

# 中韩刺参(*Apostichopus japonicus*)杂交子一代 高温与盐度耐受性比较\*

范超晶<sup>1,2</sup> 陈爱华<sup>3</sup> 谭杰<sup>1</sup> 王亮<sup>4</sup> 高菲<sup>1</sup>  
燕敬平<sup>1</sup> 左之良<sup>1,2</sup> 孙慧玲<sup>1①</sup>

(1. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071;  
2. 上海海洋大学生命科学与技术学院 上海 201306; 3. 乳山市水产技术推广站 乳山 264500;  
4. 烟台市水产研究所 烟台 264003)

**摘要** 刺参(*Apostichopus japonicus*)中国群体(C)和刺参韩国群体(K)进行完全的双列杂交, 得到 4 个交配组合 C(♀)×C(♂)、K(♀)×K(♂)、K(♀)×C(♂)和 C(♀)×K(♂)。各交配组合的子一代刺参在 16℃、盐度为 31 的海水中暂养 7 d, 然后转移到温度或盐度按以下 4 种方式改变的实验海水中: 1) 实验海水温度以 1℃/h 的速率上升; 2) 刺参被转移到梯度的高温海水(27℃、28℃、29℃、30℃和 31℃)中; 3) 实验海水的盐度以 2 psu/h 的速率上升或者下降; 4) 刺参被迅速转移到梯度的高盐度(36、38、40、42 和 44)或者低盐度(21、19、17、15、13 和 11)的海水中。统计单个实验中刺参的存活率。结果显示, 温度渐升时, C(♀)×C(♂)和 C(♀)×K(♂)组的最高存活温度(Survival temperature maximum, STMax)显著高于 K(♀)×K(♂)组, C(♀)×C(♂)和 C(♀)×K(♂)组刺参存活率为 50% 时的温度(50% critical temperature maximum, 50%CTMax)显著高于其他 2 组( $P<0.05$ )。温度突升时, 两杂交组的半数致死高温(Median lethal temperature, LT<sub>50</sub>)高于韩国自交组, 但低于中国自交组。单因素方差分析显示, 盐度渐升时, C(♀)×K(♂)组的半数致死高盐(50% critical salinity maximum, 50%CSMax)显著高于韩国自交组( $P<0.05$ )。盐度渐降时, K(♀)×C(♂)组的半数致死低盐(50% critical salinity minimum, 50%CSMin)显著低于 K(♀)×K(♂)组( $P<0.05$ )。盐度突降时, K(♀)×C(♂)组的耐受盐度下限(Lower salinity tolerance limit, LSTL)显著低于 K(♀)×K(♂)组( $P<0.05$ )。研究表明, 中韩杂交刺参在温度和盐度耐受性方面有一定的杂种优势, 意味着通过杂交育种, 刺参的抗逆性能得到有效改善。

**关键词** 刺参; 杂交; 高温耐受性; 盐度耐受性

**中图分类号** Q32; S966 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2016)02-0146-07

刺参属于棘皮动物门, 营养丰富且具有药用价值, 长期以来刺参的干制品在亚洲奢侈食品市场占据一席之地。21 世纪以来, 随着我国国民经济持续稳定发展和人们整体生活水平的提高, 刺参产业也在新世纪的前十年得以迅速发展, 成为北方沿海养殖业的支柱性产业。然而, 由于刺参养殖产业的过速发展和

不规范运作, 加之刺参累代自交, 导致刺参种质退化, 而相关的基础研究不足, 致使刺参养殖中病害频发, 严重阻碍了产业的可持续发展(黄华伟等, 2007)。因此, 通过遗传育种培育出抗逆性优良、生长迅速的良种刺参对产业的促进作用不言而喻。

温度和盐度是影响刺参生长发育、消化代谢和生

\* 国家高技术研究发展计划(2012AA10A412)、农业部北方海水增养殖重点实验室基金(2014-MSENC-KF-03)和山东省科技发展计划项目(2012GGA06021)共同资助。范超晶, E-mail: dcf323@163.com

① 通讯作者: 孙慧玲, 研究员, E-mail: sunhl@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2015-03-11, 收修改稿日期: 2015-04-07

理活动的重要因子。刺参的生长适温在 10–20℃ 之间, 并与刺参的生长阶段有关, 规格越大的刺参, 其适宜的生长温度相对越低(董云伟等, 2009)。而当水温高于 20℃ 时, 刺参将陆续进入夏眠(于东祥等, 2010)。夏眠时间的长短, 决定了刺参生长期的长短。夏季持续高温容易导致海水的温度上升, 当海水水温超过刺参的温度耐受极限时, 往往造成刺参的大规模死亡。刺参是狭盐性动物, 尤其对低盐的耐受性较弱。在夏季, 频发的暴雨往往造成海水盐度的骤降, 进而造成刺参的大量死亡。

杂交育种是一种简单有效的育种方式。杂交种通常在生长、存活和抗逆性等指标表现出超亲现象, 这种现象叫做杂种优势(楼允东, 1999)。杂交种的抗逆性优势意味着在不利的环境中杂交种的存活率更高。杂种优势已经在众多水产动物的杂交中得到证明, 包括鱼类(李炎璐等, 2014)、软体动物(Wang *et al.*, 2010; Anderson *et al.*, 2010; 杨璞等, 2009)、棘皮动物(Rahman *et al.*, 2000)等。目前, 刺参种群杂交已经在中国刺参与韩国红刺参(孙灵毅等, 2013)、中国刺参与日本刺参(孙秀俊等, 2012; 胡美燕等, 2009)、中国刺参与俄罗斯刺参(张黎黎等, 2013)之间取得了成功, 这说明了刺参不同地理种群杂交的可行性。杂交优势与群体间遗传距离有关, 遗传距离越远, 杂交优势越明显。中国刺参和韩国刺参分属不同的地理种群(Chang *et al.*, 2009), 谭杰等(2015)研究表明, 中国刺参与韩国刺参杂交子一代在生长和抗灿烂弧菌性状上都具有杂种优势, 然而, 有关中韩杂交刺参对高温和盐度的耐受性目前未见报道。

本研究以前期获得的中国刺参养殖群体及韩国刺参野生群体的自繁后代, 以及两群体的杂交子一代为材料, 比较中韩刺参及其杂交子一代的高温、盐度耐受性, 对杂交和自繁组合进行比较分析, 以期在育种生产中有所应用。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

韩国刺参捕捞自韩国江原道海域, 为野生群体, 记为 K。中国刺参取自山东安源水产股份有限公司, 为经过选育的多刺刺参, 记为 C。通过群体自繁和群体间杂交, 得到 4 个交配组合, 其中, 杂交组为 K(♀)×C(♂)(正交)和 C(♀)×K(♂)(反交), 自交组为 C(♀)×C(♂)和 K(♀)×K(♂)。在幼参阶段, 各组选取体重为(5.1±2.5) g、健康有活力的刺参用于实验。

### 1.2 方 法

所有刺参在温度为 16℃、盐度为 31 的海水中暂养 7 d, 然后转移到各实验水槽中。实验在盛有 50 L 海水的塑料水槽中进行, 每个水槽中有 20 个个体, 每个独立实验组设 3 个重复。高温耐受实验中, 用自动控制的加热棒升高和保持海水的温度。在盐度耐受实验中, 通过向自然海水中溶解定量的粗海盐来升高盐度, 通过在自然海水按比例加入蒸馏水来降低盐度。在暂养和实验期间, 所有的海水盐度的误差值不超过±0.2。在整个实验进程中, 每天 16:00 投喂相当于刺参体重 5%–10% 的配合饲料, 根据摄食情况进行适当调整, 次日清除刺参的排泄物和残余饲料, 每天换水 1 次, 单次换水量为总水体的 1/2, 新注入的水应预先调好温度和盐度。实验期间保持 24 h 通气。当将刺参从养殖箱壁剥落, 而其触手附着力消失导致无法重新附着, 则视其为死亡。所有的死亡个体应立即清除。

**1.2.1 温度渐升实验** 初始海水温度为 16℃, 随后温度以 1℃/h 的速率上升, 盐度保持不变, 间隔 1 h 观察刺参的存活率。记录刺参刚开始死亡时的温度, 为最高存活温度(Survival temperature maximum, STMax), 20 只刺参完全死亡时的温度为最高临界温度(Critical temperature maximum, CTMax), 并用 SPSS 软件计算刺参存活率为 50% 时的温度, 记为 50%CTMax。

**1.2.2 温度突升实验** 刺参从暂养条件下转移到一系列的限定的高温(27℃、28℃、29℃、30℃和 31℃)海水中, 保持盐度不变。72 h 后, 观察记录每个实验组中刺参的存活率。计算半数致死高温, 记为 LT<sub>50</sub> (Median lethal temperature)。

**1.2.3 盐度渐变实验** 初始海水盐度为 31, 随后盐度以 2 psu/h 的速率升高或者降低, 温度保持不变。每小时观察刺参的存活率。盐度逐渐降低时, 刺参刚开始死亡时的盐度, 即最低存活盐度(Survival salinity minimum, SSMin); 刺参全部死亡时的盐度, 即最低临界盐度(Critical salinity minimum, CSMin)。盐度逐渐升高时, 刺参刚开始死亡时的盐度, 即最高存活盐度(Survival salinity maximum, SSMax); 刺参完全死亡时的盐度, 即最高临界盐度(Critical salinity maximum, CSMax)。分别计算存活率为 50% 时的半数致死高盐 50%CSMax 和半数致死低盐 50%CSMin。

**1.2.4 盐度突变实验** 刺参被转移到一系列的梯度高盐(36、38、40、42 和 44)或低盐(21、19、17、15、13 和 11)海水中, 温度保持不变。72 h 后, 观察

记录每组实验刺参的存活率。计算耐受盐度上限(Upper salinity tolerance limit, USTL)以及耐受盐度下限(Lower salinity tolerance limit, LSTL) (Chen *et al.*, 2000)。

### 1.3 统计分析

本研究采用软件 SPSS 16.0 进行数据统计。所有的存活率数据经过逻辑斯蒂转换来建立直线回归方程, 所有半数致死温度  $LT_{50}$  数据通过直线回归方程来计算。为了比较不同组之间的差异性, 实验指标先进行单因素的方差分析(ANOVA), 然后进行 Tukey's 的多重比较。显著性水平为 95%( $P < 0.05$ )。

## 2 结果

### 2.1 温度渐升实验

随着实验海水温度的上升, 刺参觅食行为消失, 行动减少。温度超过 27–28℃ 甚至更高时, 刺参大量吐肠, 纷纷从养殖箱壁脱落, 逐渐化皮死亡。随着温度渐升, 4 组刺参的存活率变化见图 1。观察发现, 4 组刺参在水温升到 30℃ 时有死亡现象发生, 当水温上升至 35℃ 时, 刺参全部死亡。在逐渐升温过程中, 4 组刺参的存活率开始显现出差异性。在 33℃ 时,

C(♀)×K(♂)组刺参的存活率显著高于 K(♀)×K(♂)组刺参的存活率( $P < 0.05$ )。4 组刺参的最高存活温度 STMax、最高临界温度 CTMax 见表 1。4 组刺参的最高临界温度 CTMax 无显著差异。而中国自交组和反交组的最高存活温度 STMax 显著高于韩国自交组( $P < 0.05$ ), 说明在保证存活的前提下, 中国自交组和反交组的刺参能忍受更高的温度。存活率为 50% 时的温度 50%CTMax 见表 1, 中国自交组和反交组的 50%CTMax 显著高于正交组和韩国自交组( $P < 0.05$ )。

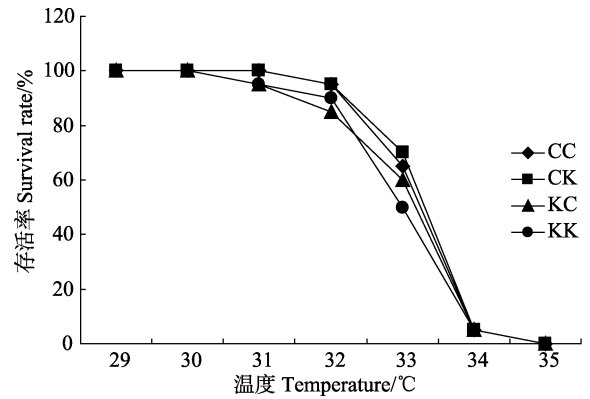


图 1 水温以 1℃/h 渐升时刺参的存活率

Fig.1 The survival rate of *A. japonicus* juveniles when the water temperature was raised at 1°C/h

表 1 温度渐升或突升时 4 组刺参的 CTMax、STMax、50%CTMax、 $LT_{50}$  及其 95% 置信区间

Tab.1 The CTMax, STMax, 50%CTMax,  $LT_{50}$  and their 95% confidence intervals of the four groups of *A. japonicus*

交配组合 Combination	CTMax (°C)	STMax (°C)	50%CTMax (°C)	$LT_{50}$ (°C)
C(♀)×C(♂)	34.73 (34.61, 34.85)	31.31 (30.84, 31.78) <sup>a</sup>	33.16 (32.83, 33.49) <sup>a</sup>	29.40 (29.22, 29.58)
C(♀)×K(♂)	34.80 (34.68, 34.92)	31.18 (30.71, 31.65) <sup>a</sup>	33.20 (32.87, 33.53) <sup>a</sup>	29.09 (28.91, 29.27)
K(♀)×C(♂)	34.87 (34.75, 34.99)	30.81 (30.34, 31.28) <sup>ab</sup>	32.60 (32.27, 32.93) <sup>b</sup>	29.12 (28.94, 29.30)
K(♀)×K(♂)	34.61 (34.49, 34.73)	30.25 (29.78, 30.72) <sup>b</sup>	32.61 (32.28, 32.94) <sup>b</sup>	28.98 (28.80, 29.16)

### 2.2 温度突升实验

温度迅速变化时刺参的存活率数值见图 2, 随着温度的升高, 刺参累积死亡率的变化呈上升趋势, 当温度达到 29℃ 时, 刺参的死亡个体陡增。中国自交组刺参半数致死高温  $LT_{50}$  最高(表 1), 但 4 组刺参无显著差异。

### 2.3 盐度渐变实验

实验海水盐度下降时, 刺参个体吸水鼓胀, 呈椭圆形, 体壁僵硬, 但触手吸附力增强。当盐度下降到 16–15 甚至更低时, 刺参个体的吸附力逐渐消失, 个体死亡。实验海水盐度上升时, 刺参个体脱水萎缩, 触手吸附力减弱, 机体柔软, 活力降低, 有少量吐肠现象发生, 死亡个体呈蜷缩状。

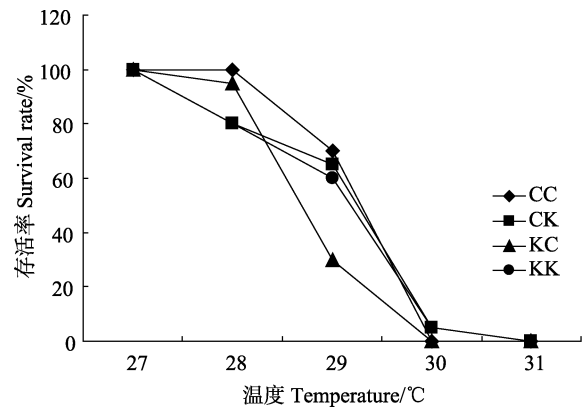


图 2 刺参被置入一系列高温(27℃、28℃、29℃、30℃和 31℃)的海水中 72 h 后的存活率

Fig.2 The survival rate of *A. japonicus* after transferred directly into a series of higher temperature seawater (27°C, 28°C, 29°C, 30°C, and 31°C) for 72 h

盐度渐变时, 刺参的存活率变化见图 3, 刺参在盐度为 22–40, 死亡率为 0, 超出此范围, 死亡率逐渐增加。刺参在盐度高于 44 或低于 14, 死亡率突增。由表 2 可知, 中国自交组和正交组的最低存活盐度 SSMin 以及最低临界盐度 CSMin 显著低于其他两组( $P < 0.05$ ), 但两组之间无显著性差异( $P > 0.05$ )。4 组刺参的最高存活盐度 SSMax、最高临界盐度 CSMax 无显著性差异( $P > 0.05$ )。反交组的半数致死高盐 50%CSMax 显著高于韩国自交组, 正交组的半数致死低盐 50%CSMin 显著低于韩国自交组(表 3)。

2.4 盐度突变实验

4 组刺参转入到一系列高盐度或低盐度的海水

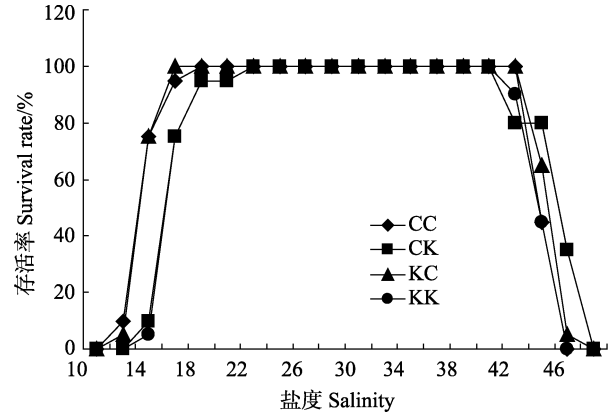


图 3 盐度以 2 psu/h 渐变时 4 组刺参的存活率

Fig.3 The survival rate of *A. japonicus* juveniles when the salinity was increased or decreased at 2 psu/h

表 2 盐度渐变时 4 组刺参的最低存活盐度 SSMin、最低临界盐度 CSMin、最高存活盐度 SSMax、最高临界盐度 CSMax 及其 95%置信区间

Tab.3 The SSMin, CSMin, SSMax, CSMax and their 95% confidence intervals of the four groups of sea cucumber when the salinity changed gradually

交配组合 Combination	SSMin	CSMin	SSMax	CSMax
C(♀)×C(♂)	17.52(16.43, 18.61) <sup>b</sup>	10.42(10.08, 10.76) <sup>b</sup>	40.64(40.5, 40.78)	47.31(47.04, 47.58)
C(♀)×K(♂)	19.43(18.34, 20.52) <sup>a</sup>	11.03(10.69, 11.37) <sup>a</sup>	40.56(40.42, 40.70)	47.89(47.62, 48.16)
K(♀)×C(♂)	17.47(16.38, 18.56) <sup>b</sup>	10.51(10.17, 10.85) <sup>b</sup>	40.78(40.64, 40.92)	47.49(47.22, 47.76)
K(♀)×K(♂)	19.40(18.31, 20.49) <sup>a</sup>	11.10(10.76, 11.44) <sup>a</sup>	40.45(40.31, 40.59)	47.24(46.97, 47.51)

表 3 盐度渐变时 4 组刺参的半数致死高盐 50%CSMax 和半数致死低盐 50%CSMin 及其 95%置信区间

Tab.3 The 50%CSMax, 50%CSMin and their 95% confidence intervals of the four groups of sea cucumber when the salinity changed gradually

交配组合 Combination	50%CSMax	50%CSMin
C(♀)×C(♂)	43.87(43.34, 44.40) <sup>ab</sup>	13.38(12.19, 14.57) <sup>ab</sup>
C(♀)×K(♂)	44.79(44.26, 45.32) <sup>a</sup>	15.41(14.22, 16.60) <sup>ab</sup>
K(♀)×C(♂)	44.47(43.94, 45.00) <sup>ab</sup>	13.35(12.16, 14.54) <sup>b</sup>
K(♀)×K(♂)	43.60(43.07, 44.13) <sup>b</sup>	15.53(14.34, 16.72) <sup>a</sup>

中, 72 h 后各盐度海水中刺参的存活率见图 4。在实验条件范围内, 盐度突变的情况下, 刺参的存活率为 100% 的盐度范围为 22–36。4 组刺参的耐受盐度上限 USTL 无显著性差异( $P > 0.05$ ), 而 K(♀)×C(♂)的耐受盐度下限 LSTL 最低(表 4), 显著低于韩国自交组( $P < 0.05$ ), 说明其对低盐的耐受性更强。

3 讨论

杂交育种是改善水产养殖品种对恶劣环境抗逆性的有效手段。杨章武等(2012)研究凡纳滨对虾

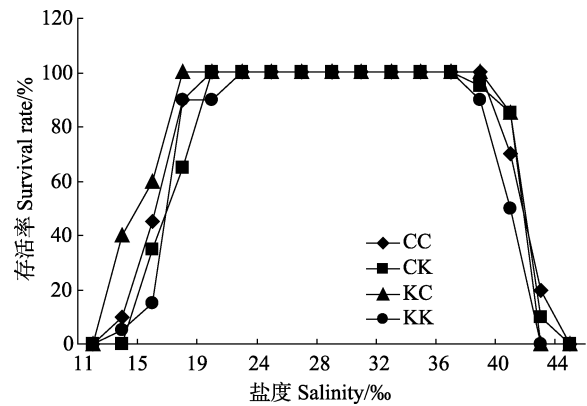


图 4 盐度突变时刺参的存活率

Fig.4 The survival rate of *A. japonicus* after transferred directly in to a series of high salinity (36, 38, 40, 42, and 44) or low salinity(21, 19, 17, 15, 13, and 11) for 72 h

(*Litopenaeus vannamei*)群体自交与杂交子代幼体对低温、低盐抗逆性时发现, 杂交组的抗逆性要高于自交组, 在低温、低盐度的实验条件下, 杂交组的存活率高于自交组。赵虎等(2013)研究表明, 在相同的盐度下, 相比于大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)初孵仔鱼, 大黄鱼和鲩鱼(*Müchthys müüu*)杂交 F<sub>1</sub> 初孵仔鱼表现出更好的存活能力, 杂种优势明显。这与本研究的结

表4 盐度突变时4组刺参的耐受盐度上限 USTL、耐受盐度下限 LSTL 及其 95%置信区间

Tab.4 The USTL, LSTL and their 95% confidence intervals of the four groups of *A. japonicus* when the salinity changed abruptly

交配组合 Combination	USTL	LSTL
C(♀)×C(♂)	43.82 (43.69, 43.95)	19.84 (19.10, 20.58) <sup>ab</sup>
C(♀)×K(♂)	43.54 (43.41, 43.67)	20.20 (19.46, 20.94) <sup>ab</sup>
K(♀)×C(♂)	43.59 (43.46, 43.72)	18.70 (17.96, 19.44) <sup>b</sup>
K(♀)×K(♂)	43.54 (43.41, 43.67)	20.37 (19.63, 21.11) <sup>a</sup>

果类似,正反杂交组刺参的高温和盐度耐受性表现要好于韩国野生群体,说明中韩刺参杂交子一代在抗逆性方面相比较韩国野生群体表现出杂交优势。本研究中,两杂交组对高温和盐度的耐受性相比较于中国刺参养殖群体并没有表现出杂交优势或杂交优势不明显。刘小林等(2005)在进行栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)不同种群杂交育种时指出,野生群体亲本使养殖群体亲本经济性状改进不明显,因此难以得到预期的杂种优势。李素红等(2007)也发现,以中国对虾韩国群体养殖家系和乳山野生群体为亲本进行杂交导致子代杂种优势减弱或消失。虽然以野生群体为亲本产生的后代在某些性状上的优势不明显,但仍有一定的利用价值,可以丰富选育群体的遗传多样性,以此为基础进行选育,可以提供更多的优良性状。

本研究中,4组刺参的平均50%CTMax 高于LT<sub>50</sub>,50%CSMax 高于USTL,而50%CSMin 低于LSTL,说明相比于温度或盐度渐变,刺参在温度或盐度突变的情况下的耐受能力较弱。杨淞等(2009)研究孔雀鱼和月光鱼的温度耐受性时发现,逐步降温下,孔雀鱼和月光鱼的致死低温明显低于突然降温下的致死低温。Hu 等(2010)用盐度渐变和盐度突变两种方法来研究暂养温度和盐度对刺参盐度耐受性影响时发现,在盐度突变时,刺参的耐受性范围较窄。代悦等(2009)发现,光裸星虫在外界盐度渐变时,对盐度变化的耐受能力较强,在外界盐度突变时,死亡率明显上升。之所以出现这类现象,究其原因,在环境因子渐变的水体中,水生动物可能会产生暂时的较高的耐受性。

抗逆性增强是驯化的主要结果,后天选择积累的、有利的变异是驯化的重要机制(Jensen, 2014)。无论是从温度渐变或者温度突变测出的指标来看,中国刺参养殖群体对温度的耐受性要强于韩国野生刺参。这可能是因为中国刺参养殖群体经过长期的人工饲养驯化的结果。Thanh 等(2010)在进行罗氏沼虾

(*Macrobrachium rosenbergii*)的双列杂交实验时发现,在驯化期间,饲养的罗氏沼虾的遗传特征发生改变,从而在生长中有更好的表现,实验说明驯化是导致耐受性增加的一个重要原因。此外,本研究中的中国刺参养殖群体是经过选育的多刺刺参。在中国刺参市场上,人们倾向于选择具有更多刺数的刺参,因此,多刺刺参比普通刺参具有更高的价格。本研究的结果表明,刺参的刺数性状可能与其对高温的耐受性状呈正相关。贝类的壳色是一个对生产、育种有重要意义的可遗传性状,其不仅与贝类的生态和行为有关,还与其他表型性状具有相关性(吴杨平等, 2012)。研究表明,黄色福寿螺(*Pomacea canaliculata*)的平均表型性状数值显著大于黑色福寿螺( $P<0.05$ ),说明福寿螺的壳色与其他的表型性状遗传具有相关性(吴帆等, 2013)。在贝类选择育种工作中,通过壳色选育,已育成“中科红”(许飞等, 2008)、“南科红”(何毛贤, 2006)等新品种。相比较抗逆性状,刺参的刺数更易测量,因此,刺参的刺数可以作为育种的有效选育目标。

本研究中,正反交组合的耐受性表现不尽相同,C(♀)×K(♂)组刺参更耐高温,而K(♀)×C(♂)组更耐低盐。水生动物正反交的不同表现已见于诸多报道。凡纳滨对虾群体正交的低温、低盐耐受性较强,生长速度最快,而反交的生长表现甚至低于自交组(杨章武等, 2012)。太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)正反交种群的产量有着巨大的差异(Hedgecock, 2007)。本研究中,C(♀)×K(♂)组刺参和K(♀)×C(♂)组刺参在极端环境因子中的不同表现,也验证了杂交优势的不对称性和性状遗传的复杂性。C(♀)×K(♂)组刺参对高温的耐受性优于K(♀)×C(♂)组和韩国自交组,这可能与母性效应有关(高保全等, 2008)。K(♀)×C(♂)组在低盐耐受性上更具有优势,然而其母本韩国野生刺参对低盐的耐受性较差,其父本中国养殖刺参对低盐具有更高的耐受性。刺参杂交种对低盐的耐受性更偏向与父本。通常情况下,杂交子代在性状表现上更偏向于母本(Solemdal, 1997),杂交子代在某些性状上表现出偏向父本的现象在鱼类中也有报道(Butts *et al.*, 2007),这可能与动物的发育时期及研究的性状有关(Chambers *et al.*, 1992)。在生产中,通常采用杂交育种和选择育种相结合的方式来进行良种工作。通过选择育种使亲本更为纯合,是获得较高杂种优势的基础。因此,可以在本研究中的C(♀)×K(♂)组刺参和K(♀)×C(♂)组刺参的基础上,进行选择育种,分别选育出耐高温和耐低盐的品系,然后进行杂交,有望获得兼有耐高温和耐低盐性状的杂种。

## 参 考 文 献

- 于东祥, 孙慧玲, 陈四清, 等. 海参健康养殖技术. 第 2 版. 北京: 海洋出版社, 2010, 130
- 代悦, 王庆恒, 陈桂依, 等. 光裸星虫对盐度和温度的耐受性研究. 水产科学, 2009, 28(10): 563-566
- 刘小林, 常亚青, 相建海, 等. 栉孔扇贝不同种群杂交效果的研究: II. 中国种群和俄罗斯种群及其杂交  $F_1$  中期生长发育. 海洋学报(中文版), 2005, 27(2): 135-140
- 许飞, 郑怀平, 张海滨, 等. 海湾扇贝“中科红”品种与普通养殖群体不同温度下早期性状的比较. 水产学报, 2008, 32(6): 876-883
- 孙秀俊, 李琪, 孔令锋, 等. 中国刺参(♂)×日本红刺参(♀)杂交子代的胚胎、幼体发育及幼参生长性状的研究. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(4): 26-32
- 孙灵毅, 赵强, 任利华, 等. 中国刺参与韩国红刺参杂交及子代发育特性的研究. 大连海洋大学学报. 2013, 28(3): 281-286
- 李炎璐, 陈超, 王清印. 云纹石斑鱼(♀)×七带石斑鱼(♂)杂交  $F_1$  形态特征与其亲本子代的比较分析. 渔业科学进展, 2014, 35(5): 104-108
- 李素红, 张天时, 孟宪红, 等. 中国对虾杂交优势对自然感染白斑综合征病毒的抗病力分析. 水产学报, 2007, 31(1): 68-75
- 杨章武, 郑雅友, 李正良, 等. 凡纳滨对虾群体自交与杂交子代幼体对低温、低盐抗逆性与生长比较. 水产学报, 2012, 36(2): 284-289
- 杨淞, 韦其锋, 严太明, 等. 孔雀鱼、月光鱼耐温限度的初步研究. 四川农业大学学报, 2009, 27(1): 106-110
- 杨璞, 杨爱国, 单伟华, 等. 栉孔扇贝(♀)×虾夷扇贝(♂)杂交子代胚后发育过程中遗传构成变化研究. 渔业科学进展, 2009, 30(2): 66-70
- 吴帆, 赵鑫, 李海云, 等. 福寿螺表型性状的相关性及 2 种壳色福寿螺表型性状的差异性分析. 华南农业大学学报, 2013, 34(2): 254-257
- 吴杨平, 姚国兴, 陈爱华, 等. 红壳色文蛤选育子代各壳色的形态分化及养殖效果的比较. 台湾海峡, 2012, 31(3): 412-419
- 何毛贤. 马氏珠母贝红壳品系“南科珍珠红”的培育. 热带海洋学报, 2006, 25(2): 58
- 张黎黎, 曹学彬, 李君华, 等. 俄罗斯仿刺参与中国仿刺参杂交  $F_1$  幼参的早期生长比较. 水产科学, 2013, 32(2): 68-72
- 赵虎, 崔国强, 吕为群. 大黄鱼(♀)×鲢鱼  $K(\delta)$  杂交  $F_2$  和大黄鱼初孵仔鱼盐度适应性的比较研究. 上海海洋大学学报, 2013, 22(4): 538-544
- 胡美燕, 李琪, 孔令锋, 等. 中国刺参与日本红刺参杂交子一代的早期生长比较. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(9): 375-380
- 高保全, 刘萍, 李健, 等. 三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)不同地理种群内自繁和种群间杂交子一代生长性状的比较. 海洋与湖沼, 2008, 39(3): 291-296
- 黄华伟, 王印庚. 海参养殖的现状、存在问题与前景展望. 中国水产, 2007(10): 50-53
- 董云伟, 董双林. 刺参对温度适应的生理生态学研究进展. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(5): 908-912
- 楼允东. 鱼类育种学. 北京: 中国农业出版社, 1999, 40
- 谭杰, 高菲, 王亮, 等. 中国刺参(*Apostichopus japonicus*)与韩国刺参杂交子一代生长和抗病力比较. 渔业科学进展, 2015, 36(4): 109-115
- Anderson D, Hedgecock D. Inbreeding depression and growth heterosis in larvae of the purple sea urchin *Strongylocentrotus purpuratus* (Stimpson). J Exp Mar Biol Ecol, 2010, 384(1-2): 68-75
- Butts IAE, Litvak MK. Stock and parental effects on embryonic and early larval development of winter flounder *Pseudopleuronectes americanus* (Walbaum). J Fish Biol, 2007, 70(4): 1070-1087
- Chambers RC, Leggett WC. Possible causes and consequences of variation in age and size at metamorphosis in flatfishes (Pleuronectiformes): an analysis at the individual, population, and species level. Netherlands J Sea Res, 1992, 29(1-3), 7-24
- Chang YQ, Feng ZG, Yu JP, et al. Genetic variability analysis in five populations of the sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) from China, Russia, South Korea and Japan as revealed by microsatellite markers. Mar Biol, 2009, 30(4): 455-461
- Chen JC, Chen WH. Salinity tolerance of *Haliotis diversicolor supertexta* at different salinity and temperature levels. Aquaculture, 2000, 181(1-2): 191-203
- Hedgecock D, Davis JP. Heterosis for yield and crossbreeding of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*. Aquaculture, 2007, 272(1): 17-29
- Hu MY, Li Q, Li L. Effect of salinity and temperature on salinity tolerance of the sea cucumber *Apostichopus japonicus*. Fish Sci, 2010, 76(2): 267-273
- Jensen P. Behavior genetics and the domestication of animals. Annu Rev Anim Biosci, 2014(2): 85-104
- Rahman MA, Uehara T, Aslan LM. Comparative viability and growth of hybrids between two sympatric species of sea urchin Genus *Echinometra* in Okinawa. Aquaculture, 2000, 183(1-2): 45-56
- Solemdal P. Maternal effects: A link between the past and the future. J Sea Res, 1997, 37(3): 213-227.
- Thanh NM, Nguyen NH, Ponzoni RW, et al. Estimates of strain additive and non-additive genetic effects for growth traits in a diallel cross of three strains of giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) in Vietnam. Aquaculture, 2010, 299(1-4): 30-36
- Wang CD, Li ZX. Improvement in production traits by mass spawning type crossbreeding in bay scallops. Aquaculture, 2010, 299(1-4): 51-56

## A Comparative Study on High Temperature and Salinity Tolerance of Hybrids Between Chinese and Korean Populations of Sea Cucumber *Apostichopus japonicus*

FAN Chaojing<sup>1,2</sup>, CHEN Aihua<sup>3</sup>, TAN Jie<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>4</sup>, GAO Fei<sup>1</sup>,  
YAN Jingping<sup>1</sup>, ZUO Zhiliang<sup>1,2</sup>, SUN Huiling<sup>1</sup>①

(1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 3. Rushan Aquatic Technology Promotion Department, Rushan 264500;

4. Yantai Fishery Research Institute, Yantai 264003)

**Abstract** The sea cucumber *Apostichopus japonicus* is one of the most important aquaculture species in China. In recent years the sustainable development of sea cucumber culture has been hindered in China due to issues such as the depletion of natural resources, the genetic degradation, and frequent outbreaks of diseases. Hybridization has been an effective solution to these issues and improving the breeding in aquaculture. Therefore in this study we investigated the temperature and salinity tolerance in the inbred and hybrid offspring of Chinese and Korean sea cucumber populations. Four hybridized combinations were created with complete dual cross, including C(♀)×C(♂), K(♀)×K(♂), K(♀)×C(♂), and C(♀)×K(♂). Four groups of sea cucumber were acclimated at 16°C and 31 psu for 7 days. The temperature tolerance was estimated in two ways: transferring the subjects directly into high-temperature seawater (27°C, 28°C, 29°C, 30°C, and 31°C) or raising the temperature gradually at 1°C/h. In the salinity tolerance trials, the salinity of acclimated seawater was increased or decreased at 2 psu/h to determine the SSMin (survival salinity minimum), CSMIn (critical salinity minimum), SSMax (survival salinity maximum), and CSMax (critical salinity maximum), respectively. The sea cucumbers were also transferred directly into a series of high salinity (36, 38, 40, 42 and 44 psu) and low salinity (21, 19, 17, 15, 13, and 11 psu) to measure the USTL (upper salinity tolerance limit), and LSTL (lower salinity tolerance limit) respectively. It was found that when the seawater temperature increased gradually, the STMax (survival temperature maximum) of C(♀)×K(♂) and C(♀)×C(♂) group were significantly higher than K(♀)×K(♂) group, the 50%CTMax (50% critical temperature maximum) of C(♀)×K(♂) and C(♀)×C(♂) group were significantly higher than other two groups ( $P<0.05$ ). When the seawater temperature increased abruptly, the LT<sub>50</sub> (median lethal temperature) of both hybrid groups were higher than that of the Korean population, but lower than that of the Chinese population. One-way analysis of variance showed that when the seawater salinity increased gradually, the 50%CSMax (50% critical salinity maximum) of C(♀)×K(♂) group was significantly higher than K(♀)×K(♂) group ( $P<0.05$ ); the 50% CSMIn (50% critical salinity minimum) of K(♀)×C(♂) group was significantly lower than K(♀)×K(♂) group ( $P<0.05$ ). When the seawater salinity decreased abruptly, the LSTL (lower salinity tolerance limit) of K(♀)×C(♂) group was significantly lower than K(♀)×K(♂) group ( $P<0.05$ ). These results suggested that the intra-species hybrids might have moderate heterosis in heat and salinity tolerance. Therefore crossbreeding may effectively improve the stress resistance of *A. japonicus*.

**Key words** *Apostichopus japonicus*; Hybrid; Heat tolerance; Salinity tolerance

① Corresponding author: SUN Huiling, E-mail: sunhl@ysfri.ac.cn