

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2011.01321

虹鳟杂交胚胎($2n_{\text{♀}} \times 3n_{\text{♂}}$)的发育状况及其 DNA 倍性分析

王炳谦¹, 范兆廷², 卢国¹, 杨翟平², 谷伟¹

1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 黑龙江 哈尔滨 150070;
2. 东北农业大学水产养殖系, 黑龙江 哈尔滨 150030

摘要: 雄性三倍体虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)可以发育至生理成熟并表现出较强的雄性副性征, 性腺发育基本正常; 雌性三倍体虹鳟性腺几乎不发育, 并且存在着类雄性化的发育趋势。本研究拟通过对虹鳟杂交胚胎($2n_{\text{♀}} \times 3n_{\text{♂}}$)发育状况及其 DNA 倍性的分析, 进而确认三倍体虹鳟是否具有与二倍体虹鳟类似的生育能力并分析其原因。选取经两个世代家系选育的虹鳟优良品系二倍体雌性虹鳟作为母本, 以热休克方法人工诱导的优质雄性三倍体虹鳟为父本, 常规人工采集精卵受精, 获得三倍体雄性与二倍体雌性杂交胚胎, 观察杂交胚胎的发育进程, 通过流式细胞仪检测杂交胚胎的 DNA 含量, 进而与二倍体雌雄交配获得的胚胎对照确定杂交胚胎的倍性。结果表明, 杂交胚胎的受精率、发眼率和孵化率均显著地低于对照组, 杂交胚胎多数在发眼期之前死亡, 破膜的胚胎在仔鱼期上浮前全部死亡。杂交胚胎的 DNA 含量分布范围较大, 大致可以分为两个水平, 接近 84%的胚胎的 DNA 含量介于二倍体与三倍体之间, 约为对照组 DNA 含量的 2.5 倍; 约有 16%的胚胎的 DNA 含量在三倍体和四倍体之间。本研究认为, 染色体非整倍体化可能会引起杂交胚胎细胞核质不相容, 进而导致基因表达调控紊乱, 从而使杂交胚胎不能正常发育, 无法完成由母体卵黄供给的内源营养向外源营养的转换, 成为导致杂交胚胎发育过程中大量死亡, 以及杂交仔鱼在破膜之后开始进食之前全部死亡的一个重要原因。

关键词: 虹鳟; 非整倍体; 杂交胚胎; 发育; DNA 倍性

中图分类号: S961

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2011)06-1321-06

染色体组操作(genomic manipulation)是鱼类遗传育种工作的重点研究领域之一^[1]。对于虹鳟等鲑科鱼类, 通过染色体组工程生产三倍体苗种进行商业化养殖还可以解决养殖群体种质生产性能退化、普通二倍体商品鱼繁殖期死亡率高等长期困扰虹鳟养殖业的问题。同时, 该方法也延长了养殖周期, 有利于获得较大规格的商品鱼, 可以显著地提高养殖效益^[2-3]。研究者在长期的虹鳟三倍体育种实践中发现了一种现象, 即雄性三倍体虹鳟并不是像先前预想的性腺发育停滞。相反, 雄性三倍体虹鳟可以发育至生理成熟并表现出较强的雄性副性征, 性腺发育基本正常^[4-5]。成熟个体可以生产出形态正常或略带颜色的精液, 其

精子形态、活力和寿命等与二倍体产生的精子差异较小^[6-7]。与此同时, 一些关于雌性三倍体虹鳟性腺发育的研究结果表明, 雌性三倍体虹鳟性腺几乎不发育, 并且存在着类雄性化的发育趋势, 这与三倍体雄性的性腺发育存在着相当显著的差异^[8-9]。上述现象使得国内外研究者对雄性三倍体虹鳟是否具有与二倍体虹鳟类似的生育能力产生了浓厚的兴趣。

本研究选取雌性二倍体虹鳟作为母本, 以热休克方法人工诱导的雄性三倍体虹鳟为父本, 常规人工采集精卵受精, 确认三倍体雄性虹鳟精子的受精能力, 进一步观察杂交胚胎的发育, 然后采集破膜期的仔鱼测量其单个细胞的 DNA 含量,

收稿日期: 2011-01-20; 修订日期: 2011-03-30.

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003055)资助; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(201110)资助; 农业部淡水水产生物技术与遗传育种重点实验室专项(2011NYBSJ-02)资助.

作者简介: 王炳谦(1963 -), 研究员, 主要从事冷水性鱼类养殖和遗传育种研究. E-mail: wbqfish@yahoo.com.cn

以期研究虹鳟三倍体雄性与二倍体雌性杂交胚胎的发育情况及其染色体倍性,进而确认三倍体虹鳟是否具有与二倍体虹鳟类似的生育能力并分析其原因。

1 材料与方 法

1.1 实验动物

二倍体虹鳟由中国水产科学研究院黑龙江水产研究所虹鳟优良品系选育课题组经两个世代家系选育获得的优质健康虹鳟苗种,在黑龙江水产研究所渤海冷水性鱼类试验站按照亲鱼饲养管理养殖至性成熟,各阶段均饲以智利 SalmonFood 公司 VitaCare 优质全价配合饲料。选用商业养殖美国道氏虹鳟优质健康亲鱼(雌鱼体质量 2.0~2.5 kg,雄鱼体质量 1.5~2.0 kg)作为亲本,常规人工采集精卵授精,由热休克方法诱导产生三倍体虹鳟^[10],雄性三倍体虹鳟按照与前述二倍体亲鱼采用相同饲养管理方式养殖至性成熟。

1.2 人工授精孵化及胚胎发育状况分析

正式开始杂交实验之前,对实验组和对照组虹鳟亲鱼,包括三倍体雄性亲鱼 3 尾,与配二倍体雌性亲鱼 3 尾,对照组二倍体雌雄亲鱼各 3 尾,均采集其外周血红细胞,通过流式细胞仪进行染色体 DNA 含量鉴定,以确认其倍性^[11]。图 1-A 与图 1-B 是流式细胞仪检测二倍体和三倍体亲鱼红细胞相对 DNA 含量图(X 轴代表峰值; Y 轴代表细胞数目)。图上结果显示二倍体虹鳟相对 DNA 含量为 50AU(arbitrary unit,任意单位),三倍体相对 DNA 含量为 75AU,为二倍体的 1.5 倍,与理论值一致。

杂交实验于 2009 年 12 月虹鳟的产孵繁殖季节进行,人工采集三倍体雄性虹鳟精液与二倍体雌性虹鳟卵子授精,3 组重复;另取二倍体虹鳟雌雄交配作为对照,亦为 3 组重复。授精后的实验组鱼卵按全同胞家系分别独立入孵化器,对照组混精混卵也入同类孵化器,孵化温度在 4~7℃之间,采用涌泉水避光流水孵化。所有受精卵在授精 100℃·h 后计算受精率,发育积温达 200℃·d 时计算发眼率,破膜时统计死亡率计算孵化率^[12]。

1.3 亲鱼血细胞的分离固定与胚胎单细胞悬液制备

在二倍体、三倍体虹鳟亲鱼尾静脉采血,肝素钠抗凝,将分离出的红细胞固定于 PBS-乙醇悬浊液中,用 PBS 清洗并悬浮细胞,调节细胞浓度至每毫升含 106 个红细胞,4℃保存备用^[13]。实验组三倍体雄性亲鱼 3 尾,与配二倍体雌性亲鱼 3 尾;对照组二倍体雌雄亲鱼各 3 尾均制备外周血红细胞悬液。

在胚胎破膜后,3 个杂交家系各随机选取 30 个全同胞胚胎,对照组随机选取 10 个胚胎,用预冷 70%乙醇(-20℃)进行固定,采用杨翟平等^[13]的方法制备胚胎单细胞悬液。加入 50 μg/mL PI 染液直接染色,在 4℃冰箱内避光染色 30 min,以 1 000 r/min 离心 2 min,洗去 PI 染液,漂洗 2 次,然后加入 1 mL PBS,获得胚胎单细胞悬液备用^[13]。

1.4 亲鱼及杂种胚胎染色体倍性分析

利用 BD-FACSAria 型流式细胞仪,在检测波长 488 nm 条件下将实验组三倍体雄性亲鱼 3 尾,与配二倍体雌性亲鱼 3 尾;对照组二倍体雌雄亲鱼各 3 尾的外周血红细胞悬液上机检测,应用 modfit LT 软件分析血细胞中 DNA 含量进行亲鱼染色体组倍性确认。在 3 个杂交家系中各随机选取 30 个全同胞胚胎并在对照组中随机选取 10 个胚胎,共计 100 枚胚胎制备的胚胎单细胞悬液上机检测,应用 modfit LT 软件分析胚胎细胞中 DNA 含量,进行杂种胚胎染色体组倍性分析。

1.5 数据统计分析

本研究中所有数据均采用 JMP 7.0 通过 t 检验进行差异显著性分析^[14]。

2 结果与分析

2.1 胚胎发育状况分析

各实验组和对照组的受精率、发眼率和孵化率结果示于表 1。实验组杂交胚胎的受精率、发眼率和孵化率显著地低于对照组的正常胚胎。孵化至破膜时,三倍体雄性与二倍体雌性杂交胚胎大部分死亡,破膜后存活胚胎陆续死亡,无一度过仔鱼期上浮。

2.3 杂种胚胎染色体倍性分析

3 个杂交全同胞家系各 30 个杂交胚胎与对照组 10 个胚胎的 DNA 含量检测结果显示, 对照组胚胎 DNA 含量与其亲本红血球 DNA 含量一致, 均为二倍体(图 1 - 图 2)。杂交胚胎 DNA 含量分布范围较大, 可以分为两个水平, 接近 84% 的胚胎 DNA 含量在二倍体和三倍体之间, 约为对照组 DNA 含量的 2.5 倍(图 3A); 有 16% 的胚胎 DNA 含量在三倍体和四倍体之间(图 3B)。3 个杂交全同胞家系各 30 个杂交胚胎与对照组 10 个胚胎, 共计 100 个胚胎染色体组倍性分析结果数据示于表 2。

3 讨论

3.1 虹鳟杂交胚胎(2n♀×3n♂)受精率低的原因分析

虹鳟三倍体雄性育性的相关问题早已引起养殖者与科研工作者的关注。成熟三倍体雄性虹鳟

可以生产出形态正常或略带颜色的精液, 其精子形态、活力和寿命等与二倍体产生的精子差异较小^[6-7]。然而, 与对照组二倍体相比, 3n 雄性与 2n 雌性的杂种胚胎的受精率明显降低, 这说明三倍体产生的精子对二倍体授精有一定的障碍, 其原因则相当的复杂, 有可能是二者的基因组大小不同导致的精卵结合, 或者类似于四倍体雄鱼精子入二倍体卵时受精孔狭小导致的受精障碍^[15]; 还有可能是三倍体雄性的精子存在遗传缺陷导致的授精能力低下使得杂种的受精率显著降低。

另外, 由于虹鳟起源于同源四倍体祖先, 经过长期进化, 现存虹鳟基因组已趋向于功能二倍体化^[16]。还有学者认为, 二倍体虹鳟在某种程度上具有四倍性(偶数性染色体组)的特征, 其三倍体则具有六倍体的特征, 所以三倍体雄性能够完成减数分裂形成有活性的精子, 且其能够与同种

表 1 杂交组与对照组胚胎的受精率、发眼率和孵化率的比较

Tab. 1 Comparison of fertilization rate, eyed rate and hatched rate between hybrid embryos and control

项目 item	受精率/% fertilization rate	发眼率/% eyed rate	孵化率/% hatched rate
对照组 control	95.1 ^a	85.7 ^a	78.2 ^a
杂交胚胎全同胞家系均值 full-sib family average of hybrid embryos	62.8 65.4 66.7	27.6 28.9 29.4	1.23 1.58 1.52
杂种胚胎均值 average of hybrid embryos	64.97 ± 1.99 ^b	28.63 ± 0.93 ^b	1.44 ± 0.19 ^b

注: 同一列无相同字母者表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different superscript in a column means differ significantly ($P < 0.05$).

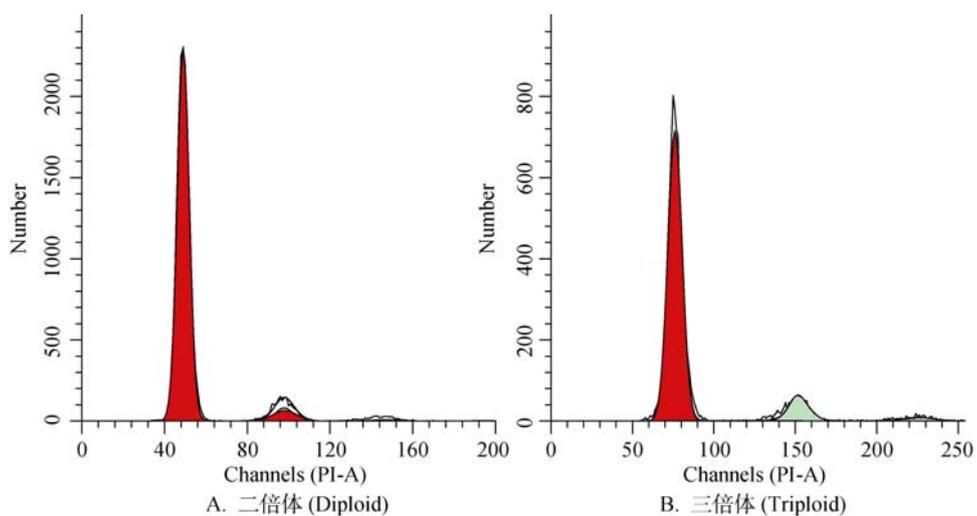


图 1 亲本红细胞的 DNA 含量

Fig. 1 DNA content in red blood corpuscle in parents rainbow trout

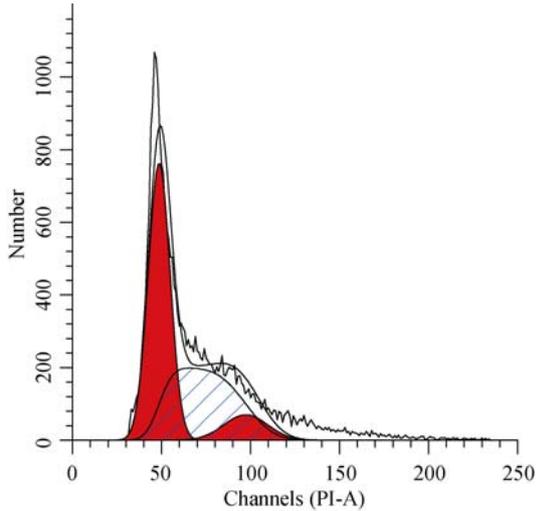


图 2 对照组二倍体胚胎的 DNA 含量

Fig. 2 DNA content of the control diploid embryos in rainbow trout

正常的二倍体卵子完成受精过程, 启动胚胎发育^[9]。但是, 虹鳟功能二倍化的发生已有相当长的时间, 长期的进化过程使得同源染色体之间产生分化, 人工诱导三倍体虹鳟在第 3 套染色体中可能存在前两套染色体的同源片段, 推测因第 3 套染色体存在导致非同源染色体间发生了复杂的联会, 产生部分同源染色体的配对障碍, 形成了非整倍体配子^[17]。这可能是导致三倍体雄性与二倍体雌性杂交受精率低一个重要原因。

3.2 虹鳟杂交胚胎(2n♀×3n♂)破膜前陆续死亡的原因分析

3n 雄性虹鳟与 2n 雌性杂交胚胎发育至仔鱼破膜后即全部死亡的遗传机理是困扰研究者的一个棘手问题。3n 雄性与 2n 雌性杂交胚胎发育过程中持续大量死亡的原因可能很复杂, 最简单的假设是进入卵子的精子并没有真正的与卵子结合, 仅起到诱导胚胎雌核发育的作用, 导致单倍体胚胎的形成, 故而在发育过程中死亡。但是, 本研究在染色体倍性分析结果中, 并没有在杂种胚胎中检测到单倍体, 因此很大程度上可以排除这种假设。

同时, 鲑科鱼类哲罗鲑父本与细鳞鱼母本杂交, 鲤科鱼类鲤鲫杂交、兴国红鲤×草鱼、草鱼×三角鲂等远缘杂交的杂种胚胎均出现过与本研究类似的仔鱼在破膜后全部死亡的现象^[18-21]。其他研究结果也表明, 鱼类种、属间远缘杂交中母本的卵细胞质可以调控杂种胚胎基因的表达^[22], 杂种胚胎的基因表达调控可能会因核质不相容发生紊乱, 从而导致使种胚胎不能正常发育。以上结果提示, 虹鳟杂交胚胎(2n♀×3n♂)也有可能是因核质不相容引起基因表达调控紊乱, 无法完成由母体卵黄供给的内源营养向外源营养的转换, 从而导致仔鱼在破膜后开始进食之前全部死亡。

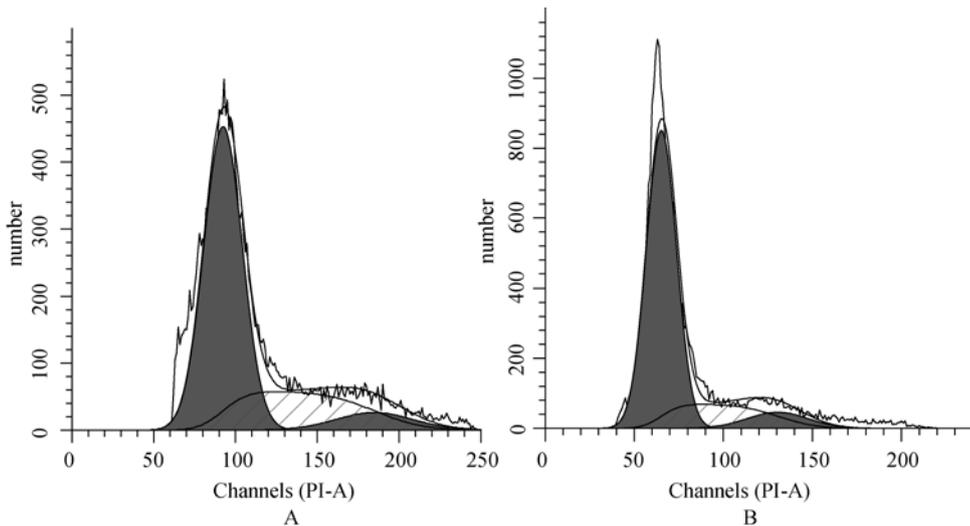


图 3 三倍体雄性与二倍体雌性杂交胚胎的 DNA 含量

Fig. 3 DNA content of the embryos between diploid female and triploid male in rainbow trout

表 2 三倍体雄性与二倍体雌性杂交胚胎的 DNA 含量分布
Tab. 2 Distribution of DNA content of the embryos between diploid female and triploid male in rainbow trout

胚胎类型 embryo type	DNA 含量/AU DNA content	样品数 sample size
杂交胚胎 hybrid embryos	59 - 65	26
杂交胚胎 hybrid embryos	60 - 65	22
杂交胚胎 hybrid embryos	60 - 66	28
杂交胚胎 hybrid embryos	83 - 90	4
杂交胚胎 hybrid embryos	87 - 92	8
杂交胚胎 hybrid embryos	85 - 92	2
对照组 control	48 - 51	10

3.3 虹鳟杂交胚胎($2n_{\text{♀}} \times 3n_{\text{♂}}$)染色体组的倍性分析

在正常减数分裂的情况下, 虹鳟 $3n$ 雄性与 $2n$ 雌性杂交胚胎应获得父本与母本各一套染色体组, 即杂交胚胎 DNA 含量应在二倍体和三倍体之间, 约为二倍体 DNA 含量的 2.5 倍。虹鳟二倍体染色体组是 $2n=60$ ^[23], 则杂交胚胎染色体数对应为 75。韩英等^[7]通过扫描电镜观察发现, 三倍体虹鳟精子头部体积上有大、中、小 3 种类型, 根据精子头部体积推测其染色体组分别为 n 型、 $1.5n$ 型和 $2n$ 型。事实上, 经细胞流式仪测定, 三倍体虹鳟精子 DNA 含量总体上分布于 n 与 $2n$ 之间^[4]; Ueda 等^[24]对三倍体雄性虹鳟与二倍体雌性杂交胚胎进行了核型分析, 结果显示杂交胚胎大多具有 72~79 个染色体。如果 $3n$ 雄性虹鳟部分精母细胞与 $2n$ 一样进行染色体配对、均匀分离, 则形成 $1.5n$ 型的精子。精母细胞染色体发生不均等分裂则可形成 n 型和 $2n$ 型精子, 若发生联会紊乱, 则可能产生非整倍性的精子。 $1.5n$ 型、 $2n$ 型与 n 型卵子杂交都会导致杂种胚胎的染色体组非整倍性, 这样两种精子受精后的胚胎必然有两种表现, 前者是 $1.5n$ 的精子, 所得杂种的倍性应该是 $2.5n$, 这与本研究结果杂交胚胎细胞 DNA 含量约等于对照组 2.5 倍(图 3B)基本一致; 后者是 $2n$ 的精子, 所得杂交后代理论上应为 $3n$, 对应的 DNA 含量

约为 75AU, 但本研究中多数杂交胚胎的 DNA 含量高于 $3n$, 也从侧面支持受精成功的精子可能是非整倍体, 由此导致受精卵存活率低下, 这还意味着 $2n$ 雌鱼产生卵子的受精孔有可能允许体积较大的 $2n$ 型精子进入。

此外, 本研究通过对分属于 3 个全同胞家系的 90 个杂种胚胎的细胞染色体倍性分析, 并没有发现存在 DNA 含量为 $2n$ 型的杂交胚胎。这一方面说明 $3n$ 虹鳟不会产生 n 型精子, 另一方面也支持染色体非整倍体化可能是导致杂交胚胎大量死亡的一个重要原因。

综上所述, 本研究结果表明虹鳟杂交胚胎($2n_{\text{♀}} \times 3n_{\text{♂}}$)的受精率、发眼率和孵化率均显著地低于正常二倍体胚胎, 杂交胚胎多数在发眼期之前死亡, 破膜的胚胎在仔鱼期上浮前全部死亡。三倍体雄性虹鳟不具备正常的生育能力。研究非整倍体鱼类生育能力的遗传学机理对理解鱼类性别分化与性选择的演化机制具有特别重要意义。本研究的结果对于理解 $3n$ 雄性虹鳟育性的细胞遗传学机制具有重要的理论和现实意义, 同时也对其他非整倍体鱼类的育性研究具有积极的借鉴意义。

参考文献:

- [1] Tiwary B K, Kirubakaran R, Ray A K. The biology of triploid fish[J]. Rev Fish Biol Fisher, 2004, 14: 391-402.
- [2] Krisfalusi M, Cloud J G. Gonadal sex reversal in triploid rainbow trout(*Oncorhynchus mykiss*)[J]. J Exp Zool Part A: Comparative Experimental Biology, 1999, 284(4): 466-472.
- [3] 孙大江, 王炳谦. 鲑科鱼类及其养殖状况[J]. 水产学杂志, 2010, 23(2): 56-63.
- [4] Benfey T, Solar I, de Jong G, Donaldson E. Flow-kilometric confirmation of aneuploid in sperm from triploid rainbow trout[J]. Trans Am Fish Soc, 1986, 115: 838-840.
- [5] Deng Glenn Y, Chen Li-Qia, Wang Xue-Ming, et al. Sex reversal and gonadal development of triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Acta Zoologica Sinica, 2001, 47(1): 71-78.
- [6] Lincoln R F, Scott A P. Sexual maturation in triploid rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson[J]. J Fish Biol, 1984, 5: 385-392.
- [7] 韩英, 刘蔓, 张澜澜, 等. 三倍体雄性虹鳟(*Oncorhynchus*

- mykiss*)生殖发育研究[J].东北农业大学学报, 2010, 41(7): 94–99.
- [8] Krisfalusi M, Wheeler P A, Thorgaard G H, et al. Gonadal morphology of female diploid gynogenetic and triploid rainbow trout [J]. J Exp Zool, 2000, 286: 505–512.
- [9] 韩英, 刘蔓, 张澜澜, 等. 三倍体雌性虹鳟卵巢发育的类雄性化趋势[J]. 中国水产科学, 2010, 17(4): 739–744.
- [10] 王炳谦, 徐连伟, 贾忠贺, 等. 热休克诱导全雌虹鳟三倍体[J]. 水产学杂志, 2005, 18(2): 22–27.
- [11] 韩英, 张澜澜, 王琨, 等. 虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)多倍体的倍性鉴定[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(2): 222–227.
- [12] 范兆廷, 姜作发, 韩英. 冷水性鱼类养殖学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 75–93.
- [13] 杨翟平, 刘奕, 龚丽, 等. 虹鳟胚胎组织单细胞悬液制备方法的研究[J]. 水产学杂志, 2010, 23(3): 40–43.
- [14] Cary N C. SAS Institute Inc. JMP User's Guide [M]. 2006.
- [15] Chourrout D, Chevassus B, Krieg F, et al. Production of second generation triploid and tetraploid rainbow trout by mating tetraploid males and diploid females-potential of tetraploid fish[J]. Theor Appl Genet, 1986, 72: 193–206.
- [16] Ohno S. The enormous diversity in genome sizes of fish as a reflection of nature's extensive[J]. Trans Am Fish Soc, 1970, 99: 120–130.
- [17] Oliveira C, Foresti F, Rigolino M G, et al. Synaptonemal complex formation in spermatocytes of the autotriploid rainbow trout, (Pisces, Salmonidae) [J]. Hereditas, 1995, 123: 215–220.
- [18] 徐革锋, 尹家胜, 刘洋, 等. 哲罗鲑与细鳞鲑属间远缘杂交的初步研究[J]. 中国水产科学, 2009, 16(6): 959–966.
- [19] 闵乃. 鲫鲤杂交种的培育[J]. 生物学通报, 1959(9): 395–399.
- [20] 刘思阳. 草鱼卵子和三角鲂精子杂交的受精细胞学研究[J]. 水产学报, 1987, 11(3): 225–232.
- [21] 刘国安, 吴维新, 林临安, 等. 兴国红鲤同草鱼杂交的受精细胞学研究[J]. 水产学报, 1987, 11(1): 17–21.
- [22] 楼允东, 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.
- [23] 薛淑群, 尹洪滨. 虹鳟染色体 C 显带技术的初步研究[J]. 水产学杂志, 2009, 22(2): 17–19.
- [24] Ueda T, Sawada M, Kobayashi J. Cytogenetical characteristics of the embryos between diploid female and triploid male in rainbow trout[J]. Jpn J Genet, 1987, 62: 461–465.

Developmental observation of hybrid embryos ($2n_{\text{♀}} \times 3n_{\text{♂}}$) and analysis of DNA ploidy in *Oncorhynchus mykiss*

WANG Bingqian¹, FAN Zhaoting², HU Guo¹, YANG Zhaiping², GU Wei¹

1. Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China;

2. Department of Aquaculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

Abstract: Male triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) can develop to physiology maturity and exhibit strong secondary sex characters. Conversely, the gonads of female triploid rainbow trout are typically underdeveloped and are characterized by a masculinization-like phenomenon. We evaluated the effect of chromosome polyploidy on the reproductive potential of triploid male rainbow trout. We obtained hybrid embryos by artificially inseminating diploid female trout with sperm from triploid male rainbow trout. The diploid females were obtained from a superior strain of two generation family selective breeding. The male triploid was obtained by artificially inducing triploidy using heat shock. We monitored the development of the hybrid embryos and measured their DNA content (ploidy) using flow cytometry. The fertility, eyed rate, and hatching rate of hybrid embryos were significantly lower than the control diploid embryos ($P < 0.05$). The embryos and fry died during early development or within a short time after hatching. There was considerable variation in the DNA content of the hybrid embryos. The ploidy of most (84%) hybrid embryos ranged from $2n$ to $3n$ and their DNA content was ~ 2.5 times that of the control embryos. The ploidy of the remaining 16% ranged from $3n$ to $4n$. Our results suggest that aneuploidy of hybrid embryos may result in incompatibility of the karyoplasm between the gametes of male triploid and female diploid rainbow trout. We hypothesize that the hybrid embryos do not survive because of disorders of gene expression and regulation.

Key words: *Oncorhynchus mykiss*; aneuploid; hybrid embryo; development; DNA ploidy