

泥鳅和大鳞副泥鳅杂交子代与其亲本形态特征比较

马来艳 仲 嘉 王卫民

华中农业大学水产学院/农业农村部淡水生物繁育重点实验室/
农业动物遗传育种与繁育教育部重点实验室, 武汉 430070

摘要 采用形态学测定与统计分析相结合的方法, 观察和测定泥鳅♀ × 大鳞副泥鳅♂ (D×P) 和大鳞副泥鳅♀ × 泥鳅♂ (P×D) 及其亲本的形态差异、可数性状及可量性状, 研究泥鳅和大鳞副泥鳅杂交子代及其亲本的形态差异。结果显示, 正反交子代 (D×P 和 P×D) 外观相似, 同时具有双亲的一些特征, 如尾柄处皮褶发达, 与大鳞副泥鳅相似, 而身体上的花纹与泥鳅更相似, 大多为圆形斑点, 兼有少部分条纹。在体型方面, 2种杂交子代体型介于泥鳅和大鳞副泥鳅之间, 较大鳞副泥鳅更圆。聚类分析和主成分分析显示, 2种杂交泥鳅形态相近, 均与大鳞副泥鳅更相似。判别分析综合准确率达到 94.1%, 可以有效鉴别这 2 种泥鳅和它们的杂交种。泥鳅和大鳞副泥鳅正反交均可获得存活子代, 且孵化率、畸形率和早期存活率与自交组没有显著性差异 ($P>0.05$)。

关键词 泥鳅; 大鳞副泥鳅; 杂交; 形态特征; 逐步判别分析; 主成分分析

中图分类号 Q 959.46⁺8 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2019)05-0035-08

杂交能够通过不同基因型的个体之间重新组合, 形成新个体。在自然界中, 杂交已经被证明是动植物间普遍存在的现象^[1]。杂交育种也成为新品种培育的重要途径, 通过种间杂交可以集合双亲的优良性状, 丰富杂交后代的遗传结构, 产生新的遗传变异, 从而获得杂种优势, 如较高的生长和存活率等^[2-3]。杂交育种具有周期短的特点, 可以较快地获得显著经济效益, 在生产中应用广泛, 一般在子一代即可表现出杂种优势。但种间杂交属于远缘杂交, 不同物种间存在繁殖隔离, 造成实际操作复杂、成功率低等问题^[4]。杂交育种技术已经广泛应用在水产动物的品种改良及生产实践中, 并发挥了巨大的作用。

大鳞副泥鳅 (*Paramisgurnus dabryanus*) 和泥鳅 (*Misgurnus anguillicaudatus*) 隶属于鲤形目 (Cypriniformes)、鳅科 (Cobitidae)、花鳅亚科 (Cobitinae), 分别属于副泥鳅属 (*Paramisgurnus*) 和泥鳅属 (*Misgurnus*)。泥鳅和大鳞副泥鳅是广泛分布于我国和东南亚地区的小型淡水经济鱼类^[5-6], 两者外部形态特征相似, 都喜欢栖息于富有植物碎屑、淤泥的静水底层, 常于湖泊、池塘和水田底部等出没, 对环境适应力强。2 种泥鳅在中国大多数地区呈同

域性分布, 且产卵季节都为 3 月至 10 月^[7]。2009 年, You 等^[8]运用微卫星分析, 在长江流域多个水系中检测到泥鳅和大鳞副泥鳅的自然杂交后代。然而研究人员更早已经通过人工繁殖技术成功进行了这 2 种泥鳅的杂交, Fujimoto 等^[9]利用随机扩增多态性 DNA 标记 (RAPD) 分析发现, 泥鳅和大鳞副泥鳅正反杂交子代的表型性状都偏向于母本。Cui 等^[10]对泥鳅和大鳞副泥鳅杂交进行了受精分析。杨兴丽等^[11]对泥鳅和大鳞副泥鳅杂交子代及其亲本进行了肌肉营养含量的测定, 发现杂交后代多项营养指标高于亲本, 表明泥鳅和大鳞副泥鳅杂交种是一种优良的养殖对象。但关于杂交种与亲本间的形态差异关系, 及如何准确区别和判定杂交种与亲本方面的研究尚缺乏。而且近年来, 由于市场需求量急剧增加和生态条件的恶化, 野生泥鳅和大鳞副泥鳅资源急剧减少。笔者系统分析了泥鳅和大鳞副泥鳅与其杂交后代的形态和生长差异, 以期资源保护和繁殖育种提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 试验材料与杂交组合

2017 年 5 月在华中农业大学水产养殖基地挑

收稿日期: 2019-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31372180)

马来艳, 硕士研究生, 研究方向: 水产动物遗传与育种. E-mail: 799149613@qq.com

通信作者: 王卫民, 博士, 教授, 研究方向: 水产动物遗传与育种. E-mail: wangwm@mail.hzau.edu.cn

选 2~3 龄的泥鳅和大鳞副泥鳅各 10 尾,每种鱼雌雄各 5 尾作为亲本。亲本要求性腺成熟度较好,无病无伤,体质健康;雌鱼要求体质量大于 30 g,雄鱼要求体质量大于 20 g。暂养于人工养殖池中(水温 28~30 ℃)。

挑选性成熟的泥鳅和大鳞副泥鳅,催产后分别采集其精子和卵子,将它们都分成 2 份,1 份用于杂交组试验,另 1 份用于自交组试验,分别进行人工授精,共获得 4 个子代群体:泥鳅♀×大鳞副泥鳅♂(D×P)、大鳞副泥鳅♀×泥鳅♂(P×D)、泥鳅自交(D×D)、大鳞副泥鳅自交(P×P)。将 4 个子代群体的鱼苗在同一环境的不同网箱内培育,控制养殖密度相同。2018 年 6 月,对 4 个子代群体进行抽样检测,从每个组合的网箱中随机取出 40 尾鱼,测量其全长等形态学数据,共采集 160 尾样本。

1.2 受精率、孵化率、畸形率和早期成活率计算

4 个组合各设置 3 个独立重复,每个重复随机选取 500 粒受精卵。试验期间保证 24 h 充气,温度控制在(27±0.5) ℃。孵化期间每日早中晚 3 次检查并计数。观察到仔鱼开始出膜后,每隔 0.5 h 左右移走已出膜仔鱼,同时记录正常仔鱼和畸形仔鱼数。

受精率、孵化率、畸形率和早期成活率的计算主要依据 Li 等^[12]的标准。受精率=活胚胎数(胚胎发育进入原肠中期时)/总卵数×100%;孵化率=全

部出膜仔鱼数/总受精卵数×100%;畸形率=畸形仔鱼数/出膜仔鱼总数×100%;早期成活率=孵化 7 d 后存活仔鱼数/出膜仔鱼总数×100%。

1.3 形态学数据分析

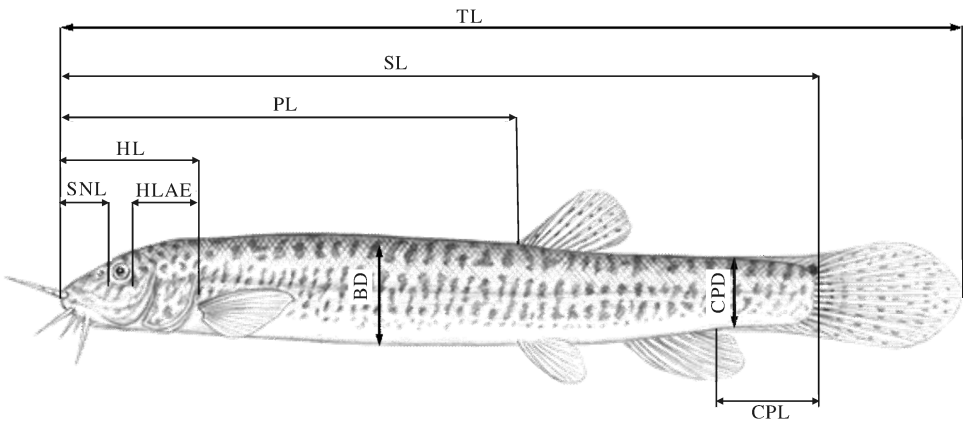
1)外观观察。对 1 龄处于麻醉状态的 4 种子代群体进行拍照,观察和比较泥鳅和大鳞副泥鳅 2 种杂交子代及其亲本的完整鱼体外观差异。

2)可数性状。参照传统方法^[13],统计每尾鱼的背鳍条数、胸鳍条数、腹鳍条数、臀鳍条数、尾鳍条数共 5 个可数性状。

3)可量性状测量。不同组合的试验鱼用电子天平称量其体质量(精确到 0.01 g)后,用游标卡尺测量其可量数据(精确到 0.1 cm),一共有 11 个项目,见图 1。形态数据测量的选择基本依据文献^[14]。可量性状包括体质量、全长、体长、体高、体宽、头长、吻长、眼后头长、背前区长、尾柄长、尾柄高(图 1)。

1.4 统计分析

对 5 个可数性状数据进行卡方检验,比较 4 个泥鳅子代群体间差异显著性。为消除鱼体大小对试验结果的影响,11 个可量数据都除以体长进行校正。对校正后可量性状数据进行 LSD (least significant difference) 显著性检验。同时对 11 项可量性状比值进行聚类分析、主成分分析和判别分析。主成分分析可以将多个形态指标综合成少数几个因子,用更简便的方法来说明不同种类间差异大小^[15]。



TL:全长 Total length; SL:体长(从吻端测量到尾鳍基部)Body length; BD:体高 Body depth; BW:体宽 Body width; W:体质量 Body weight; HL:头长(从吻端到鳃盖的末端边缘) Head length; CPL:尾柄长(从臀鳍终点到尾鳍基部的水平距离) Length of caudal peduncle; SNL:吻长(从吻端到眼睛的距离) Snout length; CPD:尾柄高(尾柄部分的最低高度) Depth of caudal peduncle; PL:背前区长(从吻端到背鳍的基部) Predorsal length; HLAE:眼后头长(从眼睛到鳃盖末端的边缘) Postorbital length of head.

图 1 泥鳅可测量性状
Fig.1 Measurable characters of loach

聚类分析根据变量特征采用欧氏距离的方法^[16]。判别分析采用逐步判别法,选取对形态判别贡献大、差异显著的参数建立各类群的判别函数。数据的处理采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件。

杂交泥鳅的杂种指数 HI (hybrid index) 计算: $HI=100\times(H_i-M_{il})/(M_{i2}-M_{il})$ 。

式中, H_i 为杂种平均值; M_{il} 为母本平均值; M_{i2} 为父本平均值。 $HI>55$ 为偏父本性状, $45<HI<55$ 属中间性状, $HI<45$ 为偏母本性状, $HI>100$ 或 $HI<0$ 为超亲偏离性状^[17]。

2 结果与分析

2.1 泥鳅与大鳞副泥鳅杂交受精率

泥鳅和大鳞副泥鳅杂交各组的受精率、孵化率、畸形率和孵化后 7 d 的存活率见表 1。自交和杂交

组均可获得存活子代,且孵化率、畸形率和早期存活率在各组中没有显著性差异($P>0.05$)。然而,大鳞副泥鳅自交($P\times P$)和大鳞副泥鳅与泥鳅杂交($P\times D$)组合的受精率明显高于另外 2 个组合($P<0.05$)。总体而言,大鳞副泥鳅为母本的卵子比泥鳅卵子有更高的繁殖力。

2.2 泥鳅和大鳞副泥鳅杂交外观差异

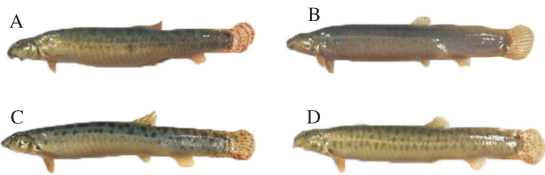
如图 2 所示,泥鳅和大鳞副泥鳅正反杂交子代($D\times P$ 和 $P\times D$)同时具有双亲的一些外部形态特征,如体色偏黄、尾柄处皮褶发达,与大鳞副泥鳅相似;2 种杂交子代体型介于泥鳅和大鳞副泥鳅之间,较大鳞副泥鳅更圆;身体上的花纹与泥鳅更相似,大多为圆形斑点,兼有少部分条纹;杂交子代尾柄基部都具有黑色斑点,和泥鳅一样。

表 1 泥鳅和大鳞副泥鳅种间杂交受精孵化结果

Table 1 Hatching result of fertilized eggs of hybridization between *P. dabryanus* and *M. anguillicaudatus*

组别 Group	总受精卵数 Number of fertilized eggs	受精率/% Fertilization rate	孵化率/% Hatching rate	畸形率/% Abnormality rate	出膜 7 d 后存活率/% Survival rate at 7 days after hatching
P×D-1	553	93.67	88.67	11.81	87.11
P×D-2	502	94.81	88.29	12.02	85.85
P×D-3	508	94.25	89.46	10.98	84.45
Mean±SD		94.24±0.57b	88.81±0.60a	11.60±0.55a	85.8±1.33a
P×P-1	516	92.34	88.84	11.66	84.65
P×P-2	504	94.83	89.83	10.64	84.75
P×P-3	509	95.41	87.82	12.84	86.55
Mean±SD		94.19±1.63b	88.83±1.01a	11.71±1.10a	85.32±1.07a
D×D-1	510	92.58	91.56	9.63	84.18
D×D-2	508	90.73	90.56	10.28	88.20
D×D-3	512	92.07	88.48	11.99	83.54
Mean±SD		91.79±0.96a	90.2±1.57a	10.63±1.22a	85.31±2.53a
D×P-1	522	92.56	90.41	9.95	85.64
D×P-2	519	91.93	89.22	11.13	88.36
D×P-3	506	91.17	89.45	10.88	86.24
Mean±SD		91.89±0.70a	89.69±0.63a	10.65±0.62a	86.75±1.43a

注:同栏内数据右字母不同表示差异显著($P<0.05$)。Notes:Different lowercase letters in the same row indicated significant differences ($P<0.05$) among different groups.



A:泥鳅 *M. anguillicaudatus*; B:大鳞副泥鳅 *P. dabryanus*; C:泥鳅♀×大鳞副泥鳅♂ *M. anguillicaudatus*♀×*P. dabryanus*♂; D:大鳞副泥鳅♀×泥鳅♂ *P. dabryanus*♀×*M. anguillicaudatus*♂.

图 2 杂交泥鳅及其亲本外形图

2.3 可量、可数性状分析

经过杂交指数的计算,泥鳅♀×大鳞副泥鳅♂杂交子代的腹鳍条数目为偏父本性状,胸鳍条和臀鳍条数目属于偏母本性状,背鳍条数目为超亲偏离性状;大鳞副泥鳅♀×泥鳅♂杂交子代的腹鳍和臀鳍条数目为偏母本性状,背鳍条数目为中间性状,胸鳍条数目为超亲偏离性状(表 2)。进行卡方检验,结果表明,泥鳅 4 个子代间的可数性状差异均不显著。

11 项可量性状比值的 LSD 显著性检验和多重

Fig.2 Body shapes of hybrid groups and their parents

表 2 杂交泥鳅及其亲本的可数性状

Table 2 Meristic data of hybrid groups and their parents

项目 Items	泥鳅 D×D	大鳞副泥鳅 P×P	泥鳅×大鳞副泥鳅 D×P	大鳞副泥鳅×泥鳅 P×D	H_1	H_2
背鳍条 Soft ray of dorsal fin	8~9 (8.29±0.18)	8~9 (8.38±0.18)	8 (8.00±0.00)	8~9 (8.33±0.13)	-319.93	46.70
胸鳍条 Soft ray of pectoral fin	9~10 (9.57±0.20)	10~11 (10.63±0.18)	10 (10.00±0.00)	10~11 (10.80±0.11)	40.68	-16.61
腹鳍条 Soft ray of pelvic fin	5~6 (5.71±0.18)	7 (7.00±0.00)	7 (7.00±0.00)	7 (7.00±0.00)	100	0
臀鳍条 Soft ray of anal fin	6~7 (6.14±0.14)	7 (7.00±0.00)	6~7 (6.18±0.12)	7 (7.00±0.00)	4.54	0
尾鳍条 Soft ray of tail fin	15 (15.00±0.00)	15 (15.00±0.00)	15~16 (15.36±0.15)	15~16 (15.13±0.09)	/	/

注 Notes: H_1 表示 D×P 的可量性状杂交指数; H_2 表示 P×D 的可量性状杂交指数。 H_1 : Hybrid index of D×P; H_2 : Hybrid index of P×D.

比较分析结果表明,除了吻长/头长外,其他性状比值在不同子代群体间均有显著性差异(表 3)。其中,尾柄高/体长和尾柄长/尾柄高 2 个指数在 4 种子代群体之间均有显著性差异,杂交子代比值大小介于父母本之间。全长/体长、体高/体长、体宽/体长和体质量/体长几个性状比值在 2 种杂交子代之间没有显著性差异,但是与父母本间均具有显著性差异。2 种杂交子代在头长/体长上与泥鳅没有显著性差异,与大鳞副泥鳅有显著性差异;在背前区长/体长上则正好相反,与大鳞副泥鳅无显著性差异,与泥鳅有显著性差异。尾柄长/体长比值上,2 种杂交子代与父本无显著性差异,与母本有显著性差异。

在杂交指数方面,泥鳅♀×大鳞副泥鳅♂杂交子代在全长/体长($H_1=65.34$)、背前区长/体长($H_1=91.69$)、尾柄长/尾柄高($H_1=79.58$)上偏父本性状;在体高/体长($H_1=29.31$)、体宽/体长($H_1=25.39$)和体质量/体长($H_1=21.44$)上偏母本性状。而大鳞副泥鳅♀×泥鳅♂杂交子代在吻长/头长($H_2=84.53$)、眼后头长/头长($H_2=88.48$)、尾柄长/体长($H_2=81.22$)、体高/体长($H_2=59.74$)、体宽/体长($H_2=72.47$)和体质量/体长($H_2=75.00$)上偏父本性状;在全长/体长($H_2=42.19$)、背前区长/体长($H_2=15.83$)、尾柄高/体长($H_2=39.23$)和尾柄长/尾柄高($H_2=36.43$)上偏母本性状。

表 3 杂交泥鳅及其亲本的可量性状

Table 3 Proportional values of traditional metric characters of hybrid groups and their parents

项目 Items	泥鳅 D×D	大鳞副泥鳅 P×P	泥鳅×大鳞副泥鳅 D×P	大鳞副泥鳅×泥鳅 P×D	H_1	H_2
全长/体长 TL/SL	1.143±0.004a	1.125±0.002b	1.131±0.001c	1.132±0.001c	65.34	42.19
头长/体长 HL/SL	0.158±0.003a	0.150±0.001b	0.159±0.001a	0.158±0.000a	-7.80	100.86
吻长/头长 SNL/HL	0.396±0.004a	0.387±0.005a	0.402±0.012a	0.395±0.002a	-62.64	84.53
眼后头长/头长 HLAE/HL	0.475±0.004a	0.479±0.003a	0.493±0.002b	0.475±0.003a	445.55	88.48
背前区长/体长 PL/SL	0.587±0.005a	0.547±0.003b	0.550±0.002b	0.553±0.002b	91.69	15.83
尾柄长/体长 CPL/SL	0.174±0.004a	0.156±0.006b	0.151±0.001b	0.171±0.001a	129.16	81.22
尾柄高/体长 CPD/SL	0.106±0.001a	0.151±0.001b	0.127±0.001c	0.133±0.001d	46.53	39.23
尾柄长/尾柄高 CPL/CPD	1.641±0.052a	1.080±0.019b	1.195±0.018c	1.284±0.016d	79.58	36.43
体高/体长 BD/SL	0.138±0.002a	0.169±0.001b	0.147±0.001c	0.151±0.001c	29.31	59.74
体宽/体长 BW/SL	0.098±0.002a	0.125±0.001b	0.105±0.000c	0.105±0.001c	25.39	72.47
体质量/体长 W/SL	0.120±0.005a	0.197±0.003b	0.137±0.002c	0.139±0.003c	21.44	75.00

注:表中数据为平均值±标准误,同一行数据标英文字母不同表示有显著差异($P<0.05$); H_1 表示 D×P 的可量性状杂交指数; H_2 表示 P×D 的可量性状杂交指数。 Notes: Values are presented as means±SE. Values in the same line with different letters are significantly different ($P<0.05$); H_1 : Hybrid index of D×P; H_2 : Hybrid index of P×D.

2.4 聚类与判别分析

采用欧氏距离进行聚类分析(图 3),2 种杂

交泥鳅先聚在一起,再和大鳞副泥鳅聚在一起,而泥鳅单独形成一个分支,说明 2 种杂交泥鳅在

形态距离上更接近大鳞副泥鳅,与泥鳅形态距离较远。

对 11 项可量数据标准化后的形态特征参数进行逐步判别分析。F 检验结果表明,除了吻长/头长之外,其他 10 个性状指数在不同品种间形态差异极

显著($P < 0.01$),判别效果较好。以 $X_1 \sim X_{10}$ 依次代替上述 10 个变量:全长/体长、头长/体长、眼后头长/头长、背前区长/体长、尾柄长/体长、尾柄高/体长、尾柄长/尾柄高、体高/体长、体宽/体长、体质量/体长,建立判别公式如下:

$$Y_1 = -786.33 + 777.69X_1 + 146.09X_2 + 165.27X_3 + 334.38X_4 - 1166.26X_5 + 1887.30X_6 + 231.30X_7 - 67.24X_8 + 55.15X_9 + 120.99X_{10}$$
$$Y_2 = -741.89 + 763.69X_1 + 135.85X_2 + 169.03X_3 + 293.80X_4 - 1095.29X_5 + 1841.90X_6 + 218.10X_7 - 67.67X_8 + 102.41X_9 + 125.89X_{10}$$
$$Y_3 = -736.91 + 767.00X_1 + 135.19X_2 + 170.62X_3 + 301.42X_4 - 1069.70X_5 + 1781.11X_6 + 214.34X_7 - 80.42X_8 + 89.38X_9 + 118.17X_{10}$$
$$Y_4 = -746.30 + 771.62X_1 + 137.91X_2 + 168.50X_3 + 305.91X_4 - 1039.28X_5 + 1770.98X_6 + 212.91X_7 - 73.26X_8 + 82.44X_9 + 119.05X_{10}$$

判别泥鳅所属类别时,可将该鱼的各标准化参数代入不同判别函数中,以取得最大的 Y 值所在函数来判别该泥鳅所属类别, $Y_1 \sim Y_4$ 依次代表泥鳅、大鳞副泥鳅、泥鳅♀×大鳞副泥鳅♂、大鳞副泥鳅♀

×泥鳅♂。根据以上 4 个判别函数对所有样本进行预测分类,综合判别准确率达到 94.1%(表 4),其中对泥鳅的判别结果最好,准确率达 100%,大鳞副泥鳅及 2 种杂交群体间有少部分错判。

表 4 杂交泥鳅及其亲本判别分析后的结果

Table 4 Discrimination analysis of hybrid groups and their parents

种类 Species	样本量 Number	预测分类 Predicted group				判别准确率/% Discriminant accuracy
		泥鳅 D×D	大鳞副泥鳅 P×P	泥鳅×大鳞副泥鳅 D×P	大鳞副泥鳅×泥鳅 P×D	
泥鳅 D×D	48	48	0	0	0	100
大鳞副泥鳅 P×P	56		50	2	4	89.3
泥鳅×大鳞副泥鳅 D×P	50			45	5	90.0
大鳞副泥鳅×泥鳅 P×D	51			1	50	98.0

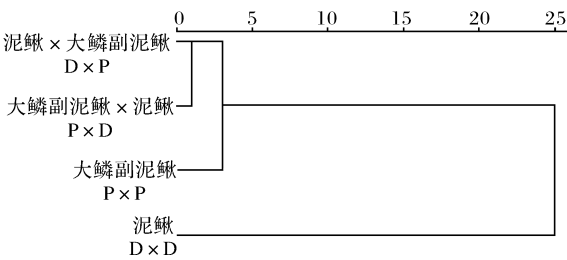


图 3 杂交泥鳅及其亲本的聚类分析

Fig.3 Cluster analysis of hybrid loach and their parents

2.5 主成分分析

对各样本的标准化参数进行主成分分析(取特征值大于 1 为主成分),获得了 4 个主成分,累积贡献率达 72.087%。其中前 3 个主成分对变异的贡献率分别为 35.696%、14.225%、12.280%,累积贡献率为 62.201%。主成分 1 中载荷较大的参数有尾柄长/尾柄高、体宽/体长、背前区长/体长、尾柄高/体长、尾柄长/体长,载荷系数均在 0.150 以上,可以看出主成分 1 主要反映了 4 种泥鳅群体的尾柄比例和体长信息。主成分 2 中载荷较大的参数有眼后头

长/头长、尾柄高/体长、体高/体长、尾柄长/体长、载荷系数均在 0.300 以上,主要反映了头部、尾柄比例等数据对变异的贡献。主成分 3 中载荷较大的参数有全长/体长、头长/体长、体质量/体长,载荷系数均在 0.400 以上,主要反映了头长和体长等信息。通过主成分分析发现,尾柄、头部比例和体长的位置信息对主成分贡献较大。

从各泥鳅群体的形态特征散点图分布情况(图 4)可以看出,4 个泥鳅群体间形态分化差异较大。2 种杂交泥鳅间有较大的重叠,而与父母本之间有极少部分重叠。泥鳅和大鳞副泥鳅之间完全没有重叠。

3 讨论

3.1 杂种与亲本受精率、孵化率、畸形率和早期成活率的比较

本研究中,所有泥鳅和大鳞副泥鳅的自交及杂交组合在生命早期都表现出足够高的受精率、孵化率和早期存活率以及较低的畸形率。这些结果证明

表 5 杂交泥鳅及亲本主成分分析

Table 5 Principal component analysis of hybrid groups and their parents

形态参数 Morphologic parameters	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	第三主成分 Third principal component
全长/体长 TL/SL	0.052	0.194	0.499
头长/体长 HL/SL	0.139	−0.031	0.489
吻长/头长 SNL/HL	−0.063	0.078	0.033
眼后头长/头长 HLAEL/HL	0.061	−0.434	0.052
背前区长/体长 PL/SL	0.180	−0.214	0.010
尾柄长/体长 CPL/SL	−0.167	0.308	−0.134
尾柄高/体长 CPD/SL	0.177	0.369	−0.106
尾柄长/尾柄高 CPL/CPD	−0.230	−0.082	−0.007
体高/体长 BD/SL	0.148	0.342	−0.034
体宽/体长 BW/SL	0.196	−0.060	−0.176
体质量/体长 W/SL	0.144	−0.049	−0.432
特征值 Eigen value	3.927	1.565	1.351
方差贡献率/% Variance contribution	35.696	14.225	12.280
累计贡献率/%	35.696	49.921	62.201
Cumulative variance contribution			

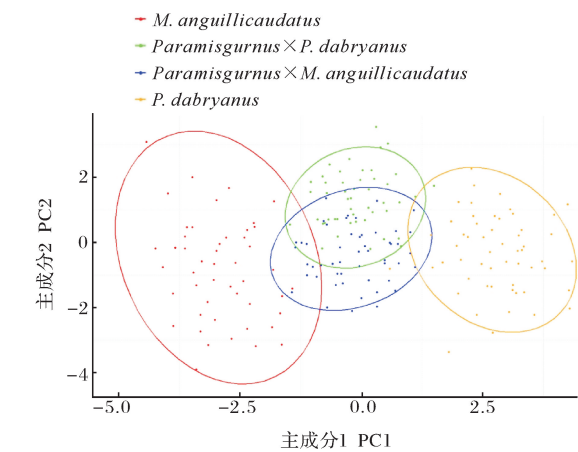


图 4 杂交泥鳅及其亲本的主成分分析图

Fig.4 Map of principal component analysis of hybrid loach and their parents

了泥鳅与大鳞副泥鳅种间杂交的可行性,与李懋等^[18]、Zhou 等^[19]的研究结果一致。对受精率数据的分析显示,大鳞副泥鳅自交和大鳞副泥鳅♀×泥鳅♂的受精率要显著大于另外 2 组,说明以大鳞副泥鳅为母本比以泥鳅为母本具有更高的受精率,和 Cui 等^[10]在先前的研究中观察到的结果一致。有研究表明大鳞副泥鳅的卵在受精和随后的细胞分裂方面的能力确实优于泥鳅^[20]。同时,试验还表明不同自交和杂交泥鳅组合在孵化率、畸形率和早期存活率间都没有显著性差异,之前的研究也报道了泥鳅和大鳞副泥鳅自交和杂交的繁殖效率是同一水平的^[21]。然而,这些结果与其他属鱼类种间杂交相反,显示杂交成功率、正常率和存活率较差^[22-23]。本研究结果表明,泥鳅与大鳞副泥鳅的杂交种具有较高的受精率和成活率,为后续的育种研究奠定了

基础。

3.2 外观和形态差异的比较

形态学性状是区分不同鱼类的重要依据,其受到遗传因子与环境因子等的多方面影响^[24],已有研究表明鲮科鱼类和石斑鱼等多种鱼类杂交后代都不同程度表现出与亲本相似或不同的特征^[2,25]。本研究也发现,泥鳅和大鳞副泥鳅正反交子代在体色、斑纹和体型方面都不同程度地遗传了双亲的特征,但也都产生了和亲本相比明显的变异。2 种杂交泥鳅的外观相似,体色偏黄,兼具父母本的圆形斑点和条纹,但以斑点更为明显,且比泥鳅的斑点要大,尾皮褶发达与大鳞副泥鳅相似。体型介于泥鳅和大鳞副泥鳅之间,偏圆筒状,尾柄基部有黑色圆斑。总体来看,正反交子代的外观和体型综合了父母本的性状。在鳍条数目方面,2 种杂交泥鳅与亲本无显著差异。

在可量性状方面,泥鳅和大鳞副泥鳅在 81.8% 的性状比例上都具有显著性差异,体型差异明显。正反交子代形态相似,数值比例介于父母本之间,其中 63.6% 的数据在 2 种杂交子代间无显著性差异。尾柄高/体长和尾柄长/尾柄高 2 个指数在自交和杂交 4 种子代群体之间均有显著性差异,说明尾部比例是不同群体间的关键差异性状。2 种杂交子代在头长/体长上与大鳞副泥鳅有显著性差异,与泥鳅差异不显著,说明头部比例偏大鳞副泥鳅性状;在背前区长/体长上则与泥鳅有显著性差异,与大鳞副泥鳅无差异性,杂交后代背部比例表现出偏泥鳅的性状。很多杂交子代在继承双亲性状上具有一定的偏向性,本试验中来自父母本的遗传物质在控制杂交泥鳅子代性状表达上也具有一定的偏好,在泥鳅♀×

大鳞副泥鳅♂中,父母本偏好性状比例为1:1;大鳞副泥鳅♀×泥鳅♂中父母本比例则为3:2。

3.3 聚类分析、判别分析和主成分分析

对泥鳅和大鳞副泥鳅自交及杂交子代进行聚类分析,结果显示,4种子代一共分为两大类,泥鳅单独形成一大类,正反交子代和大鳞副泥鳅聚为一类,其中2种杂交子代先聚为一类,再与大鳞副泥鳅聚在一起。同一分类内部各性状差异较小,不同类别间各性状差异较大^[26]。发现正反交子代都与大鳞副泥鳅形态距离更近,泥鳅与其他群体间趋异程度较高。反映出泥鳅和大鳞副泥鳅杂交子代在遗传物质和性状表达上受控于父母本,但是大鳞副泥鳅无论作为母本还是父本,其遗传物质在性状表达调控方面更具优势。

判别分析是鱼类鉴定中经常使用的一种方法^[27],可以充分考虑到单个因子的作用,以及不同因子间的相互影响,从而筛选出最佳组合因子,建立相应的判别函数。黄涛等^[28]对舟山的大鳞副泥鳅和台湾泥鳅进行判别分析,最终判别效果比较理想,可以有效区分2种泥鳅。本研究通过逐步判别分析,筛选了10个有显著性差异的参数构建判别函数,综合判别准确率达到94.1%,判别效果良好。尾柄长/体长和尾柄高/体长是在判别公式中贡献较大的变量,说明尾部形态比例是鉴别这几种泥鳅的重要指标。

本研究采用主成分分析的方法将11个性状转化为3个主要因子,包含了总变异62.2%以上的信息。分析结果显示,第一主成分主要是尾部比例因子,第二主成分主要是头部比例因子,第三主成分主要为体长因子。说明泥鳅与大鳞副泥鳅自交及杂交群体的变异主要是尾部和头部比例的性状部分。同时,分析显示2种杂交泥鳅形态差异较小,2种自交群体间形态差异最大。

综上所述,本研究分析了泥鳅和大鳞副泥鳅及其杂交子代的外部形态差异,从而为2种泥鳅和杂交后代的鉴定提供了一个快速简便的方法。有利于杂交育种中的实际生产和养殖管理及种质资源保护。但是,要更为全面系统地评估杂交泥鳅及亲本间的遗传关系,还需要借助分子标记,从遗传功能等方面深入研究。

参 考 文 献

[1] SEEHAUSEN O. Hybridization and adaptive radiation[J].

Trends in ecology & evolution, 2004, 19(4): 198-207.

[2] 吴水清,郑乐云,罗辉玉,等. 杂交石斑鱼(斜带石斑鱼♀×赤点石斑鱼♂)与其亲本形态性状比较研究[J]. 南方水产科学, 2017, 13(5): 47-54.

[3] 楼允栋,李小勤. 中国鱼类远缘杂交研究及其在水产养殖上的应用[J]. 中国水产科学, 2006, 13(1): 151-158.

[4] 王清印. 海水养殖生物的细胞工程育种[M]. 北京:海洋出版社, 2007.

[5] GAO J, KOSHIO S, NGUYEN B T, et al. Comparative studies on lipid profiles and amino acid composition of wild and cultured dojo loach *Misgurnus anguillicaudatus* obtained from southern Japan[J]. Fisheries science, 2012, 78: 1331-1336.

[6] DONG Z G, LI X Y, ZHANG X J, et al. Development of micro-satellite markers for genetic analysis in the large scale loach *Paramisgurnus dabryanus* [J]. Conservation genetics resources, 2014, 6(1): 151-153.

[7] 胡红. 大鳞副泥鳅和泥鳅性周期研究[J]. 武汉大学学报(理学版), 1992(3): 107-115.

[8] YOU C, YU X, TONG J. Detection of hybridization between two loach species (*Paramisgurnus dabryanus* and *Misgurnus anguillicaudatus*) in wild populations[J]. Environmental biology of fishes, 2009, 86: 65-71.

[9] FUJIMOTO T, YASUI G S, YOSHIKAWA H, et al. Genetic and reproductive potential of spermatozoa of diploid and triploid males obtained from interspecific hybridization of *Misgurnus anguillicaudatus* female with *M. mizolepis* male[J]. Journal of applied ichthyology, 2008, 24(4): 430-437.

[10] CUI L, FANG L, YU Y, et al. Reciprocal hybrids among diploid, tetraploid dojo loach, *Misgurnus anguillicaudatus*, and large-scale loach, *Paramisgurnus dabryanus*: fertilization, survival and growth performance[J]. Journal of the world aquaculture society, 2013, 44: 415-424.

[11] 杨兴丽,胡亚东,屈长义,等. 四倍体泥鳅与大鳞副泥鳅杂交种含肉率及肌肉营养成分分析与评价[J]. 河南水产, 2017(6): 23-27.

[12] LI Y J, YU Z, ZHANG M Z, et al. Induction and viable gynogenetic progeny using eggs and UV-irradiated sperm from the Chinese tetraploid loach, *M. anguillicaudatus* [J]. Aquaculture international, 2013, 21: 759-768.

[13] 李思发,李晨虹,李家乐. 尼罗罗非鱼品系间形态差异分析[J]. 动物学报, 1998, 44(4): 450-457.

[14] 李思发. 中国淡水主要养殖鱼类种质资源研究[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1998: 131-141, 181-210.

[15] 练青平,寇国强,胡廷尖,等. 唇鲮、花鲮及其杂交F1的形态差异分析[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(6): 493-499.

[16] 蔡建琼,于惠芳,朱洪志,等. SPSS 统计分析实例精选[M]. 北京:清华大学出版社, 2006: 301-302.

[17] 王燕,张勇,张海发,等. 两种杂交石斑鱼及其亲本的形态差异分析[J]. 水产学报, 2014, 38(6): 778-785.

[18] 李懋,刘思阳,熊全沫. 大鳞副泥鳅与泥鳅杂交的生物学研究[J]. 武汉大学学报(自然科学版), 1991(2): 117-120.

[19] ZHOU X,ABBAS K,LI M,et al. Comparative studies on survival and growth performance among diploid,triploid and tetraploid dojo loach *Misgurnus anguillicaudatus*[J]. Aquaculture international,2010,18:349-359.

[20] GUO X,DEBROSSE G A,ALLEN S K. Alltriploid Pacific oyster (*Crassostrea gigas* Thunberg) produced by mating tetraploids and diploids[J]. Aquaculture,1996,142:149-161.

[21] 方礼豹. 泥鳅和大鳞副泥鳅杂交育种初步研究[D]. 武汉:华中农业大学,2011.

[22] PARK I S,NAM Y K,DOUGLAS S E,et al. Genetic characterization,morphometrics and gonad development of induced interspecific hybrids between yellowtail flounder,*Pleuronectes ferrugineus* (Storer) and winter flounder,*Pleuronectes americanus* (Walbaum)[J]. Aquaculture research,2003,34(5):389-396.

[23] YU L,XIA X,YANG D,et al. Study of embryonic and postembryonic development of the hybrid (*Ctenopharyngodon idellus* ♀ × *Elopichthys bambusa* ♂)[J]. Animal husbandry and feed science,2015,3:182-190.

[24] IHSEN P E. Stock identification:materials and methods[J]. Canadian journal of fisheries & aquatic sciences,1981,38(38):1838-1855.

[25] 区义君,李加儿,周宏团. 鲮科鱼类属间远缘杂交的发育与生长[J]. 中国水产科学,2000,7(2):110-112.

[26] 李小双,崔青曼,袁春营. 凡纳滨对虾 6 群体的形态差异及判别分析[J]. 水生态学杂志,2010,3(6):87-91.

[27] 李勇,李思发,王成辉,等. 三水系中华绒螯蟹幼蟹形态判别程序的建立和使用[J]. 水产学报,2001,25(2):120-126.

[28] 黄涛,赵波,BABACAR,等. 舟山群岛大鳞副泥鳅与台湾泥鳅的形态差异性分析[J]. 水生态学杂志,2016,37(2):83-87.

Comparison of morphological characteristics between *Paramisgurnus dabryanus* × *Misgurnus anguillicaudatus* hybrids and their parents

MA Laiyan ZHONG Jia WANG Weimin

College of Fisheries/Key Laboratory of Freshwater Animal Breeding,Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Agricultural Animal Genetics, Breeding and Reproduction of Ministry of Education,Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070,China

Abstract In order to find the morphological differences between hybrid 1 (*Misgurnus anguillicaudatus* ♀ × *Paramisgurnus dabryanus* ♂), hybrid 2 (*Paramisgurnus dabryanus* ♀ × *Misgurnus anguillicaudatus* ♂) and their parents,the morphological differences,countable traits and measurable traits were analyzed by combining morphological measurements with statistical analysis.The results showed that the two hybrids were similar in appearance,integrating their parental characteristics. For example,the well-developed caudal fold at the caudal peduncle of the two hybrids was similar to *P. dabryanus*,while the pattern on the body was more similar to that of *M. anguillicaudatus*,most of which were round spots with a small number of stripes. The body shape of hybrids was between their parents,which was rounder than *P. dabryanus*. Cluster analysis and principal component analysis indicated that the morphology of the two hybrids were similar to each other,and were more similar to *P. dabryanus*.The comprehensive accuracy of discriminant analysis reached 94.1%,which can effectively identify the two loach and their hybrids. There was no significant difference of hatching rate,deformity rate and early survival rate between the hybrids and self-crossing group ($P>0.05$).

Keywords *Misgurnus anguillicaudatus*; *Paramisgurnus dabryanus*; hybridation; morphology trait; stepwise discriminant analysis; principal component analysis

(责任编辑:边书京)