

文章编号: 1674-5566(2024)02-0361-10

DOI: 10.12024/jsou.20230904310

## 克氏原螯虾三群体双列杂交组合生长性能和耐干露能力比较分析

邹宇凡<sup>1</sup>, 吴玮杰<sup>1</sup>, 白志毅<sup>1,2</sup>, 李典中<sup>4</sup>, 蒋军<sup>3</sup>, 程熙<sup>5</sup>, 李家乐<sup>1,2</sup>

(1. 上海海洋大学 农业农村部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心, 上海 201306; 3. 安徽省水产技术推广总站, 安徽 合肥 230000; 4. 芜湖盛典休闲生态园有限公司, 安徽 芜湖 241212; 5. 上海市嘉定区水产技术推广站, 上海 201800)

**摘要:**以遗传多样性高、生长快的江苏漏湖、江苏建湖和安徽芜湖3个克氏原螯虾优异种质群体进行双列杂交试验, 得到6个杂交组[漏湖♀×建湖♂(GJ)、建湖♀×漏湖♂(JG)、漏湖♀×芜湖♂(GW)、芜湖♀×漏湖♂(WG)、建湖♀×芜湖♂(JW)、芜湖♀×建湖♂(WJ)]和3个自交组[漏湖♀×漏湖♂(GG)、建湖♀×建湖♂(JJ)、芜湖♀×芜湖♂(WW)], 对9个组合生长性能和生态适应性比较分析, 结果表明: (1) 养殖周期内, WW和JJ组合雌雄个体体质量特定增长率、增重率均显著大于其余组合; 除GJ和JG外其余组合雄性个体体质量特定增长率、增重率显著大于雌性, 3—5月各杂交组合生长性状均未见杂种优势; (2) 随养殖时间的增加, 9个群体克氏原螯虾头胸甲长/体长、腹部长/体长变化明显, 头胸甲长/体长逐渐增加, 腹部长/体长逐渐减小且5月雌雄个体间出现分化, 雌性腹部长占比显著大于雄性。头胸甲宽/体长、腹部宽/体长、尾节长/体长仅4月有明显增加; (3) 干露24 h各组虾开始出现死亡, 48 h各组合存活率出现显著分化, 48 h时 WW组合存活率显著大于其余组合, GJ和JG两个正反交组在耐干露能力方面呈现出杂种优势。本研究发现克氏原螯虾种质混杂一定程度限制了生长性状杂种优势, 但抗逆性表现出杂种优势, 适当杂交再选育是重要的育种策略, 克氏原螯虾生长和腹部长占比呈明显雌雄二态性, 单性育种也是重要方向。

**关键词:** 克氏原螯虾; 群体间杂交; 生长性能; 干露胁迫; 杂种优势

**中图分类号:** S 966.12 **文献标志码:** A

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)属于甲壳纲(Crustacea)十足目(Decapoda)螯虾科(Cambaridae), 又被称为“小龙虾”或“淡水小龙虾”。克氏原螯虾分布较广, 是具有重要经济价值的淡水养殖品种<sup>[1-3]</sup>。克氏原螯虾在20世纪30年代末从日本传入我国江苏省, 目前已经广泛分布于我国长江中下游的诸多省市<sup>[4]</sup>。近年来, 克氏原螯虾消费市场十分火爆, 野生资源因过度捕捞而急剧下降, 稻虾综合种养规模急剧上升, 而种苗生产仍为自繁自育模式, 极易出现近亲繁殖现象, 导致个体规格越来越小, 致使种质退化、病害频发、含肉率降低等问题<sup>[5]</sup>, 严重威胁了克氏原螯虾产业发展。因此, 遗传改良克氏原螯虾种质非常重要。

通过杂交育种的方法找到选育性状优势的

交配组合, 进而选育出优异的克氏原螯虾品种, 可以从根本上解决克氏原螯虾种质问题。杂种优势是指两个或者两个以上不同遗传类型(不同基因型)的物种、品种或品系杂交产生的杂种一代, 在生活力、生长速度、产量、质量和抗逆性等方面比其双亲有优势的现象<sup>[6]</sup>。杂种优势在自然界是普遍存在的<sup>[7]</sup>。在罗氏沼虾方面, 江宗冰等<sup>[8]</sup>以5个罗氏沼虾专门化品系子四代为亲本, 运用完全双列杂交方法发现所有杂交子一代均表现出平均杂种优势与超亲杂种优势; 周劲松等<sup>[9]</sup>发现罗氏沼虾浙江群体与缅甸群体杂交后代遗传多样性高于浙江本地品种; 周发林等<sup>[10]</sup>利用斑节对虾3个种质群体采用完全双列杂交, 得出杂交组合特殊配合力和杂种优势最好的杂交组合; 在克氏原螯虾方面, 国内外许多学者进行了

收稿日期: 2023-09-12 修回日期: 2023-12-18

基金项目: 上海市科技创新行动计划项目(23N11900300); 安徽省水产种业振兴项目(2022AHNYNC081FW)

作者简介: 邹宇凡(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产动物遗传育种。E-mail: yufzou@163.com

通信作者: 白志毅, E-mail: zybai@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

生长性状、遗传多样性、抗逆性能等多方面研究<sup>[11-14]</sup>。也有关于克氏原螯虾家系建立的报道,胡亚成等利用微卫星标记对克氏原螯虾的半同胞家系分析和亲子鉴定,提出了一种有效的鉴别克氏原螯虾不同家系的分子标记方法<sup>[15]</sup>,但是对其杂交育种以及杂种优势鲜有报道,目前也未见有克氏原螯虾新品种。

本研究通过遗传多样性及生长性能的养殖对比筛选获得江苏溇湖、江苏建湖和安徽芜湖这3个克氏原螯虾优异种质,进行双列杂交得到9个组合群体,对构建的6个杂交组合和3个自交组合的生长性能和生态适应性进行比较分析,以期对克氏原螯虾杂交优势利用的可行性提供参考,为良种选育提供优良种质材料。

## 1 材料与方 法

### 1.1 群体亲本配组与苗种繁育

在安徽省芜湖市繁昌區克氏原螯虾省级良种场,构建大小为200 m<sup>2</sup>的露天试验田27块,田块进行彻底清塘,水草覆盖率保持在40%左右。

2021年7月,根据生长性状以及抗逆能力评价综合选出3个优异群体,分别为溇湖群体、建湖群体和芜湖群体,以选出的三群体雌雄克氏原螯虾作为亲本,进行双列杂交得到9个组合群体(表1),分别为6个杂交组[溇湖♀×建湖♂(GJ)、建湖♀×溇湖♂(JG)、溇湖♀×芜湖♂(GW)、芜湖♀×溇湖♂(WG)、建湖♀×芜湖♂(JW)、芜湖♀×建湖♂(WJ)],3个自交组[溇湖♀×溇湖♂(GG)、建湖♀×建湖♂(JJ)、芜湖♀×芜湖♂(WW)],每个组合设置3个平行组,即在3个田块繁育及苗种培育,每个田块投放平均规格为(30.00±2.53)g的亲虾500尾,雌雄投放比为1:1。亲虾培育期间,各田块同步管理,早晚各1次投喂高蛋白配合饲料,投喂量为投放亲虾体质量的3%。2022年2月28日,在上述9个组合共27个田块中选取规格一致的虾苗,对应投放在27个成虾养殖池中,每个养殖池300 m<sup>2</sup>,每个池投放10 kg体长约为4.5 cm的虾苗(虾苗使用筛虾机进行挑选),此后每隔30天,即分别在3、4、5月末进行生长性状测量。

表1 3个群体克氏原螯虾双列杂交组合

Tab. 1 Complete diallet cross of three populations in *Procambarus clarkia*

亲本群体 Parental population	溇湖群体(♀) Gehu population	建湖群体(♀) Jianhu population	芜湖群体(♀) Wuhu population
溇湖群体(♂) Gehu population	GG	JG	WG
建湖群体(♂) Jianhu population	GJ	JJ	WJ
芜湖群体(♂) Wuhu population	GW	JW	WW

### 1.2 生长性状测定

放苗时,每个组合群体分别取样克氏原螯虾雌雄个体30尾,养成期每30天取样1次,即分别于3月31日、4月30日和5月30日进行生长性状测量。用电子游标卡尺测量每尾虾的全长( $X_1$ )、体长( $X_2$ )、额剑长( $X_3$ )、头胸甲长( $X_4$ )、头胸甲宽( $X_5$ )、腹部长( $X_6$ )、腹部宽( $X_7$ )、尾节长( $X_8$ )共8个生长性状(图1),精确到0.01 mm,用电子天平称量体质量( $Y$ ),精确到0.01g。

### 1.3 耐干露能力评价

出虾苗时,每个组合取体长(5.89±0.23)cm、体质量(5.02±0.60)g的虾苗暂养于循环水族缸中,增氧机充氧,加热控制养殖水温为(20±1)°C,每天投喂配合饲料,暂养3d后,进行干露试验,在室温(20±1)°C的条件下,分别设11个干露时间处理组(6、12、18、24、30、36、42、48、54、60和72 h)和1

个对照组(无干露处理),每个处理组设置3组平行实验,每组雌雄各放养30尾,共60尾虾,干露时间结束后放回水族箱养殖,在一定时间内观察并记录各组累积成活率。

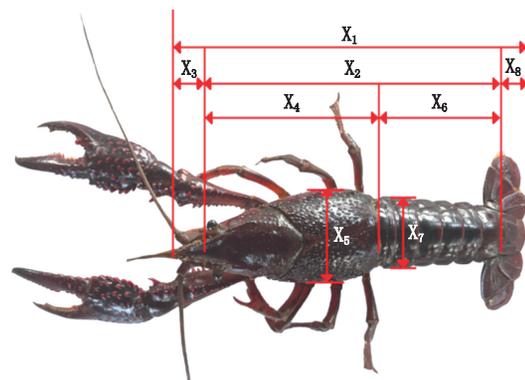


图1 克氏原螯虾各生长参数测量示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of growth parameter measurement of *Procambarus clarkia*

### 1.4 数据处理与统计分析

为消除克氏原螯虾个体间体型差异对生长性状比较的影响,在分析时使用全长( $X_1$ )、额剑长( $X_3$ )、头胸甲长( $X_4$ )、头胸甲宽( $X_5$ )、腹部长( $X_6$ )、腹部宽( $X_7$ )、尾节长( $X_8$ )等形态参数与体长的比值,如全长/体长( $X_1/X_2$ )、腹部长/体长( $X_6/X_2$ )。由于克氏原螯虾可食用部分基本集中于腹部,本研究使用腹部长占体长比这一指标衡量个体的出肉率状况。

进一步针对体质量指标,分析增重率和特定增长率,计算方法如下:

$$R_{WG}=(M_2-M_1)/M_1\times 100\% \quad (1)$$

$$R_{CAG}=(\ln W_2-\ln W_1)/t\times 100\% \quad (2)$$

式中: $W_1$ 、 $W_2$ 分别为初质量和末质量; $t$ 为养殖天数。

平均杂种优势(HM,%)计算公式:

$$H_M(\%)=(F_1-P_M)\times 100\%/P_M \quad (3)$$

式中: $F_1$ 为杂交组合子一代某性状的平均值; $P_M$ 为自交组合子一代某性状的平均值。

用Excel和SPSS 17.0统计分析软件进行数据处理,采用ANOVA进行方差分析,并通过Duncan's法进行多重比较检验差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 克氏原螯虾不同杂交组合体质量、增重率及特定增长率比较

5月份对9个克氏原螯虾群体的体质量进行了测量,并计算出不同群体克氏原螯虾增重率、特定增长率(表2)。我们发现在养殖周期内,各组合雌性个体体质量特定增长率大小排序为:WW>JJ>WJ>JW>WG>GG>GJ>JG>GW,且WW和JJ组合大于其余组合;增重率大小排序为:WW>JJ>WJ>JW>WG>GG>GJ>JG>GW,即WW和JJ组合雌性个体体质量特定增长率以及增重率大于其余组合( $P<0.05$ );雄性个体平均体质量特定增长率与增重率大小排序结果一致,均为:JJ>WW>JW>GG>WJ>WG>GW>GJ>JG,即WW和JJ组合雄性个体体质量特定增长率以及增重率大于其余组合( $P<0.05$ )。除GJ和JG外其余组合雄性个体体质量特定增长率以及增重率均显著大于雌性( $P<0.05$ )。3—5月各杂交组合雌雄个体生长性状均未呈现杂种优势。

表2 各组合克氏原螯虾雌雄个体平均增重率、体质量特定增长率

Tab. 2 Weight gain rate and specific growth rate of weight of male and female individuals in different combinations of *Procambarus clarkii*

组合 Combination	性别 Gender	特定增长率 Specific growth rate	增重率 Weight gain rate
GJ	雌	1.91%±0.27% <sup>hij</sup>	473.06%±159.70% <sup>feh</sup>
	雄	2.07%±0.19% <sup>gh</sup>	549.99%±112.06% <sup>efg</sup>
JG	雌	1.89%±0.27% <sup>ij</sup>	463.01%±145.01% <sup>gh</sup>
	雄	1.99%±0.30% <sup>ghi</sup>	522.66%±203.51% <sup>efgh</sup>
GW	雌	1.80%±0.33% <sup>j</sup>	427.22%±139.18% <sup>h</sup>
	雄	2.08%±0.27% <sup>fgh</sup>	569.35%±156.72% <sup>defg</sup>
WG	雌	2.07%±0.31% <sup>gh</sup>	570.17%±176.13% <sup>efg</sup>
	雄	2.25%±0.25% <sup>cdef</sup>	678.28%±169.21% <sup>bcd</sup>
JW	雌	2.12%±0.29% <sup>fg</sup>	596.56%±196.28% <sup>ef</sup>
	雄	2.35%±0.23% <sup>bc</sup>	743.70%±176.18% <sup>b</sup>
WJ	雌	2.14%±0.25% <sup>fg</sup>	601.41%±156.85% <sup>e</sup>
	雄	2.30%±0.32% <sup>bcd</sup>	722.93%±245.25% <sup>b</sup>
GG	雌	2.03%±0.28% <sup>ghi</sup>	540.57%±152.81% <sup>efgh</sup>
	雄	2.31%±0.29% <sup>bcd</sup>	727.27%±227.56% <sup>b</sup>
JJ	雌	2.17%±0.51% <sup>de</sup>	679.06%±363.16% <sup>bcd</sup>
	雄	2.52%±0.32% <sup>a</sup>	908.38%±297.06% <sup>a</sup>
WW	雌	2.27%±0.38% <sup>cde</sup>	711.47%±254.15% <sup>bc</sup>
	雄	2.46%±0.36% <sup>a</sup>	863.73%±296.62% <sup>a</sup>

注:同列数据间标相同字母表示差异不显著( $P>0.05$ ),不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Notes: In the same row, the same letter superscripts mean no significant difference ( $P>0.05$ ), while different small letter superscripts mean significant difference ( $P<0.05$ ).

2.2 克氏原螯虾不同杂交组合形态参数比较

为了评估9个群体的形态生长特征和差异,分别在3月、4月和5月对9个克氏原螯虾群体的形态参数进行了定期测量,并对全长( $X_1$ )、额剑长( $X_3$ )、头胸甲长( $X_4$ )、头胸甲宽( $X_5$ )、腹部长( $X_6$ )、腹部宽( $X_7$ )、尾节长( $X_8$ )等形态参数与体长

的比值进行了统计学分析(表3)。随养殖时间的增加,9个群体的全长/体长、额剑长/体长变化无明显趋势,头胸甲长/体长逐渐增加,腹部长/体长逐渐减小;9个群体克氏原螯虾头胸甲宽/体长、腹部宽/体长、尾节长/体长在4月有明显增加,5月变化不明显。

表3 9个组合雌雄克氏原螯虾各时期的体长及其他形态指标与体长的比例参数

Tab. 3 Body length and the ratio of other morphological parameters to body length of nine populations of female and male *P. clarkii* at different periods

组合 Combination	性别 Gender	体长 $X_2$ /mm	全长/体长 $X_1/X_2$	额剑长/体长 $X_3/X_2$	头胸甲长/ 体长 $X_4/X_2$	头胸甲宽/ 体长 $X_5/X_2$	腹部长/体长 $X_6/X_2$	腹部宽/体长 $X_7/X_2$	尾节长/ 体长 $X_8/X_2$
3月 March									
GJ	雌	50.34±7.26 <sup>b</sup>	1.12±0.03 <sup>bcd</sup>	0.12±0.03 <sup>bcd</sup>	0.44±0.02 <sup>abcd</sup>	0.22±0.01 <sup>abcd</sup>	0.41±0.02 <sup>abcd</sup>	0.19±0.01 <sup>abcd</sup>	0.15±0.03 <sup>abcd</sup>
	雄	53.74±5.30 <sup>ab</sup>	1.11±0.02 <sup>bcd</sup>	0.11±0.02 <sup>bcd</sup>	0.44±0.02 <sup>ab</sup>	0.23±0.01 <sup>ab</sup>	0.41±0.02 <sup>cd</sup>	0.19±0.01 <sup>cd</sup>	0.15±0.02 <sup>abcd</sup>
JG	雌	54.55±6.69 <sup>ab</sup>	1.11±0.02 <sup>d</sup>	0.11±0.02 <sup>d</sup>	0.44±0.01 <sup>abcd</sup>	0.23±0.01 <sup>abcd</sup>	0.41±0.05 <sup>cd</sup>	0.20±0.01 <sup>cd</sup>	0.16±0.05 <sup>abc</sup>
	雄	54.06±6.47 <sup>ab</sup>	1.11±0.02 <sup>cd</sup>	0.11±0.02 <sup>cd</sup>	0.44±0.01 <sup>ab</sup>	0.23±0.01 <sup>ab</sup>	0.42±0.02 <sup>abcd</sup>	0.20±0.01 <sup>abcd</sup>	0.14±0.02 <sup>cd</sup>
GW	雌	51.57±6.37 <sup>ab</sup>	1.12±0.02 <sup>bcd</sup>	0.12±0.02 <sup>bcd</sup>	0.43±0.02 <sup>bcd</sup>	0.23±0.01 <sup>bcd</sup>	0.42±0.02 <sup>ab</sup>	0.21±0.04 <sup>ab</sup>	0.14±0.02 <sup>abcd</sup>
	雄	53.82±5.22 <sup>ab</sup>	1.12±0.02 <sup>abc</sup>	0.12±0.02 <sup>abc</sup>	0.44±0.01 <sup>abcd</sup>	0.23±0.01 <sup>abcd</sup>	0.41±0.02 <sup>abcd</sup>	0.20±0.01 <sup>abcd</sup>	0.15±0.03 <sup>abcd</sup>
WG	雌	53.05±6.83 <sup>ab</sup>	1.12±0.02 <sup>abcd</sup>	0.12±0.02 <sup>abcd</sup>	0.43±0.02 <sup>bcd</sup>	0.23±0.01 <sup>bcd</sup>	0.43±0.02 <sup>a</sup>	0.20±0.01 <sup>a</sup>	0.14±0.02 <sup>abcd</sup>
	雄	54.62±5.38 <sup>ab</sup>	1.12±0.01 <sup>abcd</sup>	0.12±0.01 <sup>abcd</sup>	0.44±0.01 <sup>abc</sup>	0.24±0.01 <sup>abc</sup>	0.42±0.02 <sup>abc</sup>	0.19±0.01 <sup>abc</sup>	0.14±0.02 <sup>d</sup>
JW	雌	53.92±7.19 <sup>ab</sup>	1.11±0.02 <sup>bcd</sup>	0.11±0.02 <sup>bcd</sup>	0.44±0.01 <sup>abcd</sup>	0.23±0.01 <sup>abcd</sup>	0.42±0.02 <sup>abcd</sup>	0.19±0.01 <sup>abcd</sup>	0.15±0.02 <sup>abcd</sup>
	雄	56.17±6.36 <sup>ab</sup>	1.12±0.01 <sup>bcd</sup>	0.12±0.01 <sup>bcd</sup>	0.44±0.01 <sup>abcd</sup>	0.23±0.01 <sup>abcd</sup>	0.40±0.05 <sup>d</sup>	0.19±0.01 <sup>d</sup>	0.16±0.05 <sup>a</sup>
WJ	雌	56.04±7.18 <sup>ab</sup>	1.12±0.01 <sup>bcd</sup>	0.12±0.01 <sup>bcd</sup>	0.44±0.01 <sup>ab</sup>	0.24±0.01 <sup>ab</sup>	0.42±0.01 <sup>abcd</sup>	0.20±0.01 <sup>abcd</sup>	0.14±0.02 <sup>bcd</sup>
	雄	54.12±7.36 <sup>ab</sup>	1.13±0.04 <sup>ab</sup>	0.13±0.04 <sup>ab</sup>	0.44±0.02 <sup>a</sup>	0.24±0.01 <sup>a</sup>	0.41±0.02 <sup>cd</sup>	0.19±0.01 <sup>cd</sup>	0.15±0.04 <sup>abcd</sup>
GG	雌	52.16±8.04 <sup>ab</sup>	1.12±0.02 <sup>bcd</sup>	0.12±0.02 <sup>bcd</sup>	0.43±0.02 <sup>d</sup>	0.24±0.01 <sup>d</sup>	0.42±0.02 <sup>abcd</sup>	0.20±0.01 <sup>abcd</sup>	0.16±0.02 <sup>abcd</sup>
	雄	54.09±8.41 <sup>ab</sup>	1.12±0.01 <sup>abc</sup>	0.12±0.01 <sup>abc</sup>	0.43±0.01 <sup>cd</sup>	0.24±0.01 <sup>cd</sup>	0.41±0.01 <sup>cd</sup>	0.20±0.01 <sup>bcd</sup>	0.16±0.02 <sup>ab</sup>
JJ	雌	53.50±10.87 <sup>ab</sup>	1.11±0.03 <sup>c</sup>	0.11±0.03 <sup>cd</sup>	0.43±0.02 <sup>d</sup>	0.23±0.01 <sup>d</sup>	0.41±0.02 <sup>acd</sup>	0.19±0.01 <sup>abcd</sup>	0.16±0.03 <sup>ab</sup>
	雄	58.11±10.16 <sup>a</sup>	1.12±0.02 <sup>abc</sup>	0.12±0.02 <sup>abc</sup>	0.44±0.02 <sup>abc</sup>	0.24±0.01 <sup>abc</sup>	0.41±0.01 <sup>acd</sup>	0.19±0.01 <sup>abcd</sup>	0.15±0.02 <sup>abcd</sup>
WW	雌	55.48±10.90 <sup>ab</sup>	1.13±0.02 <sup>a</sup>	0.13±0.02 <sup>a</sup>	0.43±0.02 <sup>cd</sup>	0.23±0.01 <sup>cd</sup>	0.42±0.02 <sup>a</sup>	0.19±0.01 <sup>ab</sup>	0.15±0.02 <sup>abcd</sup>
	雄	56.46±9.79 <sup>ab</sup>	1.13±0.01 <sup>a</sup>	0.13±0.02 <sup>a</sup>	0.43±0.02 <sup>abcd</sup>	0.23±0.01 <sup>abcd</sup>	0.42±0.02 <sup>ac</sup>	0.19±0.01 <sup>abc</sup>	0.14±0.02 <sup>abcd</sup>
4月 April									
GJ	雌	59.34±9.31 <sup>i</sup>	1.13±0.02 <sup>a</sup>	0.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.44±0.01 <sup>bc</sup>	0.25±0.01 <sup>bc</sup>	0.39±0.02 <sup>a</sup>	0.21±0.01 <sup>a</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
	雄	60.98±9.18 <sup>j</sup>	1.12±0.01 <sup>b</sup>	0.12±0.01 <sup>ab</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.01 <sup>a</sup>	0.20±0.01 <sup>a</sup>	0.17±0.01 <sup>ab</sup>
JG	雌	66.67±10.07 <sup>gh</sup>	1.11±0.01 <sup>def</sup>	0.11±0.01 <sup>cd</sup>	0.44±0.02 <sup>abc</sup>	0.25±0.01 <sup>abc</sup>	0.39±0.02 <sup>ab</sup>	0.21±0.01 <sup>ab</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
	雄	66.67±8.75 <sup>gh</sup>	1.11±0.01 <sup>bcdef</sup>	0.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.39±0.01 <sup>abc</sup>	0.21±0.01 <sup>abc</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
GW	雌	65.33±9.18 <sup>ghi</sup>	1.11±0.01 <sup>bcdef</sup>	0.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.46±0.12 <sup>a</sup>	0.25±0.01 <sup>a</sup>	0.39±0.02 <sup>abcd</sup>	0.21±0.01 <sup>abcd</sup>	0.15±0.12 <sup>b</sup>
	雄	63.32±8.89 <sup>hig</sup>	1.12±0.01 <sup>b</sup>	0.12±0.01 <sup>a</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.01 <sup>abc</sup>	0.20±0.01 <sup>abc</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
WG	雌	68.53±8.55 <sup>efgh</sup>	1.11±0.01 <sup>bcdef</sup>	0.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.44±0.01 <sup>abc</sup>	0.25±0.01 <sup>abc</sup>	0.39±0.01 <sup>a</sup>	0.21±0.01 <sup>a</sup>	0.16±0.02 <sup>ab</sup>
	雄	68.78±9.34 <sup>defg</sup>	1.12±0.01 <sup>b</sup>	0.11±0.02 <sup>ab</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.01 <sup>abcd</sup>	0.21±0.01 <sup>abcd</sup>	0.17±0.01 <sup>ab</sup>
JW	雌	74.32±8.14 <sup>bcd</sup>	1.11±0.02 <sup>bcdef</sup>	0.11±0.03 <sup>abcde</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.25±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.02 <sup>cd</sup>	0.21±0.01 <sup>cd</sup>	0.17±0.03 <sup>ab</sup>
	雄	72.69±8.2 <sup>bcdef</sup>	1.12±0.01 <sup>b</sup>	0.11±0.04 <sup>ab</sup>	0.46±0.01 <sup>a</sup>	0.26±0.01 <sup>a</sup>	0.38±0.02 <sup>d</sup>	0.21±0.01 <sup>d</sup>	0.16±0.02 <sup>ab</sup>
WJ	雌	73.46±10.14 <sup>bcde</sup>	1.10±0.03 <sup>ef</sup>	0.11±0.05 <sup>abc</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.02 <sup>bcd</sup>	0.22±0.01 <sup>bcd</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
	雄	70.45±11.35 <sup>cdef</sup>	1.11±0.01 <sup>bcd</sup>	0.11±0.06 <sup>abc</sup>	0.46±0.01 <sup>ab</sup>	0.27±0.02 <sup>ab</sup>	0.38±0.01 <sup>abcd</sup>	0.21±0.01 <sup>abcd</sup>	0.16±0.02 <sup>ab</sup>
GG	雌	75.53±8.88 <sup>abc</sup>	1.11±0.01 <sup>bcdef</sup>	0.11±0.07 <sup>abcde</sup>	0.44±0.01 <sup>abc</sup>	0.25±0.01 <sup>abc</sup>	0.39±0.01 <sup>abcd</sup>	0.21±0.01 <sup>abcd</sup>	0.17±0.01 <sup>ab</sup>
	雄	74.35±9.39 <sup>bcd</sup>	1.11±0.01 <sup>bcde</sup>	0.11±0.08 <sup>abcd</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.01 <sup>abcd</sup>	0.21±0.01 <sup>abcd</sup>	0.17±0.01 <sup>ab</sup>
JJ	雌	63.47±12.9 <sup>hij</sup>	1.11±0.01 <sup>cdef</sup>	0.11±0.09 <sup>abcde</sup>	0.44±0.01 <sup>abc</sup>	0.25±0.01 <sup>abc</sup>	0.39±0.01 <sup>abc</sup>	0.21±0.01 <sup>abc</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
	雄	67.32±12.67 <sup>fgh</sup>	1.11±0.01 <sup>bcdef</sup>	0.11±0.10 <sup>abcd</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.37±0.01 <sup>abcd</sup>	0.21±0.01 <sup>abcd</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>

·续表3·

组合 Combination	性别 Gender	体长 $X_2$ /mm	全长/体长 $X_1/X_2$	额剑长/体长 $X_3/X_2$	头胸甲长/ 体长 $X_4/X_2$	头胸甲宽/ 体长 $X_5/X_2$	腹部长/体长 $X_6/X_2$	腹部宽/体长 $X_7/X_2$	尾节长/ 体长 $X_8/X_2$
WW	雌	80.3±8.49 <sup>a</sup>	1.10±0.03 <sup>f</sup>	0.11±0.11 <sup>abc</sup>	0.44±0.02 <sup>c</sup>	0.25±0.01 <sup>c</sup>	0.39±0.02 <sup>abcd</sup>	0.21±0.01 <sup>abcd</sup>	0.17±0.03 <sup>a</sup>
	雄	76.79±9.24 <sup>ab</sup>	1.11±0.01 <sup>abcd</sup>	0.11±0.12 <sup>abc</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.01 <sup>abcd</sup>	0.21±0.01 <sup>abcd</sup>	0.17±0.01 <sup>ab</sup>
5月 May									
GJ	雌	81.29±5.43 <sup>fghi</sup>	1.11±0.01 <sup>abde</sup>	0.11±0.01 <sup>abde</sup>	0.44±0.01 <sup>bc</sup>	0.25±0.01 <sup>bc</sup>	0.39±0.02 <sup>a</sup>	0.21±0.01 <sup>bcdef</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
	雄	79.96±3.89 <sup>hi</sup>	1.12±0.01 <sup>abc</sup>	0.12±0.01 <sup>abc</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.01 <sup>bc</sup>	0.20±0.01 <sup>f</sup>	0.17±0.01 <sup>ab</sup>
JG	雌	80.11±5.13 <sup>ghi</sup>	1.11±0.01 <sup>cde</sup>	0.11±0.01 <sup>cde</sup>	0.44±0.02 <sup>abc</sup>	0.25±0.01 <sup>abc</sup>	0.39±0.02 <sup>b</sup>	0.21±0.01 <sup>bcde</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
	雄	78.47±5.74 <sup>i</sup>	1.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.39±0.01 <sup>b</sup>	0.21±0.01 <sup>ef</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
GW	雌	78.70±5.69 <sup>i</sup>	1.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.46±0.12 <sup>a</sup>	0.25±0.01 <sup>a</sup>	0.39±0.02 <sup>b</sup>	0.21±0.01 <sup>cdef</sup>	0.15±0.12 <sup>b</sup>
	雄	80.21±3.88 <sup>ghi</sup>	1.12±0.01 <sup>a</sup>	0.12±0.01 <sup>a</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.01 <sup>c</sup>	0.20±0.01 <sup>g</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
WG	雌	83.64±6.92 <sup>defg</sup>	1.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.44±0.01 <sup>abc</sup>	0.25±0.01 <sup>abc</sup>	0.39±0.01 <sup>a</sup>	0.21±0.01 <sup>bc</sup>	0.16±0.02 <sup>ab</sup>
	雄	83.18±4.26 <sup>efgh</sup>	1.12±0.01 <sup>a</sup>	0.12±0.01 <sup>a</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.01 <sup>c</sup>	0.21±0.01 <sup>cdef</sup>	0.17±0.01 <sup>ab</sup>
JW	雌	85.38±6.40 <sup>cde</sup>	1.11±0.02 <sup>abcd</sup>	0.11±0.02 <sup>abcd</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.25±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.02 <sup>bc</sup>	0.21±0.01 <sup>ab</sup>	0.17±0.03 <sup>ab</sup>
	雄	84.53±4.29 <sup>def</sup>	1.12±0.01 <sup>a</sup>	0.12±0.01 <sup>a</sup>	0.46±0.01 <sup>a</sup>	0.26±0.01 <sup>a</sup>	0.38±0.02 <sup>d</sup>	0.21±0.01 <sup>bcd</sup>	0.16±0.02 <sup>ab</sup>
WJ	雌	84.66±5.84 <sup>def</sup>	1.10±0.03 <sup>c</sup>	0.10±0.03 <sup>c</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.02 <sup>c</sup>	0.22±0.01 <sup>a</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
	雄	83.68±5.09 <sup>defg</sup>	1.11±0.01 <sup>abcd</sup>	0.11±0.01 <sup>abcd</sup>	0.46±0.01 <sup>ab</sup>	0.27±0.02 <sup>ab</sup>	0.38±0.01 <sup>cd</sup>	0.21±0.01 <sup>bcde</sup>	0.16±0.02 <sup>ab</sup>
GG	雌	83.53±5.42 <sup>efgh</sup>	1.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.44±0.01 <sup>abc</sup>	0.25±0.01 <sup>abc</sup>	0.39±0.01 <sup>ab</sup>	0.21±0.01 <sup>b</sup>	0.17±0.01 <sup>ab</sup>
	雄	84.97±6.69 <sup>def</sup>	1.11±0.01 <sup>abcd</sup>	0.11±0.01 <sup>abcd</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.01 <sup>de</sup>	0.21±0.01 <sup>bcdef</sup>	0.17±0.01 <sup>ab</sup>
JJ	雌	87.3±9.9 <sup>bcd</sup>	1.11±0.01 <sup>bcde</sup>	0.11±0.01 <sup>bcde</sup>	0.44±0.01 <sup>abc</sup>	0.25±0.01 <sup>abc</sup>	0.39±0.01 <sup>ab</sup>	0.21±0.01 <sup>bcd</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
	雄	88.49±8.17 <sup>abc</sup>	1.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.11±0.01 <sup>abcde</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.37±0.01 <sup>de</sup>	0.21±0.01 <sup>bc</sup>	0.17±0.02 <sup>ab</sup>
WW	雌	91.31±8.43 <sup>a</sup>	1.10±0.03 <sup>c</sup>	0.10±0.03 <sup>c</sup>	0.44±0.02 <sup>c</sup>	0.25±0.01 <sup>c</sup>	0.39±0.02 <sup>bc</sup>	0.21±0.01 <sup>bcdef</sup>	0.17±0.03 <sup>a</sup>
	雄	88.94±7.99 <sup>ab</sup>	1.11±0.01 <sup>abc</sup>	0.11±0.01 <sup>abc</sup>	0.45±0.01 <sup>abc</sup>	0.26±0.01 <sup>abc</sup>	0.38±0.01 <sup>cd</sup>	0.21±0.01 <sup>def</sup>	0.17±0.01

注:同列数据间标相同字母表示差异不显著( $P>0.05$ ),不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Notes: In the same row, the same letter superscripts mean no significant difference ( $P>0.05$ ), while different small letter superscripts mean significant difference ( $P<0.05$ ).

腹部肌肉是克氏原螯虾最主要的可食部分,腹部长占体长比例是衡量出肉率的典型生长指标,故将9个组合克氏原螯虾不同月份腹部长占比进行分析。由表3可看出,3月各组合雌性个体腹部占比40.81%~42.47%,各组合未呈现显著性差异( $P>0.05$ );雄性个体腹部占比40.57%~42.01%,各组合未呈现显著性差异( $P>0.05$ );各组合内个体差异较大,但各组合雌雄间腹部占比无显著差异( $P>0.05$ )。

由表3可看出,4月各组合雌性个体腹部占比40.32%~41.54%,各组合未呈现显著性差异( $P>0.05$ );雄性个体腹部占比40.10%~41.44%,各组合未呈现显著性差异( $P>0.05$ );各组合内个体差异较大,雌雄间腹部占比无显著差异( $P>0.05$ )。

由表3可看出,5月各组合雌性个体腹部占比38.26%~39.28%,雄性个体腹部占比37.35%~38.65%,GJ、WG、GW、GG、JW、JJ、GG组合雌雄个体间有显著差异,均为雌性显著大于雄性( $P<$

0.05)。对比发现随着月份增加,各组合头胸甲占比逐渐增加,腹部长占比逐渐减小,且雄性个体头胸甲占比逐渐显著大于雌性个体,腹部长占比显著小于雌性个体。

### 2.3 耐干露能力比较

干露是克氏原螯虾在稻田综合种养模式下的常见环境胁迫因子,因此对9个群体进行了不同长时间的干露胁迫。发现除WG群体出现少量虾苗死亡外,其余群体在前12h存活率均为100%;在干露24h后9个群体均出现死亡现象,且GW群体最晚出现死亡现象;干露胁迫30h存活率最高的WJ群体为(70.56±7.52)%,最低的GJ群体为(53.33±5.00)%,干露胁迫36h后存活率均在60%以下,存活率最高的WW群体为(56.67±1.67)%,最低的GJ群体为(31.67±3.33)%;干露胁迫42h后存活率最高的WW群体为(48.33±6.67)%,显著大于其他群体( $P<0.05$ ),最低的GJ群体为(20.00±3.33)%(图2)。干露胁迫48h存活率大小排序为:WW>WJ>JW>

GW>WG=GG=GJ>JG>JJ,且WW群体存活率最高为(34.44±0.96)%,显著大于其他群体( $P<0.05$ ),JJ群体存活率最低为(3.33±1.67)%,显著小于其他群体( $P<0.05$ );在干露胁迫54 h和60 h下,均为WW群体存活率显著大于其余各群体( $P<$

0.05),且其余各群体间无显著差异;到干露胁迫72 h,9个群体存活率均为0。对各杂交组合克氏原螯虾耐干露48 h存活能力分析,发现GJ和JG两个组合呈现出平均杂种优势,均为42.88%,其余组合未见杂种优势。

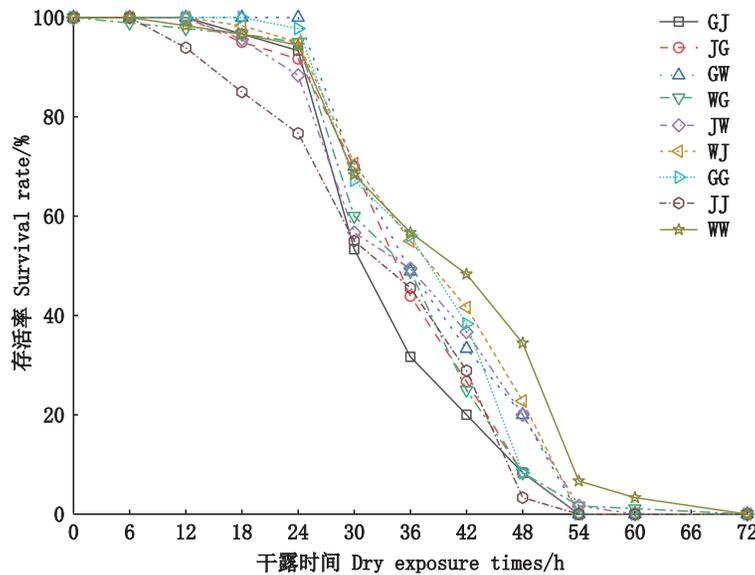


图2 9个组合克氏原螯虾不同干露胁迫时间的存活率

Fig. 2 Survival rate of 9 combinations of *P. clarkii* seedlings at different dry exposure times

表4 6个克氏原螯虾杂交组合干露48 h的平均杂种优势( $H_M$ )

Tab. 4 Mesophilic heterosis ( $H_M$ ) of 6 hybrid combinations of *P. clarkii* were exposed to dry for 48 hours %

杂交组合 Combinations	平均杂种优势 $H_M$
GJ	42.88
JG	42.88
GW	-6.48
WG	-61.05
JW	5.90
WJ	20.62
优势均值 Average advantage	7.46
优势组合率 Dominant combination rate	66.67
优势幅度 Margin of advantage	-61.05 ~ 42.88

### 3 讨论

#### 3.1 不同月份雌雄克氏原螯虾生长差异

甲壳类动物在生长过程中广泛存在性别差异,有研究发现青虾<sup>[16]</sup>和罗氏沼虾<sup>[17]</sup>在性成熟后雄性显著大于雌性,而中国明对虾<sup>[18]</sup>与斑节对虾<sup>[19]</sup>与此相反,在性成熟后,雌性显著大于雄性,

严维辉等<sup>[20]</sup>研究发现雌性克氏原螯虾生长速度略低于雄性,但差异不显著;本研究发现在养殖周期内各组合雄性个体增重率以及特定增长率均大于雌性,且养殖期结束时雄性个体体质量均大于雌性个体体质量,且在WW、JJ、GG、WJ、JW和GW组合雌雄个体间表现出显著性差异( $P<0.05$ ),说明商品规格克氏原螯虾雌雄个体体质量表现出显著差异,意味着开展克氏原螯虾单性养殖能够有效提高收益。

由于克氏原螯虾可食用部分基本集中于腹部,腹部长占比这一指标可一定程度上衡量个体的出肉率状况,因此,本研究也关注了腹部长占比。从腹部长占比看,随着月份增加,个体间差异逐渐减小,因此,在5月份对不同群体虾进行出肉状况评估更具科学性。但随着月份的增加腹部长占比逐渐减小,主要原因可能是克氏原螯虾5月末性腺逐渐发育,为满足繁殖的需求<sup>[2]</sup>,头胸甲占比逐渐增加,这一点由图2可以看出,这也意味着对于小龙虾加工产业来说,小龙虾上市后购买小龙虾原材料存在误区,根据本实验结果,可适当提前原材料采购时间,能有效减少成本,

同时提高原材料的利用率。在本实验中,5月份的商品虾雌性腹部占比均大于雄性,且JJ、GG和WG组合雌雄间有显著性差异( $P < 0.05$ ),这说明雌性个体出肉状况相对更好,可食用部分比例高,这与黄国威等<sup>[21]</sup>所研究的同等规格下雌虾可食用率高于雄虾的结果一致。

以色列学者已经实现罗氏沼虾全雄和全雌单性品系养殖,全雄或全雌养殖效益均大于雌雄混养。罗氏沼虾雄性个体比雌性生长快且体质量大,雄性虾苗3个月后可体现出绝对的生长优势,全雌罗氏沼虾养殖则具有更高的成活率和产量,且体型一致性更好<sup>[22]</sup>。在雌雄克氏原螯虾中也表现出性状二态性,雄性个体规格大、产量高,雌性个体出肉率高,故单性育种具有重要的育种潜力,根据市场需求开展单性养殖可显著提高经济效益。

### 3.2 不同群体克氏原螯虾杂交后代表现

克氏原螯虾自20世纪30年代末传入我国,目前已遍布我国大部分省份,主要在长江中下游地区进行养殖,现已成为我国重要养殖经济虾类<sup>[23]</sup>。已有较多研究表明克氏原螯虾存在种质退化现象,对贵州、广西、淮河流域、长江中下游等不同区域克氏原螯虾群体进行研究<sup>[24-28]</sup>,发现这些群体均呈现较高遗传多样性,但杂合子缺失现象普遍存在,近亲繁殖引起的遗传漂变是导致种质退化的重要因素。通过适当引种加强不同地区群体间的遗传交流,即杂交是防止种质退化的重要手段<sup>[27]</sup>,在罗氏沼虾<sup>[8]</sup>、斑节对虾<sup>[10]</sup>等已有相关报道。目前,关于克氏原螯虾不同群体之间的杂交未见报道,本研究率先开展了克氏原螯虾杂交试验,发现在生长性状方面克氏原螯虾各杂交组合均未呈现明显杂种优势,田焱<sup>[29]</sup>、林红军<sup>[30]</sup>等开展的中国对虾、凡纳滨对虾不同群体杂交后代也未见杂种优势,分析其主要原因可能有两点:一是本实验所选择的亲本即江苏溆湖、江苏建湖、安徽芜湖群体均为养殖群体,都不可避免有人为的引种、杂交干扰,导致其纯度降低,且这3个群体的亲缘关系较近<sup>[24]</sup>,群体的遗传背景直接影响杂种优势的大小;二是杂种优势的大小不仅取决于基因型,还与所处环境有密切联系,环境不具备或不完善,所具有的基因型就不能充分的表达,优势的潜能就不能实现<sup>[31]</sup>。本实验在露天土池中进行,虽尽可能保持各群体生长环境一

致,但受春季寒潮、昼夜温差等自然气候变化影响较大,也是影响杂种优势体现的重要因素。

此外,在克氏原螯虾抗逆能力方面已有不少研究,如温度<sup>[14]</sup>、盐度<sup>[32]</sup>、养殖密度<sup>[33]</sup>、饵料<sup>[34]</sup>、光照<sup>[35]</sup>、抗应激能力<sup>[36]</sup>及干露<sup>[37]</sup>等,其中干露是克氏原螯虾在稻田综合种养模式下的常见环境胁迫因子,已有研究表明处于离水干露状态的甲壳动物需持续经受失水和低氧的双重胁迫,干露不仅会扰乱甲壳动物的体内渗透压,削弱其代谢能力,而且还会降低其血液中血红蛋白与氧的结合能力造成低氧胁迫<sup>[38]</sup>,从而阻碍其呼吸机制并损害机体正常的免疫功能,最终导致其死亡。甲壳动物耐干露能力的强弱与其机体抗氧化酶系统的活性高低直接相关<sup>[39]</sup>,因此,耐干露能力是评价甲壳动物抗逆性的重要指标。本研究发现GJ和JG两个组合在耐干露能力方面呈现显著杂种优势,干露48 h存活率平均杂种优势( $H_M$ )为42.88%,这为下一步选择抗逆能力强的克氏原螯虾提供了理论基础和育种材料。

总体上,本研究的杂交组合在耐干露能力方面具有一定杂种优势,说明通过杂交提高群体遗传多样性,可提高群体抗逆能力,但在生长性状上表现出的优势不够明显,这也在一定程度上反映了当前我国克氏原螯虾主要养殖群体种质存在混杂现象,阻碍了杂种优势利用,因此,进行克氏原螯虾养殖群体优异种质提纯复壮和良种选育非常迫切。

### 参考文献:

- [1] FARRAG M M S, EL-GEDDAWY M A M A, AHMED Z S A. More evidences for the nutritional quality and future exploitation of the invasive crayfish *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) from the River Nile, Egypt [J]. The Egyptian Journal of Aquatic Research, 2022, 48(2): 151-156.
- [2] HE M D, LIU F, WANG F. Resource utilization, competition and cannibalism of the red swamp crayfish *Procambarus clarkii* in integrated rice-crayfish culture without artificial diets [J]. Aquaculture Reports, 2021, 20: 100644.
- [3] HENTTONEN P, HUNER J V. The introduction of alien species of crayfish in Europe: a historical introduction [M]// GHERARDI F. Crayfish in Europe as Alien Species. London: Routledge, 2017: 13-22.
- [4] 奚业文. 浅谈克氏原螯虾的开发价值 [J]. 北京水产, 2002(4): 8-9.

- XI Y W. Discussion on the development value of *Procambarus clarkii* [J]. Journal of Beijing Fisheries, 2002 (4): 8-9.
- [5] 宋亮, 张建平, 韩晓磊, 等. 克氏原螯虾养殖现状及对策 [J]. 常熟理工学院学报(自然科学), 2011, 25(2): 85-87, 91.
- SONG L, ZHANG J P, HAN X L, et al. Analysis of breeding situation and countermeasures of *Procambarus clarkii* [J]. Journal of Changshu Institute Technology (Natural Sciences), 2011, 25(2): 85-87, 91.
- [6] 楼允东. 我国鱼类近缘杂交研究及其在水产养殖上的应用 [J]. 水产学报, 2007, 31(4): 532-538.
- LOU Y D. Close hybridization of fish and its application in aquaculture [J]. Journal of Fisheries of China, 2007, 31(4): 532-538.
- [7] 吴杨平, 陈爱华, 张雨, 等. 红壳文蛤双列杂交及杂种优势分析 [J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(1): 43-49.
- WU Y P, CHEN A H, ZHANG Y, et al. Heterosis analysis and diallel cross of red *Meretrix meretrix* [J]. Oceans and Lakes, 2015, 46(1): 43-49.
- [8] 江宗冰, 戴习林, 明磊, 等. 罗氏沼虾生长性状的种内杂交优势及遗传力与遗传相关分析 [J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(2): 189-196.
- JIANG Z B, DAI X L, MING L, et al. Analysis of intraspecific heterosis, heritability and genetic correlation of growth traits of *Macrobrachium rosenbergii* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(2): 189-196.
- [9] 周劲松, 曹哲明, 杨国梁, 等. 罗氏沼虾缅甸引进种和浙江本地种及其杂交种的生长性能与SRAP分析 [J]. 中国水产科学, 2006, 13(4): 667-673.
- ZHOU J S, CAO Z M, YANG G L, et al. Study on hybrid of Burma introduced and Zhejiang locally-cultured populations of giant prawn *Macrobrachium rosenbergii* de man and SRAP marker [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(4): 667-673.
- [10] 周发林, 杨其彬, 姜松, 等. 斑节对虾3个种质群体体质量性状配合力及杂种优势分析 [J]. 南方水产科学, 2021, 17(1): 39-44.
- ZHOU F L, YANG Q B, JIANG S, et al. Analysis of combining ability and heterosis on body mass trait of three *Penaeus monodon* populations [J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(1): 39-44.
- [11] BARBARESI S, FANI R, GHERARDI F, et al. Genetic variability in European populations of an invasive American crayfish: preliminary results [J]. Biological Invasions, 2003, 5(3): 269-274.
- [12] BARBARESI S, GHERARDI F, MENGONI A, et al. Genetics and invasion biology in fresh waters: a pilot study of *Procambarus clarkii* in Europe [M]//GHERARDI F. Biological Invaders in Inland Waters: Profiles, Distribution, and Threats. Dordrecht: Springer, 2007: 381-400.
- [13] BARKI A, LEVI T, HULATA G, et al. Annual cycle of spawning and molting in the red-claw crayfish, *Cherax quadricarinatus*, under laboratory conditions [J]. Aquaculture, 1997, 157(3/4): 239-249.
- [14] 周泽湘, 范文浩, 方刘, 等. 温度对克氏原螯虾幼虾生长、摄食及消化酶活性的影响 [J]. 湖北农业科学, 2021, 60(20): 127-130.
- ZHOU Z X, FAN W H, FANG L, et al. Effects of temperature on the growth, feeding, and digestive enzyme activity of the juvenile red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. Hebei Agricultural Sciences, 2021, 60(20): 127-130.
- [15] 胡亚成. 微卫星标记应用于克氏原螯虾的半同胞家系分析和亲子鉴定 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- HU Y C. Analysis on half-sib families of *Procambarus clarkii* and the parentage assignment using microsatellite markers [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [16] 李慧萍. 青虾性别相关分子标记的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- LI H P. Studies on sex-related molecular markers of river prawn (*Macrobrachium nipponense*) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [17] 俞炎琴. 罗氏沼虾中性别发育相关基因 *Sxl* 和 *Dmrt* 基因的分子特征和功能研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- YU Y Q. The molecular characterization and functional analysis of sexual development related genes *Sxl* and *Dmrt* in the prawn, *Macrobrachium rosenbergii* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [18] 肖广侠, 宋文平, 郭彪, 等. 渤海湾中国明对虾的生长特性 [J]. 海洋渔业, 2014, 36(2): 116-122.
- XIAO G X, SONG W P, GUO B, et al. Growth characteristics of Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) in Bohai Bay [J]. Marine Fisheries, 2014, 36(2): 116-122.
- [19] 黄建华, 杨其彬, 马之明, 等. 池塘养殖斑节对虾生长、发育与性成熟 [J]. 水产学报, 2013, 37(3): 397-406.
- HUANG J H, YANG Q B, MA Z M, et al. The growth, development and sexual maturity of pond-reared *Penaeus monodon* [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(3): 397-406.
- [20] 严维辉, 黄成, 唐建清, 等. 克氏原螯虾雌雄分池对比养殖试验总结 [J]. 水产养殖, 2015, 36(2): 15-16.
- YAN W H, HUANG C, TANG J Q, et al. Summary of contrast culture experiment of *Procambarus clarkii* in male and female ponds [J]. Journal of Aquaculture, 2015, 36(2): 15-16.
- [21] 黄国威, 余敏, 周际松, 等. 不同规格及性别的克氏原螯虾各部位营养分析及评价 [J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(11): 33-42.
- HUANG G W, SHE M, ZHOU J S, et al. Nutritional

- analysis and evaluation of different parts of *Procambarus clarkia* with different size and gender [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 14(11): 33-42.
- [22] 罗金萍,刘培敏,高权新. 罗氏沼虾良种选育研究进展 [J]. *生物资源*, 2023, 45(1): 16-27.  
LUO J P, LIU P M, GAO Q X. Research progress in selective breeding of *Macrobrachium rosenbergii* [J]. *Biological Resources*, 2023, 45(1): 16-27.
- [23] 肖放,刘忠松,郭云峰,等. 中国小龙虾产业发展报告(2017)[J]. *中国水产*, 2017(7): 8-17.  
XIAO F, LIU Z S, GUO Y F, et al. China crayfish industry development report (2017)[J]. *China Fisheries*, 2017(7): 8-17.
- [24] 崔文涛,邹宇凡,白志毅,等. 安徽地区克氏原螯虾群体的遗传多样性和遗传结构[J]. *水产学报*, 2023, 47(9): 90-99.  
CUI W T, ZOU Y F, BAI Z Y, et al. Genetic diversity and structure analysis of *Procambarus clarkii* populations in Anhui Province [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(9): 90-99.
- [25] 邢智珺,姜虎成,陆伟,等. 江苏8个克氏原螯虾群体遗传多样性微卫星分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2014, 23(5): 656-662.  
XING Z J, JIANG H C, LU W, et al. Genetic diversity analysis of eight *Procambarus clarkii* stocks in Jiangsu Province based on microsatellites [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2014, 23(5): 656-662.
- [26] 安丹丹. 贵州克氏原螯虾养殖群体种质评价及利用研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.  
AN D D. Studies on germplasm evaluation and utilization of cultured populations of *Procambarus clarkii* in Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [27] 黄小芳,唐章生,刘俊丹,等. 广西不同地区克氏原螯虾群体遗传多样性微卫星分析[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(2): 437-444.  
HUANG X F, TANG Z S, LIU J D, et al. Genetic diversity microsatellite analysis of *Procambarus clarkii* populations in different regions of Guangxi [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(2): 437-444.
- [28] 谭云飞,蓬国辉,熊礼静,等. 长江中下游流域13个克氏原螯虾群体遗传多样性和遗传结构分析[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(2): 33-39.  
TAN Y F, PENG G H, XIONG L J, et al. Genetic diversity and structure analysis of 13 red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) populations in Yangtze River basin [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(2): 33-39.
- [29] 田懿,孔杰,杨翠华. 中国对虾2个群体杂交子一代生长和存活率比较[J]. *科学通报*, 2006, 51(15): 1771-1775.  
TIAN Y, KONG J, YANG C H. Comparison of the growth and survival rate of the first generation of hybrid offspring from two populations of Chinese shrimp [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006(15): 1771-1775.
- [30] 林红军,沈琪,张吕平,等. 凡纳滨对虾生长性状的双列杂交分析[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(6): 51-56.  
LIN H J, SHEN Q, ZHANG L P, et al. A diallel analysis on growth traits in shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(6): 51-56.
- [31] 张国范,刘晓,阙华勇,等. 贝类杂交及杂种优势理论和技术研究进展[J]. *海洋科学*, 2004, 28(7): 54-60.  
ZHANG G F, LIU X, QUE H Y, et al. The theory and application of hybridization and heterosis in marine mollusks [J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(7): 54-60.
- [32] 李庭古. 盐度对克氏原螯虾的存活、生长、代谢及受精卵孵化的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.  
LI T G. The effects of different salinity on survival and growth and Metabolism performance and embryonic development of *Protostellus clarkii* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [33] 范文浩,方刘,周锦,等. 养殖密度对克氏原螯虾生长及消化酶、免疫酶活性的影响[J]. *水产科学*, 2021, 40(2): 261-266.  
FAN W H, FANG L, ZHOU J, et al. Effects of stocking density on growth, digestive enzyme and immune enzyme activities of red swamp crayfish *Procambarus clarkii* [J]. *Fisheries Science*, 2021, 40(2): 261-266.
- [34] 杨文秀,陈效儒,文华,等. 高植物蛋白饲料中添加蛋白酶对克氏原螯虾生长、免疫力及消化力的影响[J]. *水产学报*, 2022, 46(6): 1053-1062.  
YANG W X, CHEN X R, WEN H, et al. Effects of dietary protease supplementation in high-plant-protein diets on the growth, immunity and digestion of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(6): 1053-1062.
- [35] 邓慧芳. 不同光照和饲料对克氏原螯虾生长、非特异性免疫酶及体成分的影响[D]. 荆州: 长江大学, 2018.  
DENG H F. Effects of different light and diet on growth, non-specific immune enzymes and body composition of the crayfish, *Procambarus clarkii* [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018.
- [36] 方卉. 克氏原螯虾对隐蔽所的选择及其对隐蔽所的生长适应性[D]. 南京: 南京大学, 2019.  
FANG H. Selection of shelter for crayfish (*Procambarus clarkii*) and the effect of shelter on crayfish [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [37] 王源源,成永旭,李晨露,等. 干露对克氏原螯虾成虾存活、相关代谢酶及组织结构的影响[J]. *南方水产科学*, 2021, 17(5): 34-44.  
WANG Y Y, CHENG Y X, LI C L, et al. Effects of desiccation on survival, metabolism-related enzymes and histological structure of adult red swamp crayfish

- (*Procambarus clarkii*) [J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(5): 34-44.
- [38] OMORI K, IRAWAN B, KIKUTANI Y. Studies on the salinity and desiccation tolerances of *Helice tridens* and *Helice japonica* (Decapoda: Grapsidae) [J]. Hydrobiologia, 1998, 386(1/3): 27-36.
- [39] 姜娜, 王芳, 路允良, 等. 干露对三疣梭子蟹抗氧化和应激能力的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(12): 1996-2004.
- JIANG N, WANG F, LU Y L, et al. Effects of air-exposure stress on antioxidant capacity and stress response of swimming crab (*Portunus trituberculatus*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(12): 1996-2004.

## Comparative analysis of growth performance and desiccation resistance of three-population diallel hybrid combination of *Procambarus clarkii*

ZOU Yufan<sup>1</sup>, WU Weijie<sup>1</sup>, BAI Zhiyi<sup>1,2</sup>, LI Dianzhong<sup>4</sup>, JIANG Jun<sup>3</sup>, CHENG Xi<sup>5</sup>, LI Jiale<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Freshwater Aquatic Genetic Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Collaborative Innovation Center for Cultivating Elite Breeds and Green-culture of Aquaculture Animals, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Anhui Fisheries Technology Extension Center, Hefei 230000, Anhui, China; 4. Wuhu Shengdian Leisure Ecological Park Co., Ltd., Wuhu 241212, Anhui, China; 5. Shanghai Jiading District Fisheries Technology Extension Center, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** This study conducted diallel hybridization experiments on three excellent populations of *Procambarus clarkii*, namely Gehu, Jiangsu; Jianhu, Jiangsu; and Wuhu, Anhui, with high genetic diversity and fast growth. Six hybrid groups were obtained [Gehu ♀ × Jianhu ♂ (GJ), Jianhu ♀ × Gehu ♂ (JG), Gehu ♀ × Wuhu ♂ (GW), Wuhu ♀ × Gehu ♂ (WG), Jianhu ♀ × Wuhu ♂ (JW), Wuhu ♀ × Jianhu ♂ (WJ)], and three self crossing groups [Gehu ♀ × Gehu ♂ (GG), Jianhu ♀ × Jianhu ♂ (JJ), Wuhu ♀ × Wuhu ♂ (WW)]. A comparative analysis was conducted on the growth performance and ecological adaptability of 9 combinations. The results showed that: (1) During the breeding cycle, the weight gain and weight gain rate of both male and female individuals in the WW and JJ combinations were significantly higher than those in the other combinations ( $P < 0.05$ ); Except for GJ and JG, the weight gain and growth rate of male individuals in all combinations were significantly higher than those in females. From March to May, no heterosis was observed in the growth traits of each hybrid group; (2) With the increase of breeding time, there were significant changes in the length/body length of the head and chest armor, as well as the length/body length of the abdomen in the 9 populations of crayfish. The length/body length of the head and chest armor gradually increased, while the length/body length of the abdomen gradually decreased. In May, there was differentiation between male and female individuals, and the proportion of female abdomen length was significantly higher than that of male. The ratio of head to chest armor width/body length, abdominal width/body length, and tail segment length/body length only showed a significant increase in April; (3) After 24 hours of dry dew, each group of shrimp began to die, and at 48 hours, the survival rate of each group showed significant differentiation. At 48 hours, the survival rate of the WW combination was significantly higher than that of the other combinations. The GJ and JG cross groups showed heterosis in terms of dry dew tolerance. This study found that the mixed germplasm of crayfish limited the heterosis of growth traits to a certain extent, but showed heterosis in stress resistance. Proper hybridization and re-selection are important breeding strategies. The growth and abdominal length ratio of crayfish showed obvious male and female dimorphism, and single sex breeding is also an important direction for future research.

**Key words:** *Procambarus clarkia*; interpopulation crossing; growth performance; desiccation resistance; hybridization dominance