

### 3个鲤群体杂交后代生长性状的灰色关联及 复合杂交后代的体重预测分析

苏胜彦<sup>1,2</sup>, 董在杰<sup>1,2,3\*</sup>, 曲疆奇<sup>1</sup>, 梁政远<sup>1</sup>, 张建桥<sup>1</sup>,  
刘伟<sup>1</sup>, 马良骁<sup>1</sup>, 袁新华<sup>1,2</sup>

(1. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081;

2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心,

农业部淡水鱼类遗传育种和养殖生物学重点开放实验室, 江苏 无锡 214081;

3. 南京农业大学动物科技学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 为了更好地了解和利用杂种优势, 并在此基础上期望从可能产生的多个复合杂交组合中寻找可能的优良组合。实验通过建立回归模型、方差组分割、灰色关联度、比较不同方法的预测效果对建鲤、黄河鲤、黑龙江野鲤3个鲤群体双列杂交 $F_1$ 代杂种优势的利用进行了分析。结果表明, (1) 未考虑PIT标记和考虑PIT标记时所测性状对体重影响作用不同。结合灰色关联度分析表明, 2个时期的体长(体长和标记体长)对体重均有影响; (2) 不同组合、组合内家系间以及初始体重和雌性的交互固定效应显著; (3) 3种不同预测方法的分析表明, 组合Hyj, Hjj和JJh可在复合育种时优先考虑。实验结果表明, 杂交 $F_1$ 代体重与初始体重和性别(尤其是雌性)的交互、标记体长对体重的影响要在实际育种中引起足够的重视; 复合杂交可提高杂种优势的利用率。

**关键词:** 鲤; 方差组分; 灰色关联度分析; 杂交预测

**中图分类号:** Q 945; S 917

**文献标识码:** A

杂交育种是目前成效比较显著的鲤育种方法之一<sup>[1-2]</sup>, 建鲤、丰鲤、荷元鲤等就是杂种优势利用的成功典范<sup>[3]</sup>。但是, 由于杂种优势遗传基础的复杂性以及研究方法与手段的局限性, 其遗传机理及有效的预测方法还没有获得突破性的进展<sup>[4]</sup>。育种实践中仍采用传统的配合力测定方法来选择杂交组合<sup>[5-7]</sup>。从数量性状的方差组分割、灰色关联度的角度来了解和利用杂种优势, 成为杂种下一代选育的一个有效的辅助途径。在此过程中, 方差组分估计常用于计算遗传力、遗传相关、估计固定效应等<sup>[8]</sup>, 灰色关联度则在影响目标性状的主次因素分析中起着重要的作用<sup>[9]</sup>。

建鲤是经国家审定、人工育成的水产养殖良

种<sup>[3]</sup>, 经过十几年的推广, 在我国鲤养殖中占有举足轻重的地位。为使建鲤能够更快地生长以及适应不同环境条件下的有效生长, 无锡淡水渔业研究中心对建鲤进行杂交选育的同时进行了家系选育, 以期能够培育出在各种环境和条件下均能表现出生长优势的鲤品种, 更好地服务于鲤养殖业。因此, 对拟改良的生长性状进行遗传效应分析显得尤为重要。我们进行了建鲤、黄河鲤和黑龙江野鲤的 $3 \times 3$ 完全双列杂交, 获得了6个杂交组合和3个自交组合。选出具有杂种优势的组合并进行固定是杂交育种的必要步骤, 其可通过杂交一代的自交产生 $F_2$ 代, 然后进行继续选育; 也可以通过复合杂交育种, 获得优良的杂交种。双列杂交试验产生的9个组合再进行三元杂交和回

收稿日期: 2010-09-13 修回日期: 2010-11-12

资助项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(nycytx-49); 国家“十一五”科技支撑计划项目专题(2006BAD01A1208); 中央公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2009JBF01); 江苏省自然科学基金(BK2010164)

通讯作者: 董在杰, Tel: 0510-85558831, E-mail: dongzj@ffrc.cn

交,产生的组合较多,要确定哪个组合能有较好的性状表现,则需要花费较多的人力、物力和财力,因而对三元杂交和回交组合进行目标性状的预测显得尤为重要。

SKARACIS 等<sup>[10]</sup>依据非亲本单交数据,使用 5 种模型进行了糖用甜菜三元顶交预测,并进行对比分析。MELCHINGER 等<sup>[11]</sup>通过一般配合力 (general combining ability, GCA), 特殊配合力 (special combining ability, SCA), 依据单交资料进行了三元杂交预测。许自成等<sup>[12]</sup>提出了三元杂交组合 2n 种子模型杂种优势的预测方法。本文则应用 MELCHINGER 等<sup>[11]</sup>提出的 GCA, SCA 预测模型、贝叶斯网络、中亲杂种优势的方法进行预测,以期从可能产生的多个三元杂交和回交组合中寻找可能的优良组合,为选育优良鲤杂交组合提供选择依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

建鲤、黄河鲤和黑龙江野鲤都取自中国水产科学研究院淡水渔业研究中心宜兴试验基地,其中黄河鲤引自河南郑州黄河鲤原种场,黑龙江野鲤引自中国水产科学研究院黑龙江水产研究所。

### 1.2 试验设计

采用 3 × 3 完全双列杂交,共产生 6 个杂交组合(每个组合含有 5 个家系),3 个自交组合(每个组合含有 1 个家系),共有 33 个家系,每个家系用 PIT 标记 100 尾,同时测量体重、体长、体高和体厚 4 个指标。用 PIT 标记后,所有鱼放入同一池塘进行养殖,5 个月后再进行测量。

### 1.3 数据分析

试验数据在 Microsoft Excel 表中初步整理后,使用 SAS 8.0 分析。方差组分分析用到的模型为

$$y_{ijk} = \mu + c_i + f_j + d_k + e \quad (1)$$

式中, $y_{ijk}$ 为第  $i$  个组合  $j$  个家系  $k$  个雌鱼的体重, $c_i$ 为第  $i$  个组合, $f_j$ 为第  $j$  个家系, $d_k$ 为第  $k$  个雌鱼, $\mu$ 为群体均值;雌性、雌性 × 家系、雌性 × 组合为随机效应。灰色关联分析依据邓聚龙<sup>[13]</sup>提出的灰色关联理论和梁晓伟等<sup>[14]</sup>使用的方法进行,使用 Matlab 7.0 软件运行获取,多元逐步回归使用 SAS 8.0 进行。

三元杂交和回交组合预测方法如下:GCA,

SCA 预测法(方法一)采用 MELCHINGER 等<sup>[11]</sup>介绍的模型。BP 神经网络预测中,输入神经元 9 个,输出神经元 9 个,隐层神经元 30 个。在训练前,所有的连接权都是随机的,学习速率为 0.05。为了避免过度训练,第一训练阶段,设置最小平方误差为 (MSE) < 10<sup>-6</sup> 或培训步数为 > 10<sup>3</sup>,第二阶段设置最小平方误差为 (MSE) < 10<sup>-10</sup> 或培训步数为 > 10<sup>6</sup> (方法二)。中亲杂种优势预测采用 HALLAUER 等<sup>[15]</sup>提出的中亲和超亲优势计算公式: $r_{mid-parent} = \frac{F_1 - MP}{MP} \times 100$ ,  $a = \frac{F_1 - DP}{DP} \times 100$ ,  $b = \frac{F_1 - SP}{SP} \times 100$ , 其中  $F_1$  为杂交子一代特定组合的体重平均值,MP 为组合亲本体重的均值,DP 为产生组合的母本体重,SP 为产生组合的父本体重。分析公式可得到等式(2):

$$r = \frac{2(1+a)(1+b)}{1+a+1+b} - 1 \quad (2)$$

假设  $F_1$  代组合中的超亲优势可传递,得到三元杂交( $F_1$ 代杂种作为父本),回交( $F_1$ 代杂种作为父本)的估测等式(3)和(4):

$$\hat{a}_{B1} = r_{F_1} \quad (3)$$

$$\hat{b}_{B1} = \frac{1}{2}(a_{F_1} + b_{F_1}) \quad (4)$$

式中, $a_{F_1}$ 表示参与杂交的  $F_1$  代纯繁组合的超母本杂种优势值, $b_{F_1}$ 表示参与杂交的  $F_1$  代纯繁组合的超父本杂种优势值。对于杂种  $F_1$  代做母本的超亲优势估计值方法类似。

依据等式(3),等式(4)估计的值,通过等式(2)可估计出三元杂交和回交的中亲杂种优势,从而依据 HALLAUER 等<sup>[15]</sup>提出的方法,根据参与三元杂交和回交组合的父母本的表型值,可预测出三元杂交和回交的表型值(方法三)。

## 2 结果

### 2.1 考虑 PIT 标记和未考虑 PIT 标记时生长性状的简单统计

不同时期鲤 3 × 3 完全双列杂交  $F_1$  代 4 个生长性状的简单统计见表 1。2009 年 7 月 4 性状的数据为进行 PIT 标记时测量的指标,相应的 2009 年 12 月获取的为另一生长阶段获取的数据。

表 1 鲤 3 × 3 完全双列杂交 F<sub>1</sub> 不同时期生长性状的简单统计  
 Tab. 1 Simple statistics of 4 traits related to growth performance of 3 × 3 full diallel cross of common carp

	组合 combination	采集时间 time	体重 body weight	体长 length	体厚 thickness	体高 height
纯种繁育 pure breed	Hh	2009-07	13.25 ± 3.42	73.73 ± 8.85	12.42 ± 2.10	25.52 ± 3.21
	Hh	2009-12	237.76 ± 89.6	200.66 ± 30.02	32.74 ± 4.80	60.88 ± 7.80
	Jj	2009-07	18.16 ± 6.49	85.19 ± 9.43	15.27 ± 2.04	32.03 ± 39.93
	Jj	2009-12	302.2 ± 97.05	220.77 ± 21.3	37.04 ± 6.73	65.70 ± 7.22
	Yy	2009-07	11.20 ± 4.80	71.36 ± 7.18	12.59 ± 1.37	23.12 ± 2.46
	Yy	2009-12	236.78 ± 62.86	199.4 ± 29.98	32.65 ± 3.01	60.05 ± 4.97
杂交 cross breed	Hj	2009-07	13.6 ± 4.65	77.2 ± 9.79	13.46 ± 1.67	25.25 ± 3.18
	Hj	2009-12	310.12 ± 78.44	222.95 ± 22.69	36.7 ± 4.16	66.80 ± 5.82
	Hy	2009-07	15.44 ± 10.84	82.00 ± 57.09	13.14 ± 2.94	25.57 ± 5.39
	Hy	2009-12	262.74 ± 102.2	217.34 ± 117.3	33.8 ± 6.08	62.02 ± 8.06
	Jh	2009-07	16.29 ± 10.08	80.63 ± 16.80	12.82 ± 3.60	25.74 ± 5.92
	Jh	2009-12	312.01 ± 79.00	225.69 ± 25.91	36.57 ± 4.19	66.90 ± 6.05
	Jy	2009-07	12.14 ± 6.02	73.50 ± 19.15	12.27 ± 3.01	24.26 ± 4.12
	Jy	2009-12	289.8 ± 103.64	212.42 ± 26.75	35.51 ± 4.99	65.44 ± 7.59
	Yh	2009-07	10.03 ± 3.52	71.45 ± 25.05	11.33 ± 1.54	22.11 ± 3.75
	Yh	2009-12	271.08 ± 75.27	213.15 ± 20.19	34.39 ± 3.52	63.21 ± 6.11
	Yj	2009-07	14.42 ± 4.77	80.46 ± 47.44	13.06 ± 2.39	25.83 ± 4.14
	Yj	2009-12	297.36 ± 70.13	215.45 ± 19.81	36.35 ± 4.12	66.65 ± 5.88

注: J: 建鲤, H: 黄河鲤, Y: 黑龙江野鲤; 大写字母代表母本, 小写字母代表父本。下同。

Notes: J: Jian carp, H: Huanghe carp, Y: Heilongjiang carp; the capital letter indicates the female parent, and the small letter indicates the male parent. The same convention is followed below.

## 2.2 回归方程的建立

未考虑 PIT 标记时所测性状对体重的影响  
 体重作为因变量, 体长、体高和体厚作为自变量  
 建立回归方程。

$$\hat{y} = -442.26 + 0.11x_1 + 1.23x_2 + 10.20x_3$$

式中,  $\hat{y}$  为体重的估计值,  $x_1$  为体长,  $x_2$  为体厚,  $x_3$  为体高。模型及各参数的  $P$  值以及通径系数见表 2。从表 2 中, 可以看出, 决定系数为 0.79, 回归方程达到了显著水平。从通径系数上看, 体高对体重的通径系数最大, 体长对体重的通径系数较低。

表 2 以体重为依变量回归模型的参数和  $P$  值  
 Tab. 2 Parameter and  $P$  value of the regression model on the basis of body weight dependent variable

模型 model	$F$ 值 $F$ value		$R^2$	$P$ 值 $P$ value	
	回归系数 regression coefficient	标准误 standard error	$T$ 值 $T$ value	通径系数 pathway coefficient	$P$ 值 $P$ value
截距 intercept	-442.258 49	8.743 02	-50.58		<0.000 1
体长 length	0.110 53	0.020 23	5.46	0.064 765	<0.000 1
体厚 thickness	1.229 63	0.333 34	3.69	0.113 665	0.000 2
体高 height	10.204 26	0.221 72	46.02	14.874 09	<0.000 1

考虑 PIT 标记时所测性状对体重的影响——多元逐步回归与灰色关联度比较  
 对体重进行了灰色关联度分析, 获得体重与体长、体厚、体高、标记体重、标记体厚、标记体高的关联系数和关联度。从表 3 可以看出, 9 个组合中, 体重与体长的关联度最大。以体重为依变量, 其余 7 指标为自

变量, 本试验作逐步多元回归分析, 并将偏回归系数标准化(表 3)。从表 3 中可以看出, 标记体高、标记体厚、标记体重没有入选, 其余 4 个指标入选。这与灰色关联度排名前四位的指标是一致的。标准化的偏回归系数按数值大小排名为体厚、体高、体长和标记体长。

表3 体重与其余各性状的关联度及排序  
Tab.3 Grey correlated degrees between body weight and other traits and their rank

	体长 length	体厚 thickness	体高 height	标记体重 weight at tagging	标记体长 length at tagging	标记体厚 thickness at tagging	标记体高 height at tagging
关联度 grey correlated degree	0.884 2	0.471 9	0.510 5	0.447 2	0.530 2	0.446 2	0.460 5
排序 rank	1	4	3	6	2	7	5
标准化的偏回归系数 standardized coefficient of regression	0.295 0	0.438 2	0.356 9		-0.090		

### 2.3 方差组分割析

通过建立模型(1)来对体重进行方差组分割析,获得方差组分的  $F$  值和  $P$  值见表4。从表4可以看出模型和各个参数都达到了显著水平;通过 PROC MIXED 过程获得体重的协方差估计值。结果显示,性别与家系之间存在交互,性别与不同组合间也存在交互。

### 2.4 预测组合矩阵的建立

$3 \times 3$  完全双列杂交产生9个组合,其中,自繁3个组合,杂交6个组合(正反交各3个)。6个杂交组合和3个自繁组合可产生三元杂交和回

交后代,共产生了36个组合(表5)。

表4 体重各方差组分的  $F$  值  
Tab.4  $F$  value of variance components of body weight

	$F$ 值 $F$ value	$P$ 值 $P$ value
模型 model	21.55	<0.000 1
组合 combination	19.61	<0.000 1
组合内家系 family within combination	17.19	<0.000 1
初始体重 $\times$ 雌性 initial weight $\times$ dam	25.19	<0.000 1

表5 36个组合及其父母本  
Tab.5 Parameter and  $P$  value of the regression model on the basis of body weight dependent variable

组合 combination	雄 sire	雌 dam	组合 combination	雄 sire	雌 dam	组合 combination	雄 sire	雌 dam
HHj	Hh	Hj	Jhh	Jh	Hh	Yhh	Yh	Hh
HHy	Hh	Hy	Jhj	Jh	Jj	Yhj	Yh	Jj
HJh	Hh	Jh	Jhy	Jh	Yy	Yhy	Yh	Yy
HJy	Hh	Jy	JHj	Jj	Hj	Yjh	Yj	Hh
HYh	Hh	Yh	JHy	Jj	Hy	Yjj	Yj	Jj
HYj	Hh	Yj	JJh	Jj	Jh	Yjy	Yj	Yy
Hjh	Hj	Hh	JJy	Jj	Jy	YHj	Yy	Hj
Hjj	Hj	Jj	JYh	Jj	Yh	YHy	Yy	Hy
Hjy	Hj	Yy	JYj	Jj	Yj	YJh	Yy	Jh
Hyh	Hy	Hh	Jyh	Jy	Hh	YJy	Yy	Jy
Hyj	Hy	Jj	Jyj	Jy	Jj	YYh	Yy	Yh
Hyy	Hy	Yy	Jyy	Jy	Yy	YYj	Yy	Yj

注:J:建鲤,H:黄河鲤,Y:黑龙江野鲤;大写字母代表母本,小写字母代表父本。下同。

Notes:J:Jian carp,H:Huanghe carp,Y:Heilongjiang carp; the capital letter indicates the female parent, and the small letter indicates the male parent. The same convention is followed below.

### 2.5 三元杂交和回交组合的3种方法预测

通过 GCA、SCA 预测模型,没有一个组合的体重预测值超过 JH 杂交  $F_1$  代的 312 g。预测体重最高值的组合是 Jhj。神经网络预测发现,通过回交,Hj 组合并不能继续提高其生产性能,而通过三元杂交组合 Hj 的体重增加了。同样的具有最高表型值的 Jh 通过三元杂交组合也得到了提

高。组合 Yhj 和 Hyj 获得了最大的体重预测值。通过杂种优势建立的模型对体重预测,结果表明体重的预测值超过杂交  $F_1$  代最高值 312 (JH 组合) 的组合有:HHj, HJh, Hjh, Hjj, Hjy, Jhh, Jhj, Jhy, JHj, JJh, Yjj, YHj, YJh。在这 13 个组合中,4 个三元杂交,9 个回交组合。预测值最大的组合是 JJh。

### 3 讨论

#### 3.1 杂交的固定效应分析

WANG 等<sup>[16]</sup>通过建立遗传环境模型进行了3种红鲤完全双列杂交后代的方差组分割,分析了加性、显性效应与环境的关系。NIELSEN 等<sup>[17]</sup>对16个鲤杂交组合进行了方差组分割,分析了体重和体长的水池效应。本文通过建立统计模型,对杂交 F<sub>1</sub> 代体重进行方差组分型,发现不同组合、组合内家系间固定效应显著。考虑到初始体重和性别的互作对体重的影响发现,初始体重和性别的互作对体重的固定效应显著。这些充分说明,杂交 F<sub>1</sub> 代体重与初始体重和性别(尤其是雌性)的互作要在实际育种中引起足够的重视。

#### 3.2 多元逐步回归与关联度分析的比较

MARENGONI 等<sup>[18]</sup>分析了3品系尼罗罗非鱼及其杂交后代的生长速率。SHIKANO 等<sup>[19]</sup>分析了孔雀鱼杂交后代在耐盐性上的杂种优势。佟雪红等<sup>[20]</sup>等分析了建鲤自交及与黄河鲤正反杂交子代3个组合不同阶段的生长情况,并进行了通径分析。本文则建立了考虑和未考虑标记时所测性状对体重影响的2个回归方程。结果显示,未考虑标记时所测性状的影响是体高对体重的偏回归系数最大,考虑标记时所测性状的影响是体厚对体重的影响最大。原因在于不同时期的体长(体长和标记体长)对体重均有影响(多元逐步回归模型显示)。

灰色关联分析,作为衡量因素间关联程度的一种方法,是对一个发展变化着的系统进行发展态势的量化比较分析。如果测算出的灰色关联度较高,则说明在系统发展过程中,这两个因素变化的趋势具有一致性,即同步变化程度较高。本文通过灰色关联度分析发现,标记体长和体长对体重的关联度都很大,而且多元逐步回归的结果也显示二者对体重的影响都达到了显著水平。因此,不同时期体长对体重的影响需要重视。其实,灰色关联度已用于植物、动物 F<sub>1</sub> 代性状的分析。梁晓伟等<sup>[14]</sup>通过灰色关联度分析对与玉米产量相关的11个性状进行了分析。姚玉钦等<sup>[8]</sup>研制了作物灰色育种智能决策系统。刘唐兴等<sup>[21]</sup>使用灰色关联方法分析了油菜倒伏指数与茎秆生化成分及农艺性状的关系。王玉涛等<sup>[22]</sup>通过灰色

关联度评价了皮特兰猪在商品猪生产中的种用价值。

在研究性状或指标的重要性时,灰色关联度和多元逐步回归可以协同使用<sup>[23]</sup>,也有二者作比较,选择较为适合的方法<sup>[24]</sup>。在本文中,运用灰色关联度分析,区分出了标记体重和标记体长的关系,运用逐步回归法验证了标记体长的重要性,同时对未考虑标记时所测性状对体重影响做的回归分析进行了补充,能够更为客观的对待这些变量,为鲤鱼育种提供参考。

#### 3.3 杂交组合预测

三元杂交、回交预测 杂种优势的充分利用是进行横交固定的基础,而常用的基于 F<sub>1</sub> 代杂交组合的复合方法有三元杂交、回交和双杂交。本试验是 3 × 3 完全双列杂交,从而排除双杂交的途径。为了提高预测的效果,本文采取了 GCA, SCA 预测法, BP 神经网络预测法和中亲杂种优势预测法并进行对比分析。从筛选到的组合上看,方法二获得组合 Yhj 和 Hyj 的筛选,方法三获取了 HHj, HJh, Hjh, Hjj, Hjj, Hjj, Jhh, Jhj, Jhy, JHj, JJh, Yjj, YHj, YJh13 个组合(4 个三元杂交, 9 个回交组合, 预测值最大的组合是 JJh), 方法一没有获得比单交更高体重值的三元组合或是回交组合。

选择预测方法 3 种预测方法中,方法二由于计算中所使用的矩阵难以区分杂交 F<sub>1</sub> 代正反交亲本,所以预测值有重复。因此,对于方法二,要用方法一和方法三来区分这些重复值之间的区别。从预测值的角度看,方法一预测值大多数低于或等于亲本的较大值,没有超过 F<sub>1</sub> 代杂交组合中的最大值;方法二选出 2 个组合,方法三筛选出的组合最多,但是和方法二没有重复。从上面的分析看出,方法二预测筛选力度较大,共筛选出 2 个三元杂交组合,方法三预测可选择出回交组合。但从选出的三元组合看,方法二主要是建鲤作为母本,而方法三选出的三元杂交主要是黑龙江野鲤作为母本,这可能与计算模型有关。因此,可将具有预测最大值的回交组合 JJh,三元杂交组合 Hyj, Hjj(方法二和方法三预测的黄河鲤作为父本,黑龙江野鲤和建鲤全为母本杂交组合)作为进行下一步育种的参考信息。本文缺少三元杂交和回交的数据,只能进行 36 个组合的筛选工作,尽量减少

育种工作的成本,具体的预测效果还要等待预测出组合的观察值来确定。

#### 参考文献:

- [ 1 ] BAKES J, GORDA S. Genetic improvement of common carp strains using intraspecific hybridization [ J ]. *Aquaculture*, 1995, 129(1-4): 183-186.
- [ 2 ] LINHART O, GELA D, RODINA M, *et al.* Top-crossing with paternal inheritance testing of common carp (*Cyprinus carpio* L.) progeny under two altitude conditions [ J ]. *Aquaculture*, 2002, 204(1-4): 481-491.
- [ 3 ] 楼允东. 鱼类育种学 [ M ]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 40-107.
- [ 4 ] 蒋思文. 猪亲本及其杂种 DNA 甲基化差异与杂种优势的关系 [ D ]. 湖北: 华中农业大学, 2006: 8-27.
- [ 5 ] SMITHERMAN R O, JAYAPRAKAS V. Estimates of additive genetic effects, maternal effects, specific combining ability, maternal heterosis, and egg cytoplasm effects for cold tolerance in *Oreochromis niloticus* (L.) [ J ]. *Aquaculture Research*, 1989, 20(2): 159-166.
- [ 6 ] WANG X X, ROSS K E, ERIC SAILLANT E, *et al.* Quantitative genetics and heritability of growth-related traits in hybrid striped bass (*Morone chrysops* ♀ × *Morone saxatilis* ♂) [ J ]. *Aquaculture*, 2006, 261(2): 535-545.
- [ 7 ] KWAYEG R, SHIMELIS H, WILLIAM P M. Combining ability analysis and association of yield and yield components among selected cowpea lines [ J ]. *Euphytica*, 2008, 162(2): 205-210.
- [ 8 ] REZKA M A, PONZONIB R W, KHAWB H L, *et al.* Selective breeding for increased body weight in a synthetic breed of Egyptian Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*; Response to selection and genetic parameters [ J ]. *Aquaculture*, 2009, 293(3-4): 187-194.
- [ 9 ] 姚玉钦, 王占中. 杂交组合灰色评判的设计与实现 [ J ]. 商丘师范学院学报, 2009, 25(3): 59-62.
- [ 10 ] SKARACIS N, SMITH G A. Prediction of three-way top cross sugarbeet hybrid performance [ J ]. *Crop Sci*, 1984, 24(1): 55-60.
- [ 11 ] MELCHINGER A E, GEIGE H H, SEITZ G, *et al.* Optimum prediction of three-way crosses from single crosses in forage maize (*Zea mays* L.) [ J ]. *Theor Appl Genet*, 1987, 74(3): 339-345.
- [ 12 ] 许自成, 朱军. 复交组合种子性状杂种优势的预测方法 [ J ]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2005, 31(2): 139-144.
- [ 13 ] 邓聚龙. 灰色系统 [ M ]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 18-24.
- [ 14 ] 梁晓伟, 陈润玲, 雷晓兵, 等. 杂交玉米产量相关性状的灰色关联度分析 [ J ]. 江西农业学报, 2010, 22(2): 16-18.
- [ 15 ] HALLAUER A R, MIRANDA J B. Quantitative genetics in maize breeding [ C ]. Ames: Iowa State University Press, 1981: 339-351.
- [ 16 ] WANG C H, LI S F. Genetic effects and genotype × environment interactions for growth-related traits in common carp, *Cyprinus carpio* L [ J ]. *Aquaculture*, 2007, 272(1-4): 267-272.
- [ 17 ] NIELSEN H M, ØDEGARD J, OLESEN I, *et al.* Genetic analysis of common carp (*Cyprinus carpio*) strains. I: Genetic parameters and heterosis for growth traits and survival [ J ]. *Aquaculture*, 2010, 304(1-4): 14-21.
- [ 18 ] MARENGONI N G, ONOUE Y, OYAMA T. Offspring growth in a diallel crossbreeding with three strains of Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* [ J ]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1998, 29(1): 114-119.
- [ 19 ] SHIKANO T, NAKADATE M, FUJIO Y. An experimental study on strain combinations in heterosis in salinity tolerance of the guppy *Poecilia reticulata* [ J ]. *Fish Sci*, 2000, 66(4): 625-632.
- [ 20 ] 佟雪红, 袁新华, 董在杰, 等. 建鲤自交及与黄河鲤正反杂交子代的生长比较和通径分析 [ J ]. 水产学报, 2008, 32(2): 182-189.
- [ 21 ] 刘唐兴, 官春云. 油菜倒伏指数和茎秆生化成分及农艺性状的灰色关联分析 [ J ]. 中国油料作物学报, 2008, 30(2): 152-156.
- [ 22 ] 王玉涛, 刘孟洲, 连总强. 运用灰色关联度法评价皮特兰猪在商品猪生产中的种用价值 [ J ]. 现代生物医学进展, 2008, 8(7): 1393-1396.
- [ 23 ] 范德成, 王晓辉. 基于多元回归与灰色关联分析的我国产业投资结构优化研究 [ J ]. 现代管理科学, 2008, 3: 6-8.
- [ 24 ] 杨诗兴. 比较应用灰色关联分析法与数理统计逐步回归法研究中国荷斯坦奶牛体高与气候因子的关系 [ J ]. 中国草食动物, 2000, 2(4): 17-20.

**Grey correlated degree analysis of growth trait of hybrids from  
3 common carp (*Cyprinus carpio* L.) varieties and prediction  
on body weight of offspring from multiple crosses**

SU Sheng-yan<sup>1,2</sup>, DONG Zai-jie<sup>1,2,3\*</sup>, QU Jiang-qi<sup>1</sup>, LIANG Zheng-yuan<sup>1</sup>,  
ZHANG Jian-qiao<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, MA Liang-xiao<sup>1</sup>, YUAN Xin-hua<sup>1,2</sup>

(1. College of Fishery, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China;

2. Key Open Laboratory of Genetic Breeding and Aquaculture Biology of Freshwater Fishes, Ministry of Agriculture,  
Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China;

3. College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** In order to understand and utilize heterosis and select the perfect one of numerous combination by multiple crosses, the present study attempts to analyse the utilization of heterosis by building the regression model, variance components, grey correlated degree, and comparing the prediction results through different methods based on the phenotype analysis of growth traits of 3 × 3 full diallel cross of common carp (*Cyprinus carpio*) (Jian carp, Huanghe carp and Heilongjiang carp). The results showed that: (1) The two formulas of functions were different by considering the tagging traits or not. Body length and tagging length had significant influence on body weight by creating multiple stepwise regression model together with grey correlated degree analysis; (2) Significant fixed effects of combination, combination (family) and initial weight (iw) × dam were observed; (3) combination Hyj, H<sub>jy</sub> and JJh should be considered first in the compound breeding program. This illustrated that fixed effects of initial weight (iw) × dam, tagging length should be considered. The results also showed that utilization of heterosis can be increased by multiple crosses.

**Key words:** common carp; variance components; grey correlated degree analysis; cross prediction

**Corresponding author:** DONG Zai-jie. Tel: 0510 - 85558831, E-mail: dongzj@ffrc.cn