (E) of *Pteria penguin*

GLHH means golden-lip breeding line of Hainan; GLGG means golden-lip breeding line of Guangxi; WLHH means white-lip breeding line of Hainan; WLGG means white-lip breeding line of Guangxi. Different letters indicate significant differences among the four breeding lines at the same age of month ($P<0.05$).

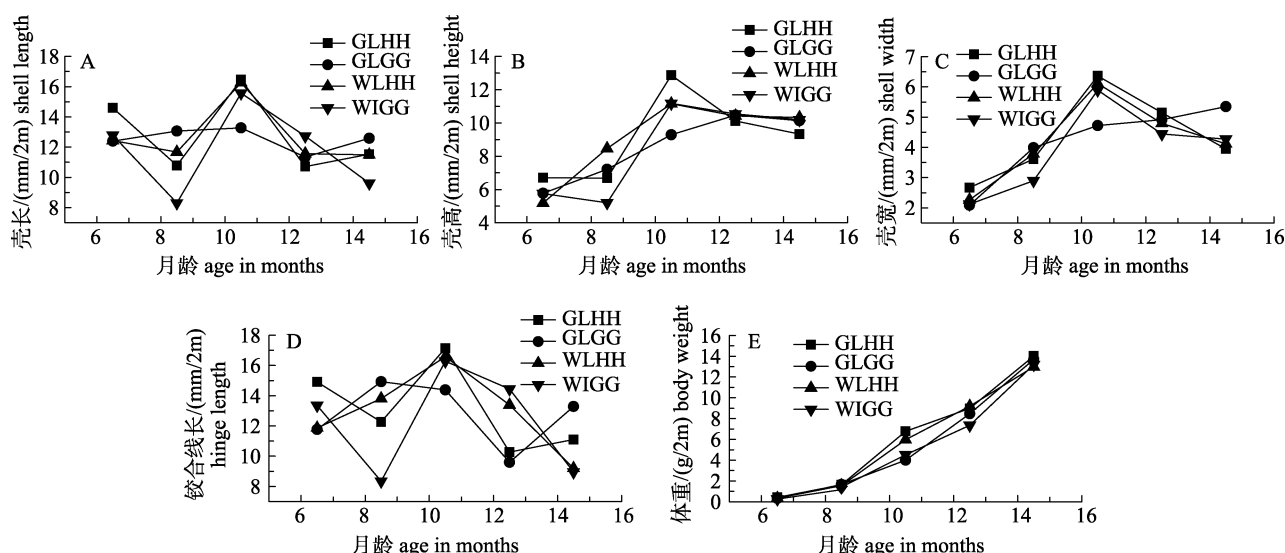


图 3 4 个企鹅珍珠贝选育系壳长(A)、壳高(B)、壳宽(C)、铰合线长(D)和体重(E)的绝对生长速率
GLHH 为海南金唇选育系, GLGG 为广西金唇选育系, WLHH 为海南白唇选育系, WLGG 为广西白唇选育系。

Fig. 3 The absolute growth rate of the shell length (A), shell height (B), shell width (C), hinge length (D) and body weight (E) of four *Pteria penguin* breeding lines
GLHH means golden-lip breeding line of Hainan; GLGG means golden-lip breeding line of Guangxi; WLHH means white-lip breeding line of Hainan; WLGG means white-lip breeding line of Guangxi.

贝海南金唇选育系和海南白唇选育系壳长的绝对生长速度变化趋势为类 W 型, 广西金唇选育系和广西白唇选育系壳长的绝对生长速度变化趋势为类 N 型, 其中 4 个选育系壳长的最高点都出现在 10.5 月龄时。海南金唇选育系和广西白唇选育系壳高的绝对生长速度变化趋势为类 N 型, 海南白唇选育系和广西金唇选育系壳高的绝对生长速度变化趋势为先增大后降低, 壳高的最大绝对生长速度一般出现在 10.5 月龄时和 12.5 月龄时。海南金唇选育系、海南白唇选育系和广西白唇选育系壳宽的绝对生长速度的变化趋势为先增大后降低, 最大绝对生长速度都出现在 10.5 月龄时, 而海南白唇选育系壳宽的绝对生长速度在 6.5~14.5 月龄区间不断地增大。广西金唇选育系和广西白唇选育系的铰合线长绝对生长速度变化趋势为类 N 型, 海南金唇选育系铰合线长绝对生长速度的变化趋势为类 W 型, 海南白唇选育系铰合线长的绝对生长速度的变化趋势为先增大后降低。4 个企鹅珍珠贝选育系体重的绝对生长速度在 6.5~14.5 月龄区间不断增大, 其中海南金唇选育系体重的绝对生长速度一般最大, 广西白唇选育系体重的绝对生长速度一般最小。

4 个企鹅珍珠贝选育系的相对生长速度如图 4 所示。广西金唇选育系和海南白唇选育系 5 个生长性状的相对生长速度表现为随着月龄增长持续下降, 其中 6.5~12.5 月龄时下降较为明显, 12.5~14.5 月龄时下降较缓。海南金唇选育系和广西白唇选育系 5 个生长性状在 6.5~8.5 月龄时的相对生长速度急剧下降, 8.5~10.5 月龄时基本持平或略微上升, 10.5~14.5 月龄表现为持续下降。

2.4 企鹅珍珠贝的早期生长曲线拟合

2.4.1 生长曲线的选择

用 SGompertz、Slogistic1 和 SRichard2 生长模型拟合 4 个企鹅贝选育系形态性状和体重的均值, 拟合结果如图 5 所示。Slogistic1 对企鹅珍珠贝壳长的拟合效果最差($R^2=0.991$); SRichard2 对企鹅珍珠贝壳长的拟合中 L_{∞} 值为 145, 该值与企鹅珍珠贝实际生长极限偏离较大, 且该值标准误差较大, 为 100(结果未显示); SGompertz 对企鹅珍珠贝生长性状的拟合最佳($R^2=0.996$, 图 5A)。SGompertz 对企鹅珍珠贝壳高的拟合程度高($R^2=0.999$), 其 L_{∞} 为 102, 与企鹅珍珠贝实际生长极限较吻合(图 5B)。3 个生长模型对企鹅珍珠贝壳宽的拟合都较好($R^2>0.998$), 其中 SGompertz 方程的 L_{∞} 值最贴近实际(图 5C)。

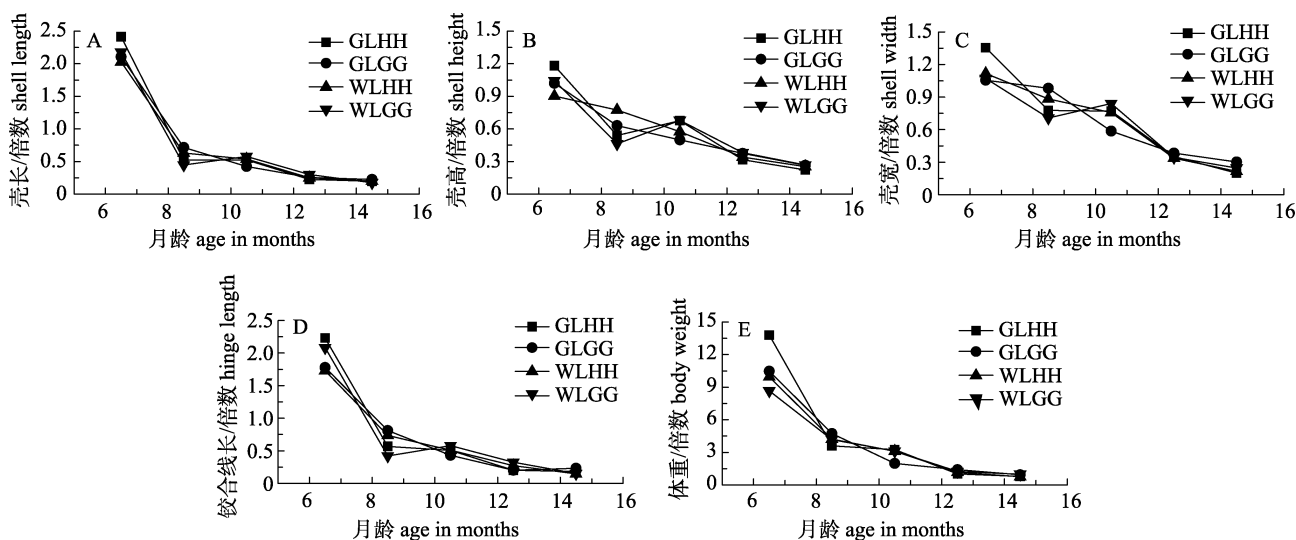


图 4 4 个企鹅珍珠贝选育系壳长(A)、壳高(B)、壳宽(C)、铰合线长(D)和体重(E)的相对生长速度
GLHH 为海南金唇选育系, GLGG 为广西金唇选育系, WLHH 为海南白唇选育系, WLGG 为广西白唇选育系。

Fig. 4 The relative growth rate of the shell length (A), shell height (B), shell width (C), hinge length (D) and body weight (E) of four *Pteria penguin* breeding lines
GLHH means golden-lip breeding line of Hainan; GLGG means golden-lip breeding line of Guangxi; WLHH means white-lip breeding line of Hainan; WLGG means white-lip breeding line of Guangxi.

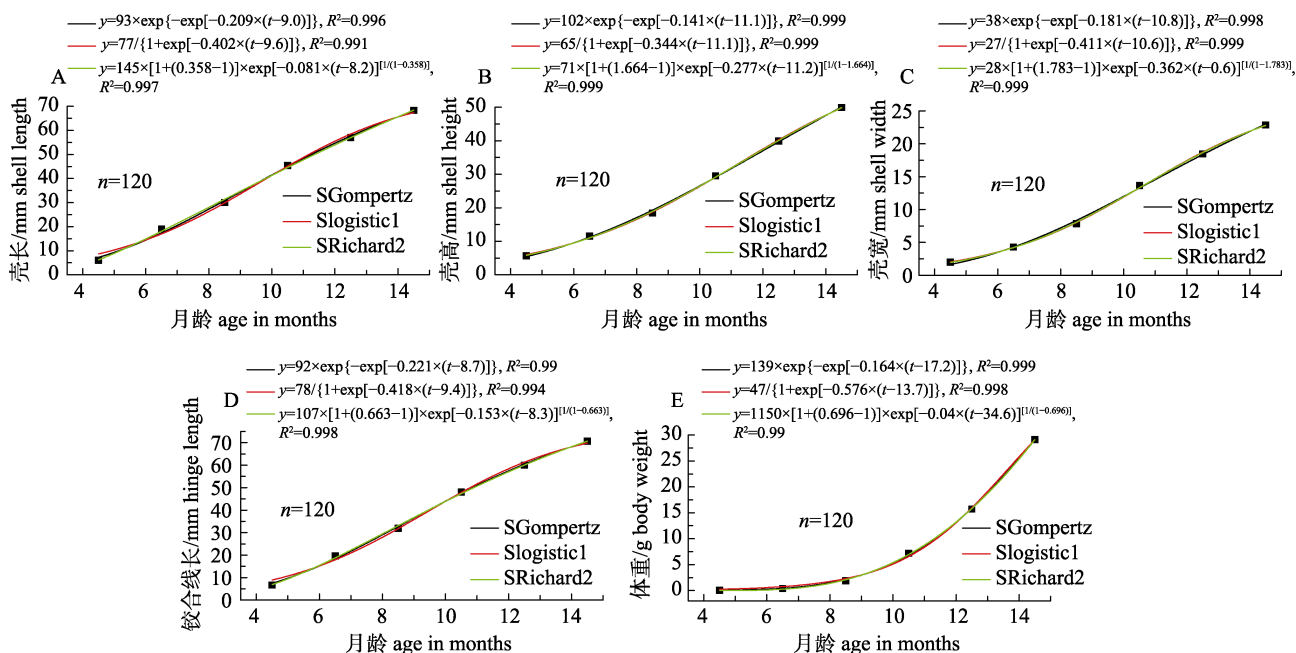


图 5 3 种生长模型对企鹅珍珠贝壳长(A)、壳高(B)、壳宽(C)、铰合线长(D)和体重(E)的拟合

Fig. 5 Fitting of three growth models on the shell length (A), shell height (B), shell width (C), hinge length (D) and body weight (E) of *Pteria penguin*.

SGompertz 和 SRichard2 对企鹅珍珠贝铰合线长的拟合效果较佳($R^2=0.998$, L_∞ 分别为 92 和 107, 图 5D)。SGompertz 和 SRichard2 对企鹅珍珠贝体重的拟合 R^2 都为 0.999, 但 SRichard2 的 L_∞ 为 1150, 且标准误差为 6944 (结果未显示), 因此 SGompertz

对企鹅珍珠贝体重的拟合效果最佳(图 5E)。由此可见, SGompertz 可作为对企鹅珍珠贝 5 个生长性状的最佳通用生长模型。

2.4.2 企鹅珍珠贝各生长性状的 SGompertz 模型拟合 为方便 4 个企鹅珍珠贝选育系间及其不

同生长性状间的比较,本研究用企鹅珍珠贝 5 个生长性状的通用模型 SGompertz 对 4 个企鹅珍珠贝选育系的 5 个生长性状进行拟合,拟合结果如图 6 所示。4 个企鹅贝选育系壳长拟合的 L_{∞} 为 79.392~86.447 mm,较为稳定,其中海南白唇选育系壳长的拟合生长极限最大,广西白唇选育系壳长的拟合生长极限最小,4 个壳长拟合方程的 $R^2>0.98$,拟合效果较好(图 6A)。广西白唇选育系壳高的 L_{∞} 为 157.096 mm,超过海南金唇选育系、海南白唇选育系和广西金唇选育系壳高的 L_{∞}

(100.094~109.963 mm) 50%以上,但 4 个壳高的拟合方程都较好($R^2>0.98$,图 6B)。4 个企鹅贝选育系壳宽的 L_{∞} 为 46.263~59.992 mm,其中海南白唇选育系的拟合生长极限最小,广西白唇选育系的拟合生长极限最大,4 个壳宽拟合方程的 $R^2\geq 0.99$,拟合效果较好(图 6C)。4 个企鹅贝选育系铰合线长的 L_{∞} 为 83.137~93.019 mm,拟合方程的 $R^2>0.98$,拟合效果较好(图 6D)。4 个企鹅贝选育系体重的 L_{∞} 为 115.702~128.225 g 和 181.022 g,拟合方程的 $R^2>0.98$,拟合效果较好(图 6E)。

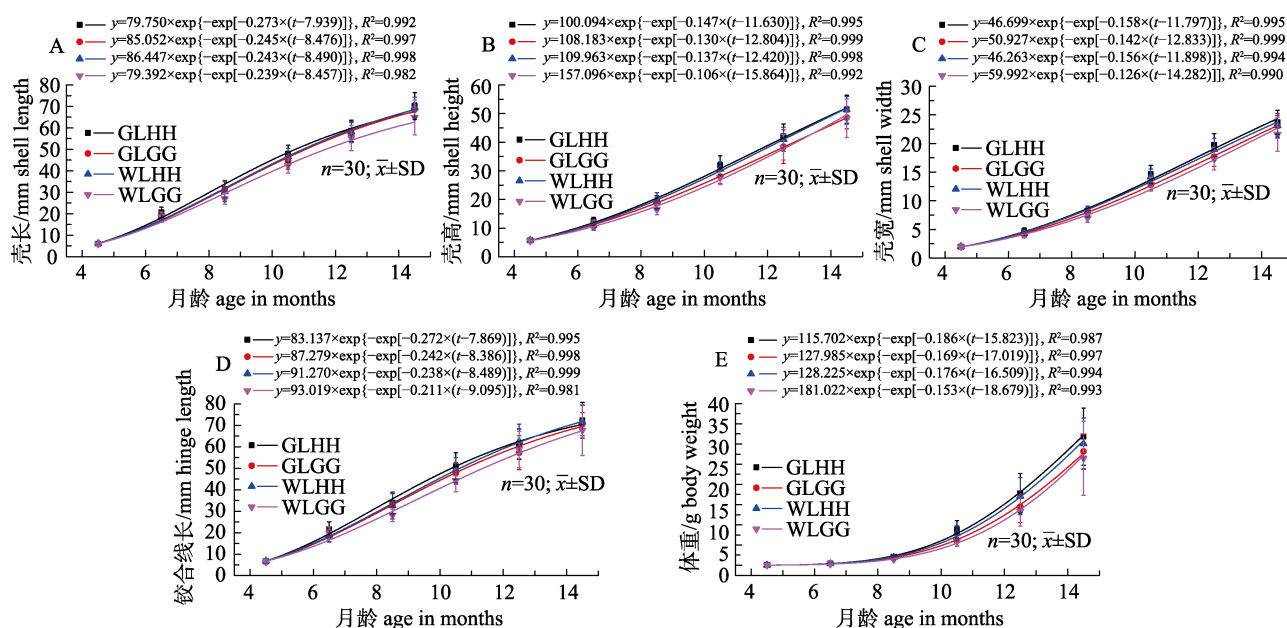


图 6 SGompertz 模型对 4 个企鹅珍珠贝选育系壳长(A)、壳高(B)、壳宽(C)、铰合线长(D)和体重(E)的拟合
GLHH 为海南金唇选育系, GLGG 为广西金唇选育系, WLHH 为海南白唇选育系, WLGG 为广西白唇选育系。

Fig. 6 Fitting of the SGompertz model on the shell length (A), shell height (B), shell width (C), hinge length (D) and body weight (E) of the four *Pteria penguin* breeding lines

GLHH means golden-lip breeding line of Hainan; GLGG means golden-lip breeding line of Guangxi; WLHH means white-lip breeding line of Hainan; WLGG means white-lip breeding line of Guangxi.

4 个企鹅珍珠贝选育系 5 个生长性状的生长拟合方程部分方差分析结果如表 1 所示。由图 6 和表 1 可知,所有拟合方程的 $R^2>0.98$,且方差分析结果显示,所有方程的回归都达到了极显著水平($P<0.001$),说明这 20 个模型是有意义的。在企鹅珍珠贝的整个生长过程中生长速率最大值出现的时间便是其生长拐点时间,此时的生长性状值即为拐点性状值。由表 1 可知,4 个壳色选育系企鹅珍珠贝壳长和铰合线长的生长拐点出现得最早,分别出现在 7.9~8.5 月龄和 7.9~9.1 月龄,拐

点性状值为 29.338~31.802 mm 和 30.584~34.220 mm,最大月增量为 5.174~6.126 mm/月和 7.220~8.319 mm/月。在 11.6~15.9 月龄和 11.8~14.3 月龄,企鹅珍珠贝壳高和壳宽的生长拐点分别出现,拐点性状值为 36.882~57.792 mm 和 17.019~20.070 mm,最大月增量为 6.980~8.009 mm/月和 2.655~2.781 mm/月。企鹅珍珠贝体重的生长拐点出现的最晚,在 15.8~18.7 月龄,拐点性状值为 42.564~47.171 g,最大月增量为 7.917~10.189 g/月。在 4 个企鹅珍珠贝选育系中,海南金

表 1 拟合模型的方差分析及企鹅珍珠贝生长拐点
Tab. 1 Analysis of variance of fitted model and the inflection point of *Pteria penguin*

生长性状 growth trait	选育系 breeding line	方差分析 ANOVA			TCP	CVCP	MMI
		均方 mean square	<i>F</i>	<i>P</i>			
壳长 shell length	GLHH	210.483	368.868	<0.001	7.939	29.338	8.009
	GLGG	288.967	941.178	<0.001	8.476	31.289	7.666
	WLHH	236.678	1139.055	<0.001	8.490	31.802	7.728
	WLGG	203.839	189.592	<0.001	8.457	29.207	6.980
壳高 shell height	GLHH	164.340	725.394	<0.001	11.630	36.822	5.413
	GLGG	173.252	12039.898	<0.001	12.804	39.798	5.174
	WLHH	169.969	2171.471	<0.001	12.420	40.453	5.542
	WLGG	146.463	547.566	<0.001	15.864	57.792	6.126
壳宽 shell width	GLHH	176.043	623.273	<0.001	11.797	17.179	2.714
	GLGG	246.734	2351.777	<0.001	12.833	18.735	2.660
	WLHH	157.378	522.136	<0.001	11.898	17.019	2.655
	WLGG	144.715	352.990	<0.001	14.282	22.070	2.781
铰合线长 hinge length	GLHH	110.654	546.367	<0.001	7.869	30.584	8.319
	GLGG	144.402	1951.754	<0.001	8.386	32.108	7.770
	WLHH	113.332	6082.002	<0.001	8.489	33.576	7.991
	WLGG	106.192	187.544	<0.001	9.095	34.220	7.220
体重 body weight	GLHH	26.397	141.319	<0.005	15.823	42.564	7.917
	GLGG	37.681	665.001	<0.001	17.019	47.083	7.957
	WLHH	27.837	328.697	<0.001	16.509	47.171	8.302
	WLGG	24.088	280.383	<0.001	18.679	66.594	10.189

注: GLHH 为海南金唇选育系, GLGG 为广西金唇选育系, WLHH 为海南白唇选育系, WLGG 为广西白唇选育系, TCP 为拐点时间, 单位: 月; CVCP 为拐点性状值, 单位为 mm 或 g; MMI 为最大月增量, 单位为 mm/月或 g/月。

Note: GLHH means golden-lip breeding line of Hainan; GLGG means golden-lip breeding line of Guangxi; WLHH means white-lip breeding line of Hainan; WLGG means white-lip breeding line of Guangxi; TCP means the time of the inflection point, unit: month. CVCP means the character value at the inflection point, unit: mm or g. MMI means the maximum monthly increment, unit: mm/month or g/month.

唇选育系 5 个生长性状的生长拐点都出现得最早, 壳长生长拐点出现最晚的是海南白唇选育系, 壳高、铰合线长和体重生长拐点出现最晚的是广西白唇选育系, 壳宽生长拐点出现最晚的是广西金唇选育系。

3 讨论

3.1 贝类壳色选育系的存活率差异

海南和广西两地的金唇和白唇选育系在 11.5 月龄以前的存活率无显著差异($P>0.05$), 在 12.5~15.5 月龄时海南金唇选育系的存活率显著高于广西白唇选育系($P<0.05$); 且海南选育系的存活率一般比广西选育系的存活率高, 金唇选育系的存活率一般比白唇选育系的存活率高。该研究结果表明企鹅珍珠贝的存活率可能与其贝龄、环境、

壳色和地理种群等因素有关。贝类幼虫的生长存活与家系、温度、食物相关^[45], 闫喜武等^[46]指出菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)的存活率与其壳色显著相关, 且菲律宾蛤仔幼虫期、240 日龄、360 日龄(海区养殖)时的存活率存在差异; 郑怀平等^[47]研究发现, 橙色、紫色和白色海湾扇贝(*Argopecten irradians*)的存活率在 110 日龄(7 月)和 140 日龄(8 月)时存在显著差异, 在 170 日龄(9 月)时无显著性差异。丛日浩等^[17]研究表明, 长牡蛎壳色与其存活率关联显著, 且长牡蛎浮游阶段 5 日龄和 10 日龄不同壳色家系间存活率差异不显著, 15 日龄和 20 日龄(6 月)紫壳色家系存活率显著高于其他家系; 稚贝期(40~160 日龄, 7~11 月)各家系存活率差异不显著; 420 日龄(8 月)紫壳色家系存活率显著高于其他家系。张跃环等^[48]和宋

盛亮等^[49]研究表明,不同地理群体贝类的存活率存在显著差异。这些研究结果说明贝类的存活率与其贝龄、环境变化、壳色及地理群体相关,与本研究结果相一致。程鹏等^[50]研究表明,不同壳色虾夷扇贝(*Mizuhopecten yessoensis*)家系间幼虫(5日龄、12日龄和25日龄时)的存活率差异不显著。范飞龙等^[51]研究发现,不同壳色杂色鲍(*Haliotis diversicolor*)120日龄内幼虫的存活率没有显著差异。郭文学等^[14]研究表明,四角蛤蜊不同壳色品系幼虫及稚贝的存活率无显著差异。这些研究结果与本研究结果相左,分析原因可能是贝类种间差异、存活率测定时间单一(都为稚贝以前)等所致。

3.2 贝类壳色选育系的生长性状差异

企鹅珍珠贝 4 个选育系在 4.5 月龄的生长性状无显著差异($P>0.05$); 6.5~14.5 月龄的部分生长性状存在显著差异($P<0.05$); 但不同月龄,这种差异各异,如海南金唇选育系的绞合线长在 8.5 月龄时显著大于广西白唇选育系($P<0.05$),而在 6.5 月龄时二者无显著差异($P>0.05$),表明企鹅珍珠贝各生长性状的差异性生长,且企鹅珍珠贝的生长与贝龄、环境、壳色及地理种群相关。肖国强等^[52]研究发现,山东野生群体文蛤的生长性能显著优于江苏野生群体,说明贝类生长与地理群体有关,与本研究结果一致。陈明强等^[19]研究发现,白壳色和金壳色合浦珠母贝的生长性能比黑壳色和红壳色更佳;闫喜武等^[46]研究发现,不同壳色菲律宾蛤仔品系的生长性能存在显著差异,且这种差异与贝龄及环境变化相关;说明贝类的生长与贝龄、环境、壳色相关,与本研究结果一致。由图 3 和图 4 可知,企鹅珍珠贝壳长和绞合线长的早期生长规律相近,壳宽和壳高的早期生长规律一致,且形态性状的生长拐点应在 10.5 月龄前后;体重的早期生长为指数型增长,生长拐点应在 14.5 月龄以后。

3.3 贝类生长模型的建立

建立生长模型有利于贝类生长性状的规律研究。研究表明,由于种间差异,不同贝类最适的生长模型可能不同,如广义加性模型(GAM)为彩虹唇珍珠贝壳长、体重、壳重和软体部重生长

的最佳生长模型(与经典模型 von Bertalanffy 和 Gompertz 相比较)^[34];而特殊 von Bertalanffy 生长模型是大珠母贝壳生长的最佳生长模型(与一般 von Bertalanffy、Gompertz、Richards 和 Logistics 相比较)^[36]。同一种贝,不同的养殖群体最适的生长模型可能不同,如墨西哥 4 个孵化场的长牡蛎壳长的最适生长模型分别为 von Bertalanffy、Schnute3、Schnute1 和 Schnute1^[28]。同一养殖群体,由于阶段性生长差异,不同生长阶段的最适生长模型也可能不相同,如背角无齿蚌 0~60 日龄时壳长的最适生长模型为 Logistic,而 60~750 日龄时的最适生长模型为 von Bertalanffy^[25]。同一生长阶段,由于局部性生长差异,不同生长性状的最适生长模型亦可能不相同,如海南省陵水黎族自治县黎安港合浦珠母贝养殖群体壳高和体重的最适生长模型分别为纳入季节性变化的 von Bertalanffy 和 Gompertz 生长模型^[32]。因此,本研究中 4 个企鹅珍珠贝选育系的 5 个生长性状最适生长模型可能各不相同。但为了方便比较,所有家系的所有性状都应使用同一个模型进行拟合,然后通过比较各个选育系各个生长性状的拟合参数值来确定其生长差异,如 Arkhipkin 等^[27]用 von Bertalanffy 增长模型比较了阿森岛(Ascension Island)周围 5 处潮间带火生岩中的岩生牡蛎(*Saccostrea cucullata*)壳高的生长规律差异。本研究通过比较 origin 9.0 中的 SGompertz、Slogistic1、SRichard2 3 个生长模型对企鹅珍珠贝 5 个生长性状的拟合精度,最终确定 SGompertz 为企鹅珍珠贝 5 个生长性状的通用模型(图 5)。郭华阳等^[43]比较了 von Bertalanffy、Gompertz 和 Logistic 3 种生长模型,确定 Gompertz 模型为企鹅珍珠贝各生长性状的最优生长模型,与本研究结果相一致。

根据图 6 可知,数据的均值点基本都在拟合曲线上,说明 SGompertz 生长模型对 4 个企鹅珍珠贝选育系的 5 个生长性状的拟合效果都较好($R^2>0.98$)。SGompertz 拟合参数值及具体方程如图 6 所示,海南金唇选育系 5 个生长性状的增长常数 k 一般最大,广西白唇选育系的一般最小,说明在 4.5~14.5 月龄期间,海南金唇选育系的生长比广西白唇选育系要快;但海南金唇选育系 5

个生长性状的生长极限 L_{∞} 一般最小, 而广西白唇选育系的一般最大(具有更大的生长潜力), 表明广西白唇选育系后期的生长速度会优于海南金唇选育系(这还有待于下一步论证)。从 4 个企鹅珍珠贝选育系 5 个生长性状的生长拐点相关信息来看(表 1), 每个选育系 5 个生长性状的生长拐点出现时间、拐点时间性状值及最大月增量都不相同, 且个别间的差异较大, 说明企鹅珍珠贝各个生长性状存在差异性生长, 其中形态性状的快速生长期要早于体重的快速生长期。这种不同性状的差异性生长在合浦珠母贝^[33]和长牡蛎^[53]等贝类中皆有报道。4 个企鹅贝选育系的各个生长性状的生长拐点出现时间、拐点性状值及最大月增量各异, 可能是因为遗传差异(人工壳色选育和地理种群差异)所导致的贝类生长差异^[34]。

4 结论

企鹅珍珠贝的生长和存活率与环境、贝龄、壳色及地理群体相关, SGompertz 生长模型为企鹅珍珠贝 4 个选育系生长性状(壳长、壳高、壳宽、铰合线长和体重)的最佳通用模型, 企鹅贝的壳长和铰合线长的生长规律类似, 生长拐点出现在 7.9~9.1 月龄; 其壳宽和壳高的生长规律相近, 生长拐点出现在 11.6~15.9 月龄; 体重的早期生长为指数型生长, 生长拐点出现在 15.8~18.7 月龄。该研究结果揭示了企鹅珍珠贝不同地理群体金唇和白唇选育系的早期生长规律, 可为企鹅珍珠贝的人工养殖、良种选育及珍珠母贝的培养提供理论支持和指导。

参考文献:

- [1] Meng Z M, Li Y N, Xing K W. Theory and technology of pearl culture [M]. Beijing: Science Press, 1996: 30-48. [蒙钊美, 李有宁, 邢孔武. 珍珠养殖理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 30-48.]
- [2] Peng M, Chen X L, Jiang W M, et al. The population genetic diversity of different geographical *Pteria penguin* revealed by fAFLP analysis[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(1): 102-108. [彭敏, 陈秀荔, 蒋伟明, 等. 企鹅珍珠贝不同地理群体遗传多样性的 fAFLP 分析[J]. 水生生物学报, 2012, 36(1): 102-108.]
- [3] Yu X Y, Wang M F, Ye F L. Development and artificial propagation of *Pteria* (*Magnavicula*) *penguin* Roding[J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2000, 18(3): 266-269. [余祥勇, 王梅芳, 叶富良. 企鹅珍珠贝个体发生及人工育苗的研究[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2000, 18(3): 266-269.]
- [4] Liang F L, Xie S H, Lin W C. Progress on pearl production of pearl oyster *Pteria penguin*[J]. Journal of Aquaculture, 2014, 35(4): 37-41. [梁飞龙, 谢绍河, 林伟财. 企鹅珍珠贝珍珠培育技术的研究现状[J]. 水产养殖, 2014, 35(4): 37-41.]
- [5] Gu Z F, Huang F S, Wang H, et al. Contribution of donor and host oysters to the cultured pearl colour in *Pinctada martensii*[J]. Aquaculture Research, 2014, 45(7): 1126-1132.
- [6] Ky C L, Lo C, Planes S. Mono- and polychromatic inner shell phenotype diversity in *Pinctada margaritifera* donor pearl oysters and its relation with cultured pearl colour[J]. Aquaculture, 2017, 468: 199-205.
- [7] Wada K T, Komaru A. Color and weight of pearls produced by grafting the mantle tissue from a selected population for white shell color of the Japanese pearl oyster *Pinctada fucata martensii* (Dunker)[J]. Aquaculture, 1996, 142(1-2): 25-32.
- [8] Wang Z Q, Han X K, Bai Z Y, et al. Estimates of genetic parameters for inner shell color and growth traits during one year old stage in the purple strain of *Hyriopsis cumingii* using microsatellite based parentage assignment[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(5): 644-650. [王照旗, 韩学凯, 白志毅, 等. 三角帆蚌紫色选育系 1 龄阶段内壳色及生长性状的遗传参数估计[J]. 水产学报, 2014, 38(5): 644-650.]
- [9] Zhu W B. Study of the effect of two shell nacre colors on the color of pearls produced by *Hyriopsis cumingii*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011. [朱文彬. 三角帆蚌两种贝壳珍珠质颜色对珍珠颜色影响的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.]
- [10] Evans B S, Kanuer J, Taylor J J U, et al. Progress towards a selective breeding program for silver- or gold-lip pearl oysters *Pinctada maxima* in Indonesia[J]. Aquaculture, 2007, 272: S254.
- [11] Ky C L, Le Pabic L, Koua M S, et al. Is pearl colour produced from, *Pinctada margaritifera*, predictable through shell phenotypes and rearing environments selections?[J]. Aquaculture Research, 2017, 48(3): 1041-1057.
- [12] Li Z Q, Shi Y H, Jiang Y B, et al. Relationship between color and size of free pearls produced by the pearl oyster *Pteria penguin*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(1): 91-95. [李自强, 石耀华, 江勇波, 等. 企鹅珍珠贝游离珍珠颜色与珍珠规格的相关性[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(1): 91-95.]
- [13] Ky C L, Blay C, Lo C. Half-sib family effects on cultured pearl quality traits in the black-lipped pearl oyster *Pinctada margaritifera*: Testing for indirect benefits of polyandry and

- polygyny[J]. *Aquaculture International*, 2016, 24(1): 171-182.
- [14] Guo W X, Yan X W, Ma G F, et al. A preliminary study on pedigree selection of *Macraa veneriformis* with two inner-shell colors[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(2): 262-267. [郭文学, 闫喜武, 马贵范, 等. 两种四角蛤蜊(*Macraa veneriformis*)壳内色品系选育初探[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(2): 262-267.]
- [15] Zhu D L, Dong Y H, Lin Z H, et al. Genetic analysis among four strains of different shell colors and decorative patterns of *Meretrix meretrix* using microsatellite markers[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(2): 202-209. [朱东丽, 董迎辉, 林志华, 等. 利用微卫星标记对文蛤 4 个壳色花纹品系的遗传分析[J]. 水产学报, 2012, 36(2): 202-209.]
- [16] Cui B Y, Dong Y H, Zhao J X, et al. Cloning and expression analysis of *SRBI* gene in different shell-color strains of *Meretrix meretrix*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, 42(3): 488-493. [崔宝月, 董迎辉, 赵家熙, 等. 文蛤 *SRBI* 基因克隆及其在不同壳色群体中的差异表达[J]. 水生生物学报, 2018, 42(3): 488-493.]
- [17] Cong R H, Li Q, Ge J L, et al. Comparison of phenotypic traits of four shell color families of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(3): 494-502. [丛日浩, 李琪, 葛建龙, 等. 长牡蛎 4 种壳色家系子代的表型性状比较[J]. 中国水产科学, 2014, 21(3): 494-502.]
- [18] Xing D, Li Q, Zhang J X. Estimates of genetic parameters for growth and shell color traits in the white-shell strain of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(1): 26-33. [邢德, 李琪, 张景晓. 壳白长牡蛎品系生长和壳色性状遗传参数估计[J]. 中国水产科学, 2018, 25(1): 26-33.]
- [19] Chen M Q, Liu B S, Yan J X, et al. Comparison analysis of major traits among four shell color selective lines of pearl oyster (*Pinctada fucata*)[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(5): 118-122. [陈明强, 刘宝锁, 严俊贤, 等. 合浦珠母贝 4 种壳色选育系主要性状的比较分析[J]. 南方水产科学, 2016, 12(5): 118-122.]
- [20] Zhang G F, Zhang W F, Fang A P. Preliminary research on shell nacre color inheritance of *Hyriopsis cumingii*[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2016, 51(4): 675-681. [张根芳, 张文府, 方爱萍. 三角帆蚌贝壳珍珠层颜色遗传规律初步研究[J]. 动物学杂志, 2016, 51(4): 675-681.]
- [21] Sun C H, Bai Z Y, Li Q Q, et al. The optimization of early compound selection for growth traits and shell color in *Hyriopsis cumingii*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(2): 91-97. [孙朝虎, 白志毅, 李清清, 等. 三角帆蚌生长和壳色性状早期复合选择的优化研究[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(2): 91-97.]
- [22] Zhang Y H, Yan X W, Zhang P, et al. Research advances and prospects on shell color polymorphism of mollusks[J]. *Fisheries Science*, 2008, 27(12): 680-683. [张跃环, 闫喜武, 张澎, 等. 贝类壳色多态的研究概况及展望[J]. 水产科学, 2008, 27(12): 680-683.]
- [23] Liu Z G, Wang H, Fu S W. Morphological growth of cultured *Argopecten irradians concentricus* in Beibu bay in Zhanjiang[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2007, 31(5): 675-681. [刘志刚, 王辉, 符世伟. 湛江北部湾养殖墨西哥湾扇贝的形态增长规律[J]. 水产学报, 2007, 31(5): 675-681.]
- [24] Wang H, Liu Z G, Fu S W. Studies on growth of weight traits of cultured *Argopecten irradians concentricus* in Zhanjiang sea area[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(5): 53-59. [王辉, 刘志刚, 符世伟. 湛江北部湾海域养殖墨西哥湾扇贝重量性状增长规律研究[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(5): 53-59.]
- [25] Chen X B, Liu H B, Su Y P, et al. Morphological development and growth of the freshwater mussel *Anodonta woodiana* from early juvenile to adult[J]. *Invertebrate Reproduction & Development*, 2015, 59(3): 131-140.
- [26] Wang C Y, Liu J Y. Growth pattern of selective breed generation of variously colored abalone *Haliotis diversicolor supertexta*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, 34(1): 21-26. [王崇懿, 刘建勇. 九孔鲍选育群体生长规律的研究[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(1): 21-26.]
- [27] Arkhipkin A, Boucher E, Gras M, et al. Variability in age and growth of common rock oyster *Saccostrea cucullata* (Bivalvia) in Ascension Island (central-east Atlantic)[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2017, 97(4): 735-742.
- [28] Reynaga-Franco F J, Aragón-Noriega E A, Grijalva-Chon J M, et al. Multi-model inference as criterion to determine differences in growth patterns of distinct *Crassostrea gigas* stocks[J]. *Aquaculture International*, 2019, 27(5): 1435-1450.
- [29] Góngora-Gómez A M, Aragón-Noriega E A, Domínguez-Orozco A L, et al. Modeling the individual growth of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* cultivated in the Gulf of California using the von Bertalanffy model[J]. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 2017, 52(1): 181-185.
- [30] Mitchell I M, Crawford C M, Rushton M J. Flat oyster (*Ostrea angasi*) growth and survival rates at Georges Bay, Tasmania (Australia)[J]. *Aquaculture*, 2000, 191(4): 309-321.
- [31] Hastie L C, Young M R, Boon P J. Growth characteristics of freshwater pearl mussels, *Margaritifera margaritifera* (L.)[J]. *Freshwater Biology*, 2000, 43(2): 243-256.
- [32] Gu Z F, Wang Q Y, Fang J G, et al. Growth of cultured pearl oyster (*Pinctada martensii*) in Li'an Lagoon, Hainan Island, China[J]. *Journal of Shellfish Research*, 2009, 28(3): 465-470.
- [33] Wu S R, Liu Z G, Wang H. Study on growth model of the selected lines of red shell colored *Pinctada martensii* Dunker

- in Beibu Bay in Zhanjiang[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2011, 31(3): 16-24. [郭思荣, 刘志刚, 王辉. 湛江北部湾马氏珠母贝红壳色选育系生长模型研究[J]. 广东海洋大学学报, 2011, 31(3): 16-24.]
- [34] Fuentes-Santos I, Labarta U, Arranz K, et al. From classical to nonparametric growth models: Towards comprehensive modelling of mussel growth patterns[J]. Marine Environmental Research, 2017, 127: 41-48.
- [35] Serna-Gallo I. Growth and reproduction patterns of the winged pearl oyster, *Pteria sterna*, cultivated in tropical environments of Mexico: Implications for pearl farming[J]. Ciencias Marinas, 2014, 40(2): 75-88.
- [36] Lee A M, Williams A J, Southgate P C. Modelling and comparison of growth of the silver-lip pearl oyster *Pinctada maxima* (Jameson) (Mollusca: Pteriidae) cultured in West Papua, Indonesia[J]. Marine and Freshwater Research, 2008, 59(1): 22-31.
- [37] Southgate P C, Beer A C, Ngaluafé P. Hatchery culture of the winged pearl oyster, *Pteria penguin*, without living micro-algae[J]. Aquaculture, 2016, 451: 121-124.
- [38] Wassnig M, Southgate P C. The effects of stocking density and ration on survival and growth of winged pearl oyster (*Pteria penguin*) larvae fed commercially available micro-algae concentrates[J]. Aquaculture Reports, 2016, 4: 17-21.
- [39] Gordon S E, Malimali S, Wingfield M, et al. Effects of nucleus position, profile and arrangement on the quality of mabé pearls produced by the winged pearl oyster, *Pteria penguin*[J]. Aquaculture, 2019, 498: 109-115.
- [40] Gordon S E, Ngaluafé P, Wingfield M, et al. Morphometric relationships and shell form of cultured winged pearl oysters (*Pteria penguin*) in Tonga[J]. Journal of Shellfish Research, 2017, 36(3): 677-682.
- [41] Vasquez H E, Zheng X, Zhan X, et al. The effect of light on the locomotion and byssal reattachment of winged pearl oyster *Pteria Penguin* (Röding, 1798) juveniles[J]. Journal of Shellfish Research, 2018, 37(5): 1061-1066.
- [42] Parvizi F, Monsefi M, Noori A, et al. Mantle histology and histochemistry of three pearl oysters: *Pinctada persica*, *Pinctada radiata* and *Pteria penguin*[J]. Molluscan Research, 2018, 38(1): 11-20.
- [43] Guo H Y, Li Y N, Zhang N, et al. Study on development rules and growth curve fitting of early cultured winged pearl oyster (*Pteria penguin*)[J]. South China Fisheries Science, 2016, 12(5): 71-80. [郭华阳, 李有宁, 张楠, 等. 企鵝珍珠贝早期养殖生长性状的增长规律及生长曲线拟合研究[J]. 南方水产科学, 2016, 12(5): 71-80.]
- [44] Tjørve K M C, Tjørve E. The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: An addition to the Unified-Richards family[J]. PLoS ONE, 2017, 12(6): e0178691.
- [45] Yund P O, McCartney M A. Family effects on the growth and survival of congeneric blue mussel larvae (*Mytilus edulis* and *M. trossulus*)[J]. Marine Biology, 2016, 163: 76.
- [46] Yan X W, Zhang Y H, Huo Z M, et al. Studies on phenotypic traits of different shell color strains F_2 of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(6): 881-889. [闫喜武, 张跃环, 霍忠明, 等. 不同壳色菲律宾蛤仔品系 F_2 的表型性状[J]. 水产学报, 2010, 34(6): 881-889.]
- [47] Zheng H P, Zhang G F, Liu X, et al. Establishment of different shell color lines of bay scallop *Argopecten irradians* irradians Lamarck (1819) and their development[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, 34(6): 632-639. [郑怀平, 张国范, 刘晓, 等. 不同贝壳颜色海湾扇贝 (*Argopecten irradians*) 家系的建立及生长发育研究[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(6): 632-639.]
- [48] Zhang Y H, Yan X W, Huo Z M, et al. Growth and development in different geographical populations of Manila clam *Ruditapes philippinarum*[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2009, 24(1): 34-39. [张跃环, 闫喜武, 霍忠明, 等. 不同地理群体菲律宾蛤仔生长发育的比较[J]. 大连水产学院学报, 2009, 24(1): 34-39.]
- [49] Song S L, Li Q, Kong L F. Larval growth and survival of hybrid between different geographic populations of Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(12): 30-35. [宋盛亮, 李琪, 孔令锋. 不同地理群体长牡蛎杂交子代的早期生长发育[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(12): 30-35.]
- [50] Cheng P, Yang A G, Zhou L Q, et al. Comparison of growth development and genetic diversity of F_1 larvae among different shell color lines of Japanese scallop, *Patinopecten yessoensis*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(5): 960-968. [程鹏, 杨爱国, 周丽青, 等. 不同壳色虾夷扇贝家系 F_1 幼虫生长及遗传结构的比较分析[J]. 中国水产科学, 2010, 17(5): 960-968.]
- [51] Fan F L, You W W, Zhan X, et al. Comparison of growth traits at early stages and genetic diversity of F_1 among different shell color lines of the small abalone (*Haliotis diversicolor*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(9): 1349-1357. [范飞龙, 游伟伟, 战欣, 等. 不同壳色杂色鲍 F_1 家系的早期生长及遗传结构比较[J]. 水产学报, 2012, 36(9): 1349-1357.]
- [52] Xiao G Q, Lin Z H, Dong Y H, et al. The growth of F_1 from matings and crosses of different geographical populations of *Meretrix meretrix*[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(2): 255-263. [肖国强, 林志华, 董迎辉, 等. 文蛤不同地理群体自繁和互交 F_1 代的早期生长性状[J]. 水产学报, 2010, 34(2): 255-263.]

[53] Mondol M R, Kim C W, Kang C K, et al. Growth and re-production of early grow-out hardened juvenile Pacific oys-

ters, *Crassostrea gigas* in Gamakman Bay, off the south coast of Korea[J]. Aquaculture, 2016, 463: 224-233.

Differences in growth and survival rates among four F3 breeding lines of *Pteria penguin* and their growth patterns

WEI Haijun^{1,2,3,4}, CHEN Mingqiang^{1,2,3}, DENG Zhenghua^{1,2,3}, LI Youning^{1,2,3}, WANG Yu^{1,2,3}, MA Zhenhua^{1,2,3}, YU Gang¹

1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Development and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. Tropical Aquaculture Research and Development Centre, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Sanya 572018, China;
3. Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 572018, China;
4. Ocean College, Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract: *Pteria penguin* (Röding, 1798) is an important pearl oyster species used to breed seawater pearls in China because it has advantageous characteristics, such as large size, high pearl secretion and growth rates, strong environmental adaptability, and a high survival rate. Previous research on *P. penguin* mainly focused on artificial seedlings, oyster culturing, pearl cultivation, morphology, behavioral science, and histology. There have been no reports on the golden-lip and white-lip *P. penguin* breeding lines, and there have been few reports on the growth and development of *P. penguin*. Our group found that there was a wide diversity of the colors at the edge of the nacre shell of *P. penguin* during the breeding phase and that four breeding lines (two geographic populations and two kinds of lip color) had developed. This study compared the differences in growth and survival rates among the Hainan golden-lip breeding line (GLHH), the Hainan white-lip breeding line (WLHH), the Guangxi golden-lip breeding line (GLGG), and the Guangxi white-lip breeding line (WLGG) of pearl oyster *Pteria penguin*, and investigated the growth patterns of the four breeding lines. The survival rate, the shell length, shell height, shell width, hinge length, and body weight of the four F₃ *P. penguin* breeding lines, which had been cultured at Xincun Port, Lingshui Li Autonomous County, Hainan Province, were continuously monitored from January 2018 to the end of December 2018, and one-way ANOVA and growth model fitting were used to analyze the data. The one-way ANOVA results showed significant differences in the growth and survival rates of the four shell color breeding lines ($P < 0.05$). The growth and survival rate of the Hainan golden lip breeding line was the best, and the growth of the Guangxi white lip breeding line was the worst. The results also indicated that the growth and survival of *P. penguin* may related to the environment, age, shell color, and geographical population. The SGompertz growth model is a universal growth model for the five *P. penguin* growth traits. The study showed that there were differences in the growth patterns of the four *P. penguin* breeding lines, and there were differences among the growth patterns for the five *P. penguin* growth traits. The growth inflection points of the shell length and hinge length appeared first, at 7.9 (GLHH)–8.5 (WLHH) and 7.9 (GLHH)–9.1 (WLGG) months old months old, followed by shell height and shell width. The growth inflection point appeared at 11.6 (GLHH)–15.9 (WLGG) months old and 11.8 (GLHH)–14.3 (WLGG) months old, and the body weight growth inflection point appeared at 15.8 (GLHH)–18.7 (WLGG) months old. The results of this study indicated that the Hainan golden-lip breeding line had a high survival rate and excellent growth performance during the early growth stage, and that the Guangxi white-lip breeding line may have the greatest growth potential (the growth limit of growth traits L_{∞} was the largest). The results also provide a reference for the breeding of *P. penguin* and the production of high-quality pearls.

Key words: *Pteria penguin*; golden-lip breeding line; white-lip breeding line; growth traits; survival rate; growth model
Corresponding author: LI Youning. E-mail: liyouningc@tom.com; WANG Yu. E-mail: Winterrose@163.com