

DOI: 10.12264/JFSC2023-0073

日本沼虾杂交选育群体 F3 和亲本群体的形态性状对体重影响的通径分析

范武江, 陆根海, 朱俊鹏

上海市水产研究所(上海市水产技术推广站), 上海 200433

摘要: 为了研究日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)三系杂交选育子代 F3 (SCDF₃ 和 SDCF₃)和亲本群体(淀山湖 DSF₃、洞庭湖 DTF₃、长江 CJF₃)形态性状对体重的影响效果, 采用相关分析、通径分析和多元回归分析方法分析了对体重影响最大的形态性状, 并进行聚类分析。结果显示, 所选择的 12 个形态性状除了额剑上齿数和额剑下齿数以外, 其余各性状间的相关性均达到极显著水平($P < 0.01$), 且与体重均呈极显著正相关($P < 0.01$)。5 个群体被保留的形态性状与体重的复相关系数 R^2 分别为 0.935 (DSF₃)、0.906 (DTF₃)、0.902 (CJF₃)、0.958 (SCDF₃)和 0.988 (SDCF₃); 通径分析中, DSF₃ 群体的头胸甲宽(CW)、全长(OL)、第二步足长(P₂L)和尾节长(TL), DTF₃ 群体的头胸甲宽(CW)、腹部长(AL)和第六腹节高(A₆H), CJF₃ 群体的体长(BL)和尾节长(RL), SCDF₃ 群体的体长(TL)、第六腹节长(A₆L)和第二步足长(P₂L), SDCF₃ 群体的第二步足长(P₂L)、体长(BL)和头胸甲长(CL)是影响体重的主要性状($P < 0.01$)。各群体形态性状与体重(Y)的多元回归方程: $Y_{DSF_3} = -9.661 + CW \times 0.365 + OL \times 0.078 + P_2L \times 0.32 + TL \times 0.28$; $Y_{DTF_3} = -7.009 + CW \times 0.448 + AL \times 0.129 + A_6H \times 0.633$; $Y_{CJF_3} = -11.795 + BL \times 0.258 + RL \times 0.104$; $Y_{SCDF_3} = -4.402 + BL \times 0.093 + A_6H \times 0.531 + P_2L \times 0.013$; $Y_{SDCF_3} = -2.861 + P_2L \times 0.029 + BL \times 0.062 + CL \times 0.078$ 。聚类结果显示, 两个杂交群体子代形态上最为相似。研究结果可为日本沼虾的良种选育和种质资源保护利用提供参考。

关键词: 日本沼虾; 杂交选育; 形态性状; 通径分析

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)07-0852-11

日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)俗称青虾或河虾, 主要分布在中国、日本和东南亚的淡水水域江河湖泊中, 尤其以中国长江流域的产量最高, 是我国重要的淡水经济虾类之一。自 20 世纪 90 年代以来, 日本沼虾人工繁育和池塘养殖技术日趋成熟, 近年来我国日本沼虾养殖产量稳定保持在 20 万 t 以上^[1]。随着养殖规模的扩大, 养殖户习惯于从本地养殖的日本沼虾中自留亲本, 导致逆向选择, 近亲繁殖, 日本沼虾的种质退化严重, 因此开展日本沼虾良种选育和种质改良显得尤为必要。目前已经报道的日本沼虾良种有“太湖 1 号”和在此基础上选育而成的“太湖 2 号”^[2]; 在日本沼虾种内杂交选育方面, 许凡等^[3]开展了

日本沼虾太湖野生群体和养殖群体杂交实验, 李瀚声等^[4]对太湖群体和鄱阳湖群体进行了杂交育种研究, 王文华等^[5]研究了淀山湖日本沼虾杂交改良群体的生长性能, 这些资料显示日本沼虾杂交育种可以获得显著的杂交优势。

同多数水产动物良种选育一样, 体重指标是日本沼虾杂交选育考虑的最重要的经济性性状。杂种优势最重要的特征之一是体重增加率^[6], 而体重性状受到环境因素影响和多个基因控制, 而且与形态性状之间存在较为密切的关系^[7], 因此, 通过研究决定体重的关键形态性状, 更快选出具有潜在生长优势的目标群体, 有助于加快杂交育种进程, 提高育种效率。通径分析和多元回归分

收稿日期: 2023-04-12; 修订日期: 2023-06-05.

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目[沪农科攻字(2016)第 6-2-3 号]

作者简介: 范武江(1974-), 男, 高级工程师, 研究方向为水产动物遗传育种. E-mail: fanwujiang@126.com

析方法通过对形态性状与体重之间直接相关性的分解, 研究形态性状对体重的直接作用和间接作用, 获得不同形态性状和体重相关的密切程度^[8-11], 从而为开展品种选育提供可靠的依据, 在凡纳对虾(*Penaeus vannamei*)^[7,12]、太湖秀丽白虾(*Exopalaemon modestus*)^[13]、脊尾白虾(*Exopalaemon carinicauda*)^[14]、罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)^[15-16]、克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)^[17]的研究中得到广泛应用。日本沼虾人工选育过程中, 有学者对不同地方的野生群体或养殖群体进行了研究^[18-21], Li 等^[22]对 3 个地方日本沼虾群体及其杂交 F1 形态性状和遗传多样性进行了分析, Fan 等^[23]初步分析了三系杂交 F1 杂种优势的分子机制, 发现三系杂交 F1 群体在生长发育、免疫及抗逆相关基因的表达上与母本淀山湖群体有显著差异; 在此基础上, 项目组对杂交子代继续开展人工选育至 F3, 有关日本沼虾杂交选育子代和亲本在形态性状对体重影响差异的研究尚未见报道。本研究采用通径分析方法, 对杂交选育子代 F3 和亲本群体 F3 的形态性状与体重的相关性进行了探讨, 构建各群体形态性状对体重的回归方程, 研究结果可望为日本沼虾新品种选育工作提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 野生群体

野生亲虾分别采集自洞庭湖水域(112°99'E, 29°30'N)、上海淀山湖(120°97'E, 31°13'N)和长江下游扬中附近(119°56'E, 32°24'N), 每个群体收集 1.2 万~1.5 万尾, 采用活水车运输到上海, 在青浦科研基地开展完全隔离专池驯养、人工繁殖和群体选育。

1.2 杂交

亲本群体的继代选育、杂交配组育苗和养殖均在育苗大棚的水泥池中进行, 水泥池规格为长 7 m×宽 2.2 m×深 1 m。以 3 个地方群体的 F3 为亲本, 先用洞庭湖群体(DTF₃)和长江群体(CJF₃)正反杂交培育中间系(CD、DC), 再以中间系的雄虾与淀山湖群体(DSF₃)的雌虾进行杂交, 培育获得三系杂交群体(SCD、SDC), 杂交配组方案如图 1 所示。从杂交群体子代中挑选大规格个体 3000 尾

以上作为后备亲本, 第 2 年繁育下一代虾苗, 依次类推, 选育至 F3。

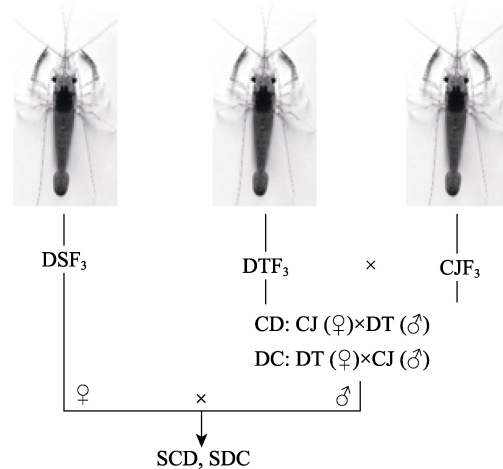


图 1 日本沼虾杂交配组示意图

Fig. 1 Three-line hybridization strategy of *Macrobrachium nipponense*

1.3 形态测量

以杂交群体 F3 和 3 个地方群体 F3 为实验材料, 从每个群体随机取样 30 尾成熟个体, 参照王志铮等^[8]关于日本沼虾的测量方法, 先用滤纸吸干体表水份, 用电子秤称量体重(BW), 精确到 0.01 g; 使用 IP57 型数显游标卡尺测量全长(OL)、体长(BL)、第二步足长(P₂L)、头胸甲长(CL)、头胸甲宽(CW)、额剑长(RL)、第六腹节长(A₆L)、第六腹节高(A₆H)、腹部长(AL)和尾节长(TL)等 10 个形态性状, 精度为 0.02 mm。计数额剑上齿数(NUS)和额剑下齿数(NLS)。

1.4 数据处理

整理测量数据, 计算各形态性状的平均值、标准差和变异系数; 在 SPSS 23.0 中, 以 BW 为因变量, 各形态性状为自变量, 分别进行各性状间相关分析、各形态性状对 BW 的通径分析和决定系数的计算; 数据处理参照马凯等^[9]的方法, 分析形态性状对 BW 的直接作用 P₁ 和间接作用 P_i; 采用逐步引入-剔除法进行多元回归分析, 剔除偏回归系数不显著的性状, 根据被保留的性状计算复相关系数, 建立各群体形态性状估计体重的最优多元回归方程; 采用欧式最短距离法对各群体的形态性状均值进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 形态性状测量值

所测量的形态性状和体重参数见表 1, 在 5 个群体的 13 项性状指标中, BW 的变异系数 (coefficient of variation, CV) 最大。经单因素方差分析 (表 2), 形态性状差异主要来自群体间 ($P < 0.01$)。

对 10 项可量性状进行群体间多重比较分析 (表 3), 两个杂交群体子代间除了 AL 和 TL 之外, 其余形态性状之间差异均不显著 ($P > 0.05$), 但与 3 个亲本群体所有性状之间都存在显著差异; 而亲本群体之间, DSF₃ 和 DTF₃ 在 OL、P₂L 和 RL 间存在显著差异, 而 DTF₃ 和 CJF₃ 的 CL、CW 和 A₆H 之间无显著差异。

表 1 5 个日本沼虾群体形态性状基本参数

Tab. 1 Phenotypic parameters of morphological traits in five populations of *Macrobrachium nipponense*

性状 trait	DSF ₃		DTF ₃		CJF ₃		SCDF ₃		SDCF ₃	
	均值±标准 差/mm mean±SD	变异 系数/% CV	均值±标准 差/mm mean±SD	变异 系数/% CV	均值±标准 差/mm mean±SD	变异系 数/% CV	均值±标准 差/mm mean±SD	变异 系数/% CV	均值±标准 差/mm mean±SD	变异 系数/% CV
BW	4.69±0.87	18.62	4.12±0.61	14.88	5.19±1.59	30.57	1.76±0.58	33.10	1.93±0.75	38.94
OL	69.09±3.76	5.44	66.61±5.20	7.81	71.72±6.10	8.51	51.21±3.78	7.39	52.62±5.07	9.63
BL	55.64±2.78	5.00	54.72±2.73	4.99	57.93±4.91	8.48	41.75±3.13	7.51	43.59±4.23	9.70
P ₂ L	69.47±8.81	12.68	62.69±7.17	11.43	74.38±14.4	19.38	30.43±9.30	30.57	31.15±10.74	34.47
CL	20.05±1.26	6.27	19.90±1.40	7.04	19.63±1.71	8.71	14.69±1.13	12.68	14.88±1.68	11.28
CW	10.92±0.73	6.72	10.70±0.66	6.14	10.86±1.05	9.63	7.95±0.69	8.73	8.15±0.84	10.29
RL	18.42±1.86	10.10	16.42±1.26	7.68	19.43±3.12	16.05	12.71±1.17	9.23	12.99±1.73	13.32
A ₆ L	6.59±0.40	6.10	6.46±0.30	4.66	7.03±0.61	8.67	5.11±0.39	7.67	5.22±0.44	8.39
A ₆ H	4.83±0.37	7.68	4.68±0.24	5.19	4.76±0.41	8.55	3.56±0.30	8.47	3.65±0.43	11.79
AL	26.97±1.69	6.26	26.17±1.40	5.35	28.96±3.07	10.62	21.56±1.35	6.28	22.63±1.72	7.60
TL	9.79±0.59	6.05	9.63±0.57	5.95	10.00±0.85	8.47	7.04±0.70	9.91	7.42±0.80	10.73
NUS	12.57±0.90	7.14	11.27±0.87	7.71	12.23±1.01	8.23	10.67±0.99	9.32	11.30±0.65	5.76
NLS	2.67±0.35	13.10	2.83±0.38	13.38	2.63±0.49	18.61	2.50±0.51	20.34	2.83±0.53	18.73

注: 体重(BW), 全长(OL), 体长(BL), 第二步足长(P₂L), 头胸甲长(CL), 头胸甲宽(CW), 额剑长(RL), 第六腹节长(A₆L), 第六腹节高(A₆H), 腹部长(AL), 尾节长(TL), 额剑上齿数(NUS), 额剑下齿数(NLS)。

Note: body length (BL), overall length (OL), rostrum length (RL), second pereopod length (P₂L), carapace length (CL), carapace width (CW), sixth abdominal segment length (A₆L), sixth abdominal segment height (A₆H), abdomen length (AL), telson length (TL), number of upper frontal eminence spin (NUS), number of lower frontal eminence spin (NLS).

表 2 5 个日本沼虾群体形态性状单因素方差分析

Tab. 2 One-way ANOVA analysis of morphological traits in five populations of *Macrobrachium nipponense*

性状 trait	组间 x^2 sum of squares between groups	组间均方 mean of squares between groups	F	P	组内 x^2 sum of squares within groups	组内均方 mean of squares within groups
BW	303.767	75.942	83.321	0.000	132.158	0.911
OL	11101.073	2775.268	117.222	0.000	3432.924	23.675
BL	6700.972	1675.243	124.992	0.000	1943.401	13.403
P ₂ L	54211.186	13552.797	108.124	0.000	18175.081	125.345
CL	929.985	232.496	110.191	0.000	305.942	2.110
CW	278.524	69.631	107.170	0.000	94.210	0.650
RL	1130.786	282.697	73.844	0.000	555.100	3.828
A ₆ L	89.314	22.328	115.257	0.000	28.091	0.194
A ₆ H	48.400	12.100	94.785	0.000	18.510	0.128
AL	1142.822	285.706	74.981	0.000	552.505	3.810
TL	243.477	60.869	120.924	0.000	72.988	0.503
NUS	72.227	18.057	22.655	0.000	115.567	0.797
NLS	2.427	0.607	2.480	0.000	35.467	0.245

表 3 5 个日本沼虾群体间形态性状多重比较分析

Tab. 3 Multiple comparative analysis of morphological traits among five populations of *Macrobrachium nipponense*

群体 population	性状 trait										
	OL	BL	P ₂ L	CL	CW	RL	A ₆ L	A ₆ H	AL	TL	
DSF ₃	DTF ₃	2.484*	0.922	6.781*	0.159	0.225	2.002*	0.125	0.152	0.801	0.160
	CJF ₃	-2.627*	-2.296*	-4.916	0.425	0.063	-1.003*	-0.439*	0.069	-1.988*	-0.208
	SCDF ₃	17.881*	13.885*	39.034*	5.364*	2.969*	5.712*	1.479*	1.273*	5.415*	2.751*
	SDCF ₃	16.470*	12.043*	38.318*	5.173*	2.772*	5.438*	1.363*	1.182*	4.344*	2.373*
DTF ₃	CJF ₃	-5.112*	-3.218*	-11.697*	0.265	-0.162	-3.005*	-0.565*	-0.082	-2.789*	-0.368*
	SCDF ₃	15.397*	12.963*	32.253*	5.204*	2.744*	3.710*	1.354*	1.122*	4.614*	2.591*
	SDCF ₃	13.986*	11.121*	31.538*	5.013*	2.547*	3.436*	1.237*	1.030*	3.543*	2.213*
CJF ₃	SCDF ₃	20.509*	16.181*	43.950*	4.939*	2.906*	6.715*	1.919*	1.204*	7.403*	2.959*
	SDCF ₃	19.097*	14.339*	43.235*	4.748*	2.709*	6.441*	1.802*	1.112*	6.333*	2.581*
SCDF ₃	SDCF ₃	-1.411	-1.842	-0.716	-0.191	-0.197	-0.274	-0.117	-0.092	-1.071*	-0.379*

注: *表示均值差异显著(P<0.05).

Note: * indicates the difference is significant at 0.05 level.

2.2 简单相关分析

5 个日本沼虾群体的各形态性状间的相关系数和显著性见表 4~6, 除 NUS 和 NLS 外, F3 所有群体其余 11 个形态性状间均呈极显著相关(P<0.01)。BW 与形态性状的相关程度在各群体间不完全一致, 其中 DSF₃ 和 DTF₃ 群体中与 BW 相关程度最大的性状为 CW, 相关系数分别为 0.864 和 0.922 (表 4); CJF₃ 群体和 SCDF₃ 群体中与 BW 相关程度最大的性状为 BL, 相关系数分别为 0.937 (表 5)和 0.965 (表 6); SDCF₃ 群体中与 BW 相关程度最

大的性状指标为 P₂L, 相关系数为 0.974。

2.3 对体重的通径分析

根据线性回归分析结果, 按照通径分析原理, 将各群体保留性状对体重的相关系数(r_{ij})剖分为直接作用(通径系数 P₁)和通过其他性状的间接作用(间接通径系数 P_i), 并建立各群体的多元回归方程, 各群体通径分析结果列于表 7。

由表 4 和表 7 可见, DSF₃ 群体被保留下来的形态性状有 CW、OL、P₂L 和 TL, 各形态性状对 BW 的相关系数由高到低依次是 CW、OL、TL、

表 4 日本沼虾淀山湖群体 F3 (对角上)和洞庭湖群体 F3 (对角下)性状表型间的相关系数

Tab. 4 The correlation coefficients among the traits of Dianshan Lake population F3 (upper diagonal) and Dongting Lake population F3 (lower diagonal) of *Macrobrachium nipponense*

性状 trait	BW	OL	BL	P ₂ L	CL	CW	RL	A ₆ L	A ₆ H	AL	TL	NUS	NLS
BW	1	0.832**	0.607**	0.745**	0.825**	0.864**	0.450*	0.590**	0.667**	0.626**	0.778**	0.193	0.138
OL	0.611**	1	0.783**	0.462*	0.815**	0.716**	0.733**	0.639**	0.652**	0.684**	0.675**	0.039	0.130
BL	0.764**	0.604**	1	0.242	0.643**	0.461*	0.620**	0.560**	0.515**	0.667**	0.533**	0.139	0.037
P ₂ L	0.426*	0.185	0.295	1	0.447*	0.578**	0.207	0.396*	0.519**	0.360	0.470**	0.310	0.107
CL	0.587**	0.545**	0.522**	0.201	1	0.874**	0.429*	0.600**	0.791**	0.560**	0.615**	0.069	-0.020
CW	0.922**	0.564**	0.763**	0.393*	0.652**	1	0.281	0.449*	0.697**	0.518**	0.686**	0.113	0.112
RL	0.680**	0.772**	0.677**	0.288	0.607**	0.676**	1	0.488**	0.208	0.521**	0.379*	-0.033	0.123
A ₆ L	0.875**	0.490**	0.771**	0.364*	0.529**	0.880**	0.659**	1	0.495**	0.422*	0.655**	0.169	0.012
A ₆ H	0.836**	0.586**	0.669**	0.313	0.641**	0.797**	0.751**	0.795**	1	0.374*	0.390*	0.079	-0.147
AL	0.861**	0.547**	0.660**	0.268	0.623**	0.821**	0.619**	0.780**	0.689**	1	0.568**	0.168	0.117
TL	0.728**	0.734**	0.619**	0.451*	0.624**	0.709**	0.835**	0.682**	0.741**	0.752**	1	0.289	0.142
NUS	-0.015	0.288	0.035	-0.206	0.207	-0.040	0.230	-0.098	0.154	-0.085	0.055	1	0.047
NLS	0.116	0.080	0.478**	-0.112	0.133	0.242	0.175	0.236	0.074	0.196	0.015	0.035	1

注: **表示相关系数均达到极显著水平(P<0.01), *表示相关系数达到显著水平(P<0.05).

Note: ** indicates very significant correlation (P<0.01), * indicates significant correlation (P<0.05).

表 5 日本沼虾长江群体 F3 性状表型间的相关系数

Tab. 5 The correlation coefficients among the traits of Yangtze River population F3 of *Macrobrachium nipponense*

性状 trait	BW	OL	BL	P ₂ L	CL	CW	RL	A ₆ L	A ₆ H	AL	TL	NUS	NLS
BW													
OL	0.926**												
BL	0.937**	0.950**											
P ₂ L	0.834**	0.829**	0.794**										
CL	0.760**	0.737**	0.784**	0.512**									
CW	0.858**	0.860**	0.883**	0.680**	0.905**								
RL	0.741**	0.720**	0.671**	0.730**	0.375*	0.486**							
A ₆ L	0.760**	0.776**	0.760**	0.571**	0.531**	0.608**	0.619**						
A ₆ H	0.800**	0.773**	0.792**	0.551**	0.887**	0.887**	0.517**	0.594**					
AL	0.881**	0.845**	0.871**	0.774**	0.600**	0.701**	0.752**	0.723**	0.648**				
TL	0.840**	0.797**	0.832**	0.693**	0.811**	0.803**	0.558**	0.700**	0.775**	0.750**			
NUS	0.408*	0.397*	0.364*	0.384*	0.028	0.186	0.622**	0.458*	0.177	0.569**	0.239		
NLS	0.015	0.073	-0.003	0.136	-0.232	-0.084	0.269	0.227	-0.209	0.234	-0.076	0.529**	

注: **表示极显著相关($P<0.01$), *表示显著相关($P<0.05$).

Note: ** indicates very significant correlation ($P<0.01$), * indicates significant correlation ($P<0.05$).

表 6 日本沼虾杂交选育群体 SCDF₃ (对角上)和 SDCF₃ (对角下)性状表型间的相关系数Tab. 6 The correlation coefficients among the traits of crossbreeding population SCDF₃ (upper diagonal) and SDCF₃ (lower diagonal) of *Macrobrachium nipponense*

性状 trait	BW	OL	BL	P ₂ L	CL	CW	RL	A ₆ L	A ₆ H	AL	TL	NUS	NLS
BW		0.951**	0.965**	0.914**	0.941**	0.923**	0.773**	0.764**	0.924**	0.915**	0.819**	0.003	-0.218
OL	0.971**		0.980**	0.877**	0.957**	0.937**	0.888**	0.833**	0.911**	0.930**	0.883**	-0.040	-0.117
BL	0.973**	0.980**		0.893**	0.944**	0.935**	0.834**	0.817**	0.902**	0.933**	0.874**	-0.072	-0.196
P ₂ L	0.974**	0.922**	0.923**		0.860**	0.787**	0.787**	0.704**	0.816**	0.834**	0.842**	0.080	-0.264
CL	0.956**	0.948**	0.960**	0.904**		0.899**	0.808**	0.789**	0.895**	0.889**	0.819**	-0.055	-0.141
CW	0.952**	0.923**	0.925**	0.925**	0.922**		0.796**	0.783**	0.872**	0.894**	0.806**	-0.155	-0.239
RL	0.954**	0.951**	0.955**	0.919**	0.932**	0.887**		0.748**	0.720**	0.743**	0.824**	0.071	-0.071
A ₆ L	0.842**	0.808**	0.806**	0.836**	0.800**	0.761**	0.799**		0.776**	0.813**	0.720**	0.108	0.078
A ₆ H	0.798**	0.782**	0.773**	0.774**	0.772**	0.780**	0.740**	0.720**		0.892**	0.760**	-0.077	-0.027
AL	0.894**	0.931**	0.939**	0.804**	0.901**	0.840**	0.873**	0.715**	0.710**		0.806**	-0.086	-0.103
TL	0.886**	0.893**	0.889**	0.848**	0.871**	0.828**	0.865**	0.648**	0.661**	0.838**		-0.039	-0.209
NUS	0.002	-0.012	0.002	0.034	-0.075	-0.014	-0.005	-0.159	0.043	0.055	-0.007		0.273
NLS	-0.074	-0.129	-0.062	-0.060	-0.010	-0.130	0.005	-0.053	-0.101	-0.037	-0.088	0.050	

注: **表示极显著相关($P<0.01$), *表示显著相关($P<0.05$).

Note: ** indicates very significant correlation ($P<0.01$), * indicates significant correlation ($P<0.05$).

P₂L, 而 OL 对 BW 的直接作用(0.335)最大, 也大于分别通过其他 3 个性状对 BW 的间接作用(分别为 0.219、0.150 和 0.128); P₂L 和 CW 对 BW 的直接作用(分别为 0.324、0.306)大于二者通过其他性状对 BW 的间接作用, 只有 TL 通过其他性状的间接作用大于 TL 对 BW 的直接作用, 表明 OL、P₂L

和 CW 是影响淀山湖群体体重的主要性状, 而 TL 则是通过 CW 和 OL 共同作用影响体重, 是相对次要的性状指标。根据回归分析结果建立淀山湖群体的多元回归方程为: $Y_{DSF3} = -9.661 + CW \times 0.365 + OL \times 0.078 + P_2L \times 0.32 + TL \times 0.28$ 。

DTF₃ 群体保留了 AL、CW 和 A₆H 3 个性状

指标, 其中 CW 对 BW 的直接作用(0.481)大于通过 AL 和 A₆H 共同影响的间接作用之和(0.441), 而 AL 和 A₆H 对 BW 的直接作用(分别为 0.294 和 0.251)小于其通过 CW 的间接作用(分别为 0.395 和 0.383), 说明影响洞庭湖群体体重的主要性状为 CW, AL 和 A₆H 也通过 CW 间接对体重产生影响。根据回归分析结果, 建立起 DTF₃ 群体体重回归方程为: $Y_{DTF_3} = -7.009 + CW \times 0.448 + AL \times 0.129 +$

$A_6H \times 0.633$ 。

由表 5 和表 7 可见, CJF₃ 群体被保留下来的分别为 BL 和 RL, BL 的直接作用(0.800)大于间接作用(0.144), 而 RL 主要通过间接作用影响体重, 其通过 BL 对 BW 间接作用(0.561)大于其直接作用(0.205), 显然, BL 是影响 CJF₃ 体重的主要形态性状。根据偏回归分析, 得到形态性状与体重的回归方程为: $Y_{CJF_3} = -11.795 + BL \times 0.258 + RL \times 0.104$ 。

表 7 5 个日本沼虾群体形态性状与体重影响的通径分析

Tab. 7 Path analysis of morphologic traits on body weight of five populations of *Macrobrachium nipponense*

群体 population	性状 trait	相关系数 correlation coefficient	直接作用 P ₁ direct effect	间接作用 P _i (r _{ij} × P ₁) indirect effect				Σ
				X1	X2	X3	X4	
DSF ₃	CW	0.864**	0.306		0.240	0.187	0.130	0.557
	OL	0.832**	0.335	0.219		0.150	0.128	0.497
	P ₂ L	0.745**	0.324	0.177	0.155		0.089	0.421
	TL	0.778**	0.190	0.210	0.226	0.152		0.589
DTF ₃	CW	0.922**	0.481		0.241	0.200		0.441
	AL	0.861**	0.294	0.395		0.173		0.568
	A ₆ H	0.836**	0.251	0.383	0.203			0.586
CJF ₃	BL	0.858**	0.800		0.144			0.144
	RL	0.881**	0.205	0.561				0.561
SCDF ₃	BL	0.965**	0.501		0.247	0.217		0.464
	A ₆ H	0.764**	0.274	0.452		0.198		0.650
	P ₂ L	0.914**	0.243	0.447	0.224			0.671
SDCF ₃	P ₂ L	0.974**	0.491		0.324	0.159		0.483
	BL	0.973**	0.351	0.453		0.168		0.621
	CL	0.956**	0.175	0.444	0.337			0.781

注: **表示极显著相关(P<0.01)。X1-X4 分别代表各群体相对应的形态性状。

Note: ** indicates very significant correlation (P<0.01). X1-X4 represent the corresponding morphological traits of each group, respectively.

由表 6 和表 7 可见, SCDF₃ 群体被保留下来的 3 个性状与 BW 相关程度由高到低依次为 BL、A₆H 和 P₂L, 除了 BL 对 BW 直接作用大于间接作用外, 其他两个性状的间接作用均大于直接作用, 且 A₆H 通过 BL 对 BW 的间接作用最大(0.452), 其次是 P₂L 通过 BL 对 BW 间接作用(0.447), 但是 A₆H 通过 P₂L 对 BW 间接作用最小(0.198), 主要通过 BL 和 A₆H 的间接作用对 BW 产生影响, 其次是 A₆H 性状, P₂L 的直接作用最小, 差异显著性检验结果表明尚未达到极显著水平(0.01<P<0.05), 因此, BL 性状是杂交组合 SCDF₃ 群体选育过程中优先考虑的形态指标。根据线性回归分析建立了

该群体保留性状对体重的回归方程:

$$Y_{SCDF_3} = -4.402 + BL \times 0.093 + A_6H \times 0.531 + P_2L \times 0.013$$

SDCF₃ 群体经过回归分析保留了 3 个形态性状 P₂L、BL 和 CL, 该 3 个性状与 BW 的相关性和对 BW 直接作用保持一致, 都是 P₂L>BL>CL, 其中 P₂L 的直接作用大于间接作用, 且大于通过其他两个性状对 BW 间接作用总和, 说明 P₂L 是影响 SDCF₃ 群体 BW 的主要性状; BL 通过 P₂L 对 BW 的间接作用(0.453)大于直接作用, 说明 BL 对 BW 的影响也比较重要, CL 通过其他两个性状对 BW 的间接作用(0.444、0.337)大于直接作用(0.175), 说明 CL 主要通过 P₂L 和 BL 间接作用影

响 BW。SDCF₃ 群体的体重回归方程: $Y_{SDCF_3} = -2.861 + P_2L \times 0.029 + BL \times 0.062 + CL \times 0.078$ 。

2.4 复相关分析

经过对各群体被保留性状的回归分析, 由表 8 可见, 随着各群体保留下来的性状增加, 复相

关系数 R 就增大, 说明保留下来的性状与体重关系的密切程度越高, DSF₃、DTF₃、CJF₃、SCDF₃ 和 SDCF₃ 群体各自被保留性状与体重的复相关系数 R^2 分别达到了 0.935、0.906、0.902、0.958 和 0.988。

表 8 日本沼虾 5 个群体形态性状与体重的复相关分析
Tab. 8 The multiple-correlation coefficients of morphometric traits on the body weight of five populations of *Macrobrachium nipponense*

群体 population	指标 index	复相关 R multiple R	复相关 R^2 R square	调整 R^2 adjusted R square	标准误 std. error of the estimate
DSF ₃	CW	0.864 ^a	0.746	0.737	0.448
	CW,OL	0.917 ^b	0.840	0.828	0.362
	CW,OL,P ₂ L	0.957 ^c	0.917	0.907	0.267
	CW,OL,P ₂ L,TL	0.966 ^d	0.935	0.922	0.244
DTF ₃	CW	0.922 ^a	0.850	0.844	0.242
	CW,AL	0.940 ^b	0.884	0.875	0.217
	CW,AL,A ₆ H	0.952 ^c	0.906	0.895	0.198
CJF ₃	BL	0.937 ^a	0.879	0.875	0.561
	BL,RL	0.950 ^b	0.902	0.895	0.514
SCDF ₃	BL	0.965 ^a	0.931	0.928	0.156
	BL, A ₆ H	0.973 ^b	0.946	0.942	0.140
	BL, A ₆ H, P ₂ L	0.979 ^c	0.958	0.953	0.126
SDCF ₃	P ₂ L	0.974 ^a	0.949	0.947	0.173
	P ₂ L,BL	0.993 ^b	0.986	0.985	0.093
	P ₂ L,BL,CL	0.994 ^c	0.988	0.987	0.087

注: 字母上标不同表示保留不同性状后的模型拟合度。

Note: The different letter superscripts indicate the model fitting degree when different traits are retained.

2.5 形态性状对体重影响程度分析

根据通径系数和相关系数统计各群体的保留性状对体重的决定系数(表 9), 不同群体影响体重的核心性状并不相同, CJF₃ 和 SCDF₃ 群体决定系数最大的是 BL 单独一个性状, 决定系数分别为 0.640 和 0.251, DSF₃ 群体是 OL 和 CW 两个性状共同作用的决定系数最大(0.147), DTF₃ 群体是 CW 和 AL 两个性状共同作用的决定系数最大(0.232), SDCF₃ 群体是由 P₂L 和 BL 两个性状共同作用的决定系数最大(0.319); 各群体被保留的形态性状对 BW 的影响程度大小, DSF₃ 的决定系数由大到小排序依次为 CW-OL>CW-P₂L>OL>P₂L>OL-P₂L>CW>OL-TL>CW-TL>P₂L-TL>TL, DTF₃ 的形态性状对 BW 影响程度依次是 CW-AL>CW>CW-A₆H>AL-A₆H>AL>A₆H, CJF₃ 的决定系数由

大到小依次为 BL>BL-RL>RL, SCDF₃ 的形态性状对 BW 的影响程度最大的是 BL (0.640), 其次是 BL 和 RL 共同作用(0.230), RL 影响程度最小(0.042); SDCF₃ 群体对体重影响程度最大的是 P₂L 和 BL 两个性状共同作用(0.319), 所有被保留性状对 BW 的决定作用程度由大到小依次为 P₂L-BL>P₂L>P₂L-CL>BL>BL-CL>CL。

2.6 聚类分析

根据各群体形态性状均值进行系统聚类, 如图 2 所示, 两个杂交群体子代 SCDF₃ 和 SDCF₃ 单独聚为一个分支, DSF₃ 首先和 CJF₃ 聚类为一支, 再与 DTF₃ 聚为一大支, 显示杂交子代与亲本子代形态上存在显著差异; 从聚类结果分析, 三系杂交子代在形态上与母本群体 DSF₃ 比较相似, 而与原始亲本之一的 DTF₃ 在形态上相距最远。

表 9 日本沼虾 5 群体形态性状对体重的决定系数
Tab. 9 The determinant coefficients of morphometric traits on the body weight of five populations of *Macrobrachium nipponense*

群体 population	性状 trait	决定系数 d determinant coefficient				Σ
		$d_i=p_i^2$		$d_{ij}=2 \times r_{ij} \times p_i \times p_j$		
		X1	X2	X3	X4	
DSF ₃	CW	0.094	0.147	0.115	0.080	0.935
	OL		0.113	0.100	0.087	
	P ₂ L			0.105	0.058	
	TL				0.036	
	CW	0.231	0.232	0.192		
DTF ₃	AL		0.086	0.102		0.906
	A ₆ H			0.063		
CJF ₃	BL	0.640	0.220			0.902
	RL		0.042			
SCDF ₃	BL	0.251	0.247	0.217		0.958
	A ₆ H		0.075	0.109		
	P ₂ L			0.059		
SDCF ₃	P ₂ L	0.241	0.319	0.156		0.988
	BL		0.123	0.118		
	CL			0.031		

注: X1-X4 分别代表各群体相应的形态性状。
Note: X1-X4 represent the corresponding morphological traits of each group, respectively.

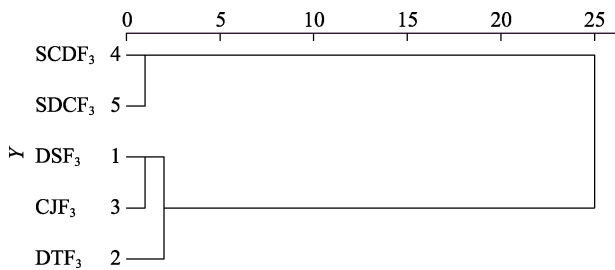


图 2 日本沼虾 5 群体形态聚类
Fig. 2 Cluster dendrogram of five populations of *Macrobrachium nipponense*

3 讨论

杂交可将遗传基础不同的个体或群体基因自由组合, 丰富并改变后代遗传组成或遗传结构, 获得杂交优势, 国内广泛开展了日本沼虾杂种优势的研究与利用, 取得了显著成果^[2], 由于种间杂交成功率低, 操作技术复杂, 虾类杂交育种更多的是采用种内杂交模式, 李瀚声等^[4]将日本沼虾太湖群体与鄱阳湖群体杂交, 杂交子代在体

长、体重和生长速度方面表现出显著的杂交优势。由于日本沼虾定居性较强, 多行攀爬活动, 游泳能力较弱, 仅作短距离游泳, 因此在自然条件下, 生活在不同水域的野生群体之间很少有遗传物质的交流, 群体间地理位置越远, 其亲缘关系也越远^[24]。遗传距离越远的群体间杂交, 就有可能获得较大的杂种优势^[25-27]。根据杂种优势的显性学说, 一般有利的性状多由显性基因控制, 不利的性状多由隐性基因控制, 杂交改变了杂交后代的基因组合, 增加了基因的杂合性, 产生某些双亲没有的新性状, 出现可利用的杂种优势等。本研究选用的野生亲本群体分别来自洞庭湖、长江下游扬中江段和淀山湖水域, 3 个种群在地理位置上相距遥远, 且各自具有比较丰富的遗传多样性^[18,28-29]。Li 等^[22]研究发现, 三系杂交群体 F1 比亲本群体子代具有更丰富的遗传多样性, 表明三系杂交是在日本沼虾选育过程中获得杂交优势的有效途径之一。

形态性状的差异是生物多样性的外在表现, 对形态性状的比较分析是研究群体种质差异的方法之一^[30]。本研究采用通径分析、聚类分析和多元回归分析方法对杂交群体 F3 和其亲本群体 F3 进行系统分析, 得到了比较满意的结果, 除了额剑上、下缘齿数与体重相关性不显著, 5 群体影响体重的关键性状主要集中在头胸部、腹部和第二步足, 各群体的决定性性状不完全相同, 3 个亲本群体中 CJF₃ 影响体重的第一决定性性状是 BL, 而 DSF₃ 和 DTF₃ 影响体重的主要性状并非单一性状指标, 而是 CW 分别通过 OL 和 AL 间接作用为主; 2 个杂交群体 F3 保留的性状中有继承自亲本的性状, 也有新的决定性性状出现, 可能是杂交产生的突变和多年人工选择综合作用的结果, 其中的遗传机理和分子机制需要进一步研究。日本沼虾在性成熟后, 雌雄个体呈现出明显的性二态现象^[21]。在人工选育挑选亲虾时, 雄性亲虾的首选性状是第二步足, 其次是头胸部和体长, 而雌性亲虾具有抱卵孵化的习性, 一般要选择腹部性状(腹长、腹高等)更优秀的个体, 本研究在采样时是从群体中随机挑选, 并没有特意区分雌雄, 因此在处理试验结果时依然按照传统习惯将雌雄数

据合并进行分析。而且, 本研究发现, 体长是影响 2 个杂交子代体重的关键性状, 通径分析显示, 其中 SCD 组合的体长性状对体重影响的直接作用大于和其他性状的间接作用, 是主要的决定性性状, SDC 组合的体长与第二步足共同作用对体重的影响最大, 研究结果与黄有辉等^[18]对淀山湖日本沼虾、刘凯等^[19]对长江日本沼虾以及 Li 等^[22]对三系杂交 F1 形态性状的分析结果略有差异, 可能是经过连续几代的人工选育, 杂交子代的一些特定遗传变异得到加强, 有利的变异逐步积累, 并有可能最终固定下来, 因此在日本沼虾三系杂交子代继续选育时, 应该把体长性状作为重点监测指标。

根据复相关分析结果, 本研究中洞庭湖、长江、淀山湖群体选育子代和三系杂交子代保留的形态性状对体重的复相关指数 R^2 等于决定系数总和且大于 0.85, 说明 5 个群体被保留的形态性状是影响体重的主要形态性状^[7], 并建立了 5 群体较为理想的多元回归方程。根据欧式最短距离聚类分析结果, 3 个亲本群体子代单独聚为一大支, 尤其是通过复杂交, 得到的三系杂交群体形成了独立于亲本群体的遗传分支, 2 个杂交群体 F3 在外形上最为相似, 首先聚为一支, 三个亲本群体子代另外聚为一支, 与 F1 在形态上的分类高度一致^[22]。因此, 本研究结果为我国日本沼虾的良种选育提供一种创新技术思路, 也为日本沼虾种质资源保护措施的制定提供了基础资料。

参考文献:

- [1] Food and Agriculture Organization. The State of World Fisheries and Aquaculture in 2020[R]. Rome: FAO, 2020.
- [2] Fu H T. Breeding and extension of new freshwater shrimp variety[J]. Scientific Fish Farming, 2020(3): 26-27. [傅洪拓. 青虾新品种培育与推广[J]. 科学养鱼, 2020(3): 26-27.]
- [3] Xu F, Wang T T, Chen T F, et al. The morphological characters and growth performance of hybrid and backcross progenies from crosses between wild and cultured prawn *Macrobrachium nipponensis*[J]. Fisheries Science, 2011, 30(4): 215-220. [许凡, 王婷婷, 陈太丰, 等. 日本沼虾野生群体与养殖群体杂交、回交后代的形态特征和生产性能[J]. 水产科学, 2011, 30(4): 215-220.]
- [4] Li H S, Feng J B, Xie N, et al. Comparison on growth performance among F1 groups of diallel crosses of *Macrobrachium nipponense* from Taihu Lake and Poyang Lake populations[J]. Freshwater Fisheries, 2011, 41(1): 43-47. [李瀚声, 冯建彬, 谢楠, 等. 日本沼虾太湖群体和鄱阳湖群体杂交 F1 生长性能比较研究[J]. 淡水渔业, 2011, 41(1): 43-47.]
- [5] Wang W H, Fan W J, Li X S, et al. Comparison on growth performance among Dianshan Lake population and two hybrid breeding populations of *Macrobrachium nipponense*[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2018, 45(6): 301-303, 307. [王文华, 范武江, 李雪松, 等. 日本沼虾淀山湖群体和两个杂交选育群体生长性能比较[J]. 水产科技情报, 2018, 45(6): 301-303, 307.]
- [6] Luo W, Zeng C, Yi S K, et al. Heterosis and combining ability evaluation for growth traits of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) when crossbreeding three strains[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(9): 857-864.
- [7] Liu X L, Wu C G, Zhang Z H, et al. Mathematical analysis of effects of morphometric attributes on body weight for *Penaeus vannamei*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 857-862. [刘小林, 吴长功, 张志怀, 等. 凡纳对虾形态性状对体重的影响效果分析[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 857-862.]
- [8] Wang Z Z, Wu Y T, Yang L, et al. Effect of phenotypic and morphometric traits on body weight of *Macrobrachium nipponensis*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(4): 612-618. [王志铮, 吴一挺, 杨磊, 等. 日本沼虾(*Macrobrachium nipponensis*)形态性状对体重的影响效应[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(4): 612-618.]
- [9] Ma K, Tong G X, Kuang Y Y, et al. Effect of morphological traits on body weight of *Thymallus arcticus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(6): 825-833. [马凯, 佟广香, 匡友谊, 等. 北极茴鱼形态性状对体重影响效果分析[J]. 中国水产科学, 2022, 29(6): 825-833.]
- [10] Li Y H, Chen S' A, CHeng Y. Path analysis and growth curve fitting of morphological traits and body weight of *Triplophysa yarkandensis*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(1): 49-57. [李艳慧, 陈生熬, 程勇. 叶尔羌高原鳅形态性状与体重的通径分析及曲线拟合[J]. 中国水产科学, 2022, 29(1): 49-57.]
- [11] Zhang X M, Cheng S F. Path analysis and growth curve fitting of the morphological traits and body weight of *Conger myriaster*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(10): 1167-1175. [张新明, 程顺峰. 星康吉鳗形态性状与体重的通径分析及生长曲线拟合[J]. 中国水产科学, 2020, 27(10): 1167-1175.]
- [12] Yang C M, He T, Liu X L, et al. Stepwise regression analysis of morphometric attributes on body weight of *Penaeus van-*

- namei[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011, 20(2): 15-20. [杨长明, 何铜, 刘小林, 等. 凡纳对虾形态性状对体质量的逐步回归分析[J]. 西北农业学报, 2011, 20(2): 15-20.]
- [13] Zhang M Y, Liu K, Duan J R, et al. Path analysis of effects of morphometric traits on body weight of *Exopalaemon modestus* in Taihu Lake[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(21): 417-421. [张敏莹, 刘凯, 段金荣, 等. 太湖秀丽白虾形态性状对体重影响的通径分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 417-421.]
- [14] Zhang C S, Li F H, Xiang J H. Path analysis of effects of morphometric attributes on body weight of *Exopalaemon carinicauda*[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(6): 809-815. [张成松, 李富花, 相建海. 脊尾白虾形态性状对体质量影响的通径分析[J]. 水产学报, 2013, 37(6): 809-815.]
- [15] Xing Q Q, Yang M M, Chen G Z, et al. Path analysis of phenotypic traits on body weight of *Macrobrachium rosenbergii* before and after sexual maturity[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(9): 1632-1645. [邢钱钱, 杨旻珉, 陈国柱, 等. 罗氏沼虾性成熟前后形态性状对体质量的通径分析[J]. 水产学报, 2022, 46(9): 1632-1645.]
- [16] Tang Q Y, Xia Z L, Cai M Y, et al. Correlation and difference of phenotypic traits among cultured groups of the giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(6): 1075-1085. [唐琼英, 夏正龙, 蔡缪炎, 等. 罗氏沼虾养殖群体表型性状间的相关性及类群差异分析[J]. 中国水产科学, 2019, 26(6): 1075-1085.]
- [17] Zhang L, Shi L L, Li Y H. Path analysis of morphological traits and body weight of *Procambarus clarkii*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(18): 148-153. [张龙, 石林林, 李艳和. 克氏原螯虾形态与体重的通径分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(18): 148-153.]
- [18] Huang Y H, Fan B, Li Y M, et al. Path analysis for the correlations between morphological traits and body weight in five *Macrobrachium nipponense* populations[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(8): 1173-1185. [黄有辉, 范斌, 李一鸣, 等. 日本沼虾五群体形态性状对体质量的通径分析[J]. 水产学报, 2016, 40(8): 1173-1185.]
- [19] Liu K, Zhang M Y, Duan J R, et al. Morphological characteristic of *Macrobrachium nipponensis* in lower reaches of the Yangtze River and effects of main morphological factors on body weight[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2011, 26(5): 645-651. [刘凯, 张敏莹, 段金荣, 等. 长江下游日本沼虾形态特征及主要性状对体重的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2011, 26(5): 645-651.]
- [20] Yao (Q/X). Comparative studies on morphology and populations genetic structure among five populations of *Macrobrachium nipponense*[D]. Shanghai: East China Normal University, 2008. [姚茜. 日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)5 个群体形态学及遗传结构的比较研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.]
- [21] Feng J B, Ma K Y, Li J L. Path analysis of the effects of morphological attributes on body mass in *Macrobrachium nipponense*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(2): 219-226. [冯建彬, 马克异, 李家乐. 日本沼虾养殖群体主要形态性状对体质量的通径分析[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(2): 219-226.]
- [22] Li Y M, Fan W J, Huang Y Y, et al. Comparison of morphology and genetic diversity between broodstock and hybrid offspring of oriental river prawn, *Macrobrachium nipponense* based on morphological analysis and SNP markers[J]. Animal Genetics, 2021, 52(4): 461-471.
- [23] Fan W J, Li Y M, Li X S, et al. De novo transcriptome analysis reveals possible heterosis for growth, immunity and anti-oxidation of *Macrobrachium nipponense* hybrid offspring and parent populations[J]. Aquaculture Research, 2022, 53(1): 1-12.
- [24] Feng J B, Sun Y N, Cheng X, et al. Sequence analysis of mitochondrial COI gene of *Macrobrachium nipponense* from the five largest freshwater lakes in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(4): 517-525. [冯建彬, 孙悦娜, 程熙, 等. 我国五大淡水湖日本沼虾线粒体 COI 基因部分片段序列比较[J]. 水产学报, 2008, 32(4): 517-525.]
- [25] Chang Y Q, Liu X L, Xiang J H, et al. The juvenile growth and survival of hybrid between Chinese population and Japanese population of *Chlamys farreri*[J]. Journal of Fisheries of China, 2002, 26(5): 385-390. [常亚青, 刘小林, 相建海, 等. 栉孔扇贝中国种群与日本种群杂交一代的早期生长发育[J]. 水产学报, 2002, 26(5): 385-390.]
- [26] Li H S, Feng J B, Xie N, et al. Genetic structure analysis of parents and F1 generation groups of *Macrobrachium nipponense* from Taihu Lake and Poyang Lake[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(3): 321-327. [李瀚声, 冯建彬, 谢楠, 等. 日本沼虾太湖和鄱阳湖群体及其 F1 的遗传结构分析[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(3): 321-327.]
- [27] Chen L, Li S F, Jian W Y, et al. Evaluation of growth performance of JA tilapia (NEW GIFT strain *O. niloticus*♀ × *O. aureus*♂)[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008, 17(3): 257-262. [陈林, 李思发, 简伟业, 等. 吉奥罗非鱼(新吉富罗非鱼♀ × 奥利亚罗非鱼♂)生长性能的评估[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(3): 257-262.]

- [28] Xia J H, Fan W J, Wang X Q, et al. Genetic diversity in three different natural populations of *Macrobrachium nipponense* revealed by SSR markers[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2014, 37(4): 23-28. [夏建海, 范武江, 王晓清, 等. 3个不同地理日本沼虾天然群体遗传多样性的 SSR 分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2014, 37(4): 23-28.]
- [29] Fu H T, Qiao H, Li F J, et al. Genetic diversity of *Macrobrachium nipponense* on a regional scale in the Yangtze River[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(2): 204-212. [傅洪拓, 乔慧, 李法君, 等. 长江不同江段青虾的遗传多样性[J]. 水产学报, 2010, 34(2): 204-212.]
- [30] Li S F. Genetical characterization of major freshwater culture fishes in china[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1998:3-10.[李思发. 中国淡水主要养殖鱼类种质研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社. 1996: 3-10.]

Path analysis for morphological traits and body weight among hybrid populations F₃ and their parental populations of oriental river prawn (*Macrobrachium nipponense*)

FAN Wujiang, LU Genhai, ZHU Junpeng

Shanghai Fisheries Research Institute, Shanghai 200433, China

Abstract: In order to determine the influence of key morphological traits on the body weight (BW) of three-line hybridizations (SCDF₃, SDCF₃) and the F₃ generations of their parent populations (Dianshan Lake, DSF₃; Dongting Lake, DTF₃; Yangtze River, CJF₃) of *Macrobrachium nipponense*, the correlations between morphometric attributes and BW were explored using correlational, path, and regression analyses. Thirty individuals from each of the five populations were randomly sampled to measure their BW and 12 morphometric attributes, including the body length (BL), overall length (OL), rostrum length (RL), second pereopod length (P₂L), carapace length (CL), carapace width (CW), sixth abdominal segment length (A₆L), sixth abdominal segment height (A₆H), abdomen length (AL), telson length (TL), number of upper frontal eminence spin (NUS), and number of lower frontal eminence spin (NLS). Correlation coefficients among all variables were calculated. Path coefficients were calculated by setting the BW as a dependent variable and other attributes as independent variables via stepwise elimination. The results showed that, except for those of the NUS and NLS, the correlations of the 10 other morphological traits were very significantly positively correlated with BW ($P < 0.01$). The multiple correlation coefficients between morphological traits and body mass of five populations were as follows: 0.935 for DSF₃, 0.906 for DTF₃, 0.902 for CJF₃, 0.958 for SCDF₃, and 0.988 for SDCF₃. The path coefficients showed that: (1) The CW, OL, P₂L, and TL of the Dianshan Lake population were significantly correlated with BW, and the multiple regression equation for the estimation of BW was $Y_{DSF_3} = -9.661 + CW \times 0.365 + OL \times 0.078 + P_2L \times 0.32 + TL \times 0.28$; (2) The CW, AL, and A₆H of the Dongting Lake population were significantly correlated with BW, and the multiple regression equation for the estimation of BW was $Y_{DTF_3} = -7.009 + CW \times 0.448 + AL \times 0.129 + A_6H \times 0.633$; (3) The BL and RL of the Yangtze River population were significantly correlated with BW, and the multiple regression equation for the estimation of BW was $Y_{CJF_3} = -11.795 + BL \times 0.258 + RL \times 0.104$; (4) The BL, A₆H, and P₂L of the SCDF₃ population were significantly correlated with BW, and the multiple regression equation for the estimation of BW was $Y_{SCDF_3} = -4.402 + BL \times 0.093 + A_6H \times 0.531 + P_2L \times 0.013$; (5) The P₂L, BL, and CL of the SDCF₃ population were significantly correlated with BW, and the multiple regression equation for the estimation of BW was $Y_{SDCF_3} = -2.861 + P_2L \times 0.029 + BL \times 0.062 + CL \times 0.078$. The clustering results showed that the progenies of the two hybrid populations were most similar in morphology. The results of this study can provide reference for the breeding of *M. nipponense* and the conservation and utilization of its germplasm resources.

Key words: *Macrobrachium nipponense*; cross breeding; morphological traits; path analysis

Corresponding author: FAN Wujiang. E-mail: fanwujiang@126.com