

DOI: 10.12264/JFSC2021-0232

不同捕捞策略对海水青鲈不同发育阶段生长的影响

苏程程^{1,3}, 单秀娟^{1,2}, 邵长伟^{1,2}

1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东长岛海洋生态系统国家野外观测研究站, 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 山东 青岛 266071;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071
3. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306

摘要:以海洋模式物种—海水青鲈(*Oryzias melastigma*)为研究对象, 设置了 90%大个体捕捞(H-B)、90%随机捕捞(H-R)、75%大个体捕捞(M-B)、75%随机捕捞(M-R)、50%大个体捕捞(L-B)、50%随机捕捞(L-R)、75%小个体捕捞(M-S) 7 种捕捞策略处理组, 用以研究海水青鲈的生长特征在不同捕捞策略、不同世代(F_1 、 F_2 和 F_3)之间的差异。结果表明, 同代际不同捕捞策略条件下, 海水青鲈卵径和仔鱼全长呈极显著性差异($P<0.01$); 不同代际间, 高强度捕捞处理组(90%捕捞策略) 卵径增大, 低强度捕捞处理组(50%捕捞策略)卵径变小, 但不同世代对下一代鱼卵的孵化率和存活率影响较小。不同代际间, 低强度捕捞处理组在幼鱼时期增长率高于其余处理组; 同代际间仔鱼发育阶段, 高强度捕捞处理组生长迅速, 前期增长率明显高于后期, 其在仔幼鱼阶段其增长率低。随着外界捕捞压力的增加, 同代际间高强度捕捞处理组瞬时增长率最低; 低强度大个体捕捞策略组瞬时增长率在代际间较稳定。与现阶段捕捞策略相同, 高强度大个体捕捞会导致鱼类生物学性状在 3 代中产生极大差异。因此本研究通过模拟不同捕捞策略探讨鱼类发生的生物学性状变化, 旨在为预测鱼类进化趋势的深入研究提供依据。

关键词: 海水青鲈; 捕捞策略; 生长; 渔业资源

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)12-1576-12

捕捞所引起的大小选择是一种不可控的或无意识的人工选择, 为了适应不断增加的捕捞压力和各种不同的捕捞策略, 鱼类在生长、繁殖、行为、食物转化效率、性别比例, 甚至脊椎骨的数目, 都发生了显著变化^[1-3]。鱼类种群短时间发生适应性变化, 这个过程称为捕捞诱导的适应性进化(fisheries-induced evolution, FIE)^[4]。近些年关于渔业捕捞策略对鱼类资源影响的研究主要集中在生物学和生态学特征及模型评估等方面。生物学和生态学特征的研究主要是不同捕捞策略生态学实验^[1,5-6]以及生态遗传模型^[7-8]。通过对大西洋银

汉鱼(*Menidia menidia*)进行 4 个世代大个体捕捞实验, 体重和生长率降低, 总生物量显著降低, 鱼类为了适应不断增加的捕捞压力, 增加种群繁殖力, 减少了在生长方面的能量投入^[9]。小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)、日本鲷(*Scomber japonicus*)、带鱼(*Trichiurus japonicus*)等经济鱼类, 捕捞压力引起了其性成熟年龄提前、卵径减小、相对繁殖力增加等适应性进化^[10-11]。目前, 随着对 FIE 的深入研究, 研究层次逐步由表型可塑性向其影响机制方向发展, 研究普遍认为捕捞可能引起鱼类适应性进化^[12]。Jakobsdóttir 等^[13]和 Ther-

收稿日期: 2021-05-21; 修订日期: 2021-06-30.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFE0104400); 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0501-1); 山东省泰山学者工程资助项目; 中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2020TD01).

作者简介: 苏程程(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源生态学. E-mail: 13335088169@163.com

通信作者: 单秀娟, 研究员. E-mail: shanxj@ysfri.ac.cn

kildsen 等^[14]在来自冰岛和加拿大的大西洋鳕(*Gadus morhua*)种群中发现了由于捕捞选择而非种群替代引起的遗传差异。在孔雀鱼(*Poecilia reticulata*)^[5]、斑马鱼(*Danio rerio*)^[6]等生态学实验中均发现由于捕捞引起基因表达差异。国内对于不同捕捞策略对渔业生物影响方面的研究起步较晚, 现在研究内容主要侧重于渔业资源可持续利用模型研究^[15-16], 关于不同捕捞策略引起的鱼类适应性方面的实验研究涉及得较少。

海水青鳉(*Oryzias melastigma*)隶属于辐鳍亚纲(Actinopterygii)、颌针鱼目(Beloniformes)、怪颌鲷科(Adrianichthyidae)、青鳉属(*Oryzias*)。海水青鳉体扁平, 背部平直, 腹部呈圆弧形; 头背部平坦, 较宽; 腹膜黑色, 体背部灰褐色, 体侧和腹部银白色, 头部、体侧及臀鳍和尾鳍有多数分散小黑点; 体型较小, 世代周期较短, 可以在实验室条件下大规模饲养; 具有明显的性别特征, 耐受能力很强; 卵大, 易观察操作; 仔鱼和鱼卵对于外界刺激和生存环境中的各种污染物比较敏感。因此海水青鳉可作为生物学和生态学的海水模式生物。本研究拟以海水青鳉作为研究对象, 探究其生长特征在不同捕捞策略下 F_1 、 F_2 和 F_3 之间的变化, 及其在不同世代的传递规律, 并从不同层面和不同角度解析不同捕捞策略下鱼类的生长差异, 为了解不同捕捞策略对鱼类生长的影响提供理论基础, 也为现行渔业资源管理措施调整提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用的海水青鳉来自福建省宁德市南海水产科技有限公司。用卤虫和瓶装颗粒(德彩幼鱼开口微粒饲料)作为饵料, 每日投喂4次至饱食状态, 时间为 7:00、12:00、17:00、21:00, 光照时间为 7:00~21:00 (达到 600 lx)。实验期间每日测量水温及水质参数, 溶解氧质量浓度在 (5.85 ± 1.02) mg/L, 盐度在 29.33 ± 2.33 , 水温在 (25.65 ± 0.52) °C, pH 在 7.82 ± 0.13 , 氨氮 $0.15 \leq$ mg/L。

1.2 实验设计

实验开始前, 海水青鳉在实验室进行驯养,

以适应饲养条件, 并尽量减少亲本的影响。当海水青鳉鱼卵孵化后, 选取健康、活力较强的仔鱼进行实验, 将其分为 7 组, 每组设 3 个重复, 每个重复 300 尾鱼, 放置于 150 L 养殖桶中, 此为 F_1 , 当发现产卵现象 1 周后(约 50%个体达到性成熟), 测量每尾鱼长度, 进行不同捕捞策略的实验, 分别采取 90%捕捞率, 75%捕捞率, 50%捕捞率。75%捕捞率是现阶段高密度捕捞中最常见的收获率^[17], 本研究将其定义为中强度捕捞, 并设置 90%高强度捕捞组和 50%低强度捕捞组, 进行对比。分别为 90%大个体捕捞[即捕捞实验鱼中体长前 90%的个体, 保留 10%体长最小的实验鱼(即 30 尾)进行下一代繁殖, 简称 90% H-B]、90%随机捕捞[即随机捕捞实验鱼, 保留 10%的实验鱼(即 30 尾)进行下一代繁殖, 简称 90% H-R]、75%大个体捕捞[即捕捞实验鱼中体长前 75%的个体, 保留 25%体长最小的实验鱼(即 75 尾)进行下一代繁殖, 简称 75% M-B]、75%随机捕捞[即随机捕捞 75%实验鱼, 保留 25%的实验鱼(即 75 尾)进行下一代繁殖, 简称 75% M-R]、50%大个体捕捞[即捕捞实验鱼中体长在前 50%的个体, 保留 50%的实验鱼(即 150 尾)进行下一代繁殖, 简称 50% L-B]、50%随机捕捞[即随机捕捞 50%实验鱼, 保留 50%的实验鱼(即 150 尾)进行下一代繁殖, 简称 50% L-R]、75%小个体捕捞[即捕捞实验鱼中体长最小的 75%个体, 保留 25%体长最大的实验鱼(即 75 尾)进行下一代繁殖, 简称 75% M-S]。捕捞后两周开始收集鱼卵, 鱼卵用淡水恒温 28 °C、持续充氧进行孵化, 经过 10 d 孵化, 5 d 内孵化出来的仔鱼为同一批次为 F_2 , 当尾数到达 350 尾时放入到新的养殖桶中并移除 F_1 , 按照上述实验步骤进行 3 个世代的捕捞实验。

1.3 实验方法

卵径测量: 鱼卵自收集当日记作 1 日龄, 每隔 1 日在显微镜下进行测量, 每组测量 10 粒, 精确到 1 μ m。

仔鱼阶段: 自出膜日记入 1 日, 每隔 1 日在解剖镜下测量全长, 每组 10 尾, 精确到 1 μ m。

生长阶段: 在 20~60 d 时, 每 5 d 进行体长、全长测量, 每次测量 30 尾, 用游标卡尺进行测量,

精确到 0.01 mm, 40 d 和 60 d 各测量 10 尾体长体重, 吸干鱼体表面水分, 用电子天平测量, 精确到 0.0001 g。

孵化率: 每个处理组分别收集同日鱼卵 300 粒, 在 1 L 烧杯中, 用淡水恒温 28 °C、持续充氧进行孵化, 每天挑出未受精以及坏卵并记录个数, 记录最终孵化的仔鱼尾数。

存活率: 取同日孵化的健康 50 尾仔鱼放置于 5 L 烧杯中, 一日 4 次喂养新鲜的蛋黄汁, 每天换水在 50%, 10 d 后记录最后存活仔鱼数量。

体长分布: 在进行捕捞时, 测量所有实验鱼全长, 精确到 1 mm, 并以 1 cm 为分度单位按照全长进行分组, 按照尾数计算不同长度组所占比例。

1.4 指标测定

1.4.1 生长指标 分别选取 40 日龄和 60 日龄仔鱼, 体长和体重的关系采用幂函数关系表示:

$$W=a \times L^b$$

式中, L 表示平均体长, W 表示 L 相对的平均体重, a 表示生长的条件因子, 一定程度反映生物体的肥满度, b 表示幂指数系数。

生长方程选用指数生长方程:

$$W_{i+1}=W_i \times e^{G_i \cdot \Delta t}$$

式中, G 表示在短时间间隔内的瞬时增长率, W_i 和 W_{i+1} 分别表示在时间 i 和时间 $i+1$ 时的体重, Δt 表示短时间间隔。

1.4.2 增长率 仔鱼阶段 1~9 日龄增长率计算公式如下:

平均日增全长(growth of average daily, ADG, mm/d): $ADG=(L_9-L_1)/9$

全长平均增长率(average growth rate of full length, FLAG, %): $FLAG=(L_9-L_1)/L_1 \times 100\%$

全长特定增长率(specific growth rate of full length, FLSG, %/d):

$$FLSG=(\lg L_{t_2}-\lg L_{t_1}) \times 100\% / (t_2-t_1)$$

式中 t_1 、 t_2 表示日龄, L_{t_1} 、 L_{t_2} 分别表示日龄 t_1 、 t_2 时体长, L_1 表示 1 日龄全长, L_9 表示 9 日龄全长。体长、全长精确到 0.01 mm。

特定日龄(40~60 d)增长率计算:

体重增长率(growth rate of weight, WGR, %): $WGR=(W_{60}-W_{40}) \times 100\% / W_{40}$

体长增长率(growth rate of body length, BLGR, %): $BLGR=(L_{60}-L_{40}) \times 100\% / L_{40}$

式中, W_{60} 、 W_{40} 分别表示 60 日龄和 40 日龄体重, L_{60} 、 L_{40} 分别表示 60 日龄和 40 日龄体长。体重精确到 0.0001 g; 体长精确到 0.01 mm。

1.4.3 孵化率与存活率

孵化率(hatchability, H , %): $H=NF/NE \times 100\%$

仔鱼存活率(survival rate, SR , %): $SR=M_t/M_0 \times 100\%$

式中, NF 表示孵化出苗的仔鱼个数, NE 表示鱼卵个数; M_t 表示 9 d 以后存活尾数, M_0 表示开始时尾数(海水青鲷在 10 d 以后存活率比较稳定, 因此本研究选取 10 d 之前进行存活率比较研究)。

1.5 统计分析

使用软件 SPSS 19.0 和 Excel 2013 进行数据处理分析, 数据采用平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)表示, 并用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同处理组、不同日龄、不同代际之间的显著性差异, 显著水平 $P=0.05$, 极显著水平 $P=0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 不同捕捞策略下海水青鲷卵径大小与孵化率

由表 1 可知, F_0 未施加捕捞压力, 其卵径在 1~9 d 期间变化差异较小; F_1 和 F_2 其卵径大小在 1~9 d 间的差距在 40 μm 以上。不同代际间同日龄卵径大小逐渐增加; 同日龄不同代际间, F_0 和 F_1 、 F_2 相比呈极显著性差异($P<0.05$)。根据表 2, F_0 未施加捕捞压力, 青鲷卵径在 5 d 最小, 9 d 最大, 总体差异不大。根据单因素方差分析结果, 9 d, 90% H-B 与 90% H-R、75% M-R、50% L-R 和 75% M-S 之间分别存在极显著性差异($P<0.05$); 90% H-R 与三组大个体捕捞策略组呈极显著性差异($P<0.01$)。和 F_1 卵径数据相比, F_2 的差异性更加明显, F_2 卵径大小在 1100 μm 以上, 明显大于 F_1 和 F_0 。 F_2 中, 1 d 时各处理组间差异性不显著。3 d 时, 90% H-R 与 75% M-R、50% L-B、50% L-R 相比呈现极显著性差异($P<0.01$), 且该组卵径为 3 d 卵径中最小。5 d 时, 90% H-B 与 75% M-B 呈现极显著性差异($P<0.01$); 90% H-R 与 75% M-R、50% L-R 相比呈现极显著性差异($P<0.01$), 与 75% M-B 差异显著

($P<0.05$)。7 d 时, 90% H-B 与 75% M-S 相比呈现极显著性差异($P<0.01$)。9 d 时, 90% H-B 与除 90% H-R 以外的 5 组呈现极显著性差异($P<0.01$)。

表 1 海水青鳉同日龄不同代际间卵径比较
Tab. 1 Comparison of egg diameter between different generations of *Oryzias melastigma* at the same age

<i>n</i> =20; $\bar{x} \pm SD$					
代际 generation	1 日 Day 1	3 日 Day 3	5 日 Day 5	7 日 Day 7	9 日 Day 9
F ₀	1081.78±37.74 ^A	1073.32±33.55 ^A	1080.08±43.82 ^A	1088.34±37.93 ^A	1087.16±36.03 ^A
F ₁	1067.60±39.78 ^B	1058.78±38.75 ^B	1081.64±40.29 ^A	1096.60±41.92 ^A	1112.67±42.35 ^B
F ₂	1113.49±52.56 ^C	1128.59±51.45 ^C	1143.71±49.77 ^B	1152.94±58.98 ^B	1157.77±64.34 ^C

注: 同一列数值上标不同字母表示有极显著性差异($P<0.01$); 相同字母表示无显著性差异。
Note: Values in the same column with different superscripts denote extremely significant differences ($P<0.01$); the same superscript denotes no significant difference.

表 2 海水青鳉 F₀~F₂ 不同捕捞策略和日龄下卵径均值
Tab. 2 Average egg diameter under different fishing strategies and ages of *Oryzias melastigma* during F₀–F₂ generations

<i>n</i> =20; $\bar{x} \pm SD$						
代际 generation	捕捞策略 fishing strategy	1 日 Day 1	3 日 Day 3	5 日 Day 5	7 日 Day 7	9 日 Day 9
F ₀	无 no	1081.78±37.74	1080.08±43.82	1073.32±33.55	1088.34±37.93	1087.16±36.03
	90%H-B	1084.64±43.22 ^A	1076.67±46.29 ^{aA}	1094.40±58.63 ^{aB}	1125.87±47.91 ^{aA}	1139.40±29.72 ^a
	90%H-R	1053.60±39.39 ^B	1037.40±34.56 ^{cB}	1057.93±41.95 ^b	1082.67±36.21 ^{cBC}	1086.83±37.18 ^c
	75%M-B	1066.60±42.32	1066.87±32.24 ^{abA}	1080.83±34.66 ^a	1104.80±36.43 ^{bAB}	1131.83±48.21 ^{ab}
F ₁	75%M-R	1071.62±38.37	1056.80±32.70 ^b	1088.40±39.30 ^{aB}	1102.40±38.74 ^{bcAB}	1100.67±36.33 ^{bc}
	50%L-B	1070.40±37.25	1057.40±40.62 ^b	1081.86±32.25 ^a	1089.93±35.71 ^{bcBC}	1116.13±32.33 ^b
	50%L-R	1072.76±40.10	1059.20±41.71 ^b	1088.87±31.50 ^{aB}	1100.80±43.02 ^{bcAB}	1102.33±34.08 ^{bc}
	75%M-S	1054.07±31.45 ^B	1057.13±33.27 ^b	1079.20±28.7 ^a	1069.73±33.22 ^{cC}	1110.67±52.26 ^b
F ₂	90%H-B	1110.52±45.15	1138.35±54.34	1140.00±41.94 ^{bcBCD}	1178.09±62.49 ^{aAB}	1215.74±74.44 ^{aA}
	90%H-R	1125.56±54.26	1157.70±65.96 ^{aA}	1153.93±44.98 ^{bAB}	1140.52±45.43 ^{bBC}	1186.07±56.52 ^{abAB}
	75%M-B	1127.80±68.27 ^a	1126.60±50.31 ^b	1178.93±60.13 ^{aA}	1180.87±72.26 ^{aA}	1147.93±56.38 ^{bcBC}
	75%M-R	1114.10±42.48	1112.33±49.65 ^{bb}	1116.93±42.68 ^{cD}	1143.13±36.11 ^b	1164.27±69.01 ^{bBC}
	50%L-B	1116.30±45.58	1116.60±42.66 ^{bb}	1142.13±34.19 ^{bcBCD}	1152.87±50.60	1127.80±51.04 ^{cC}
	50%L-R	1100.87±52.86 ^b	1122.23±50.18 ^{bb}	1121.33±38.52 ^{cD}	1157.60±58.42	1140.27±57.76 ^{bcC}
	75%M-S	1099.80±52.10 ^b	1132.30±35.87 ^b	1147.15±50.56 ^{bBC}	1122.13±63.27 ^{bC}	1138.67±47.73 ^{bcC}

注: 同一数值上标不同小写字母表示有显著性差异($P<0.05$), 大写字母表示极显著性差异($P<0.01$), 相同字母表示无显著性差异, 无字母表示与其他无差异。
Note: Values in the same column with different lowercase superscripts denote significant differences ($P<0.05$); different capital superscripts denote extremely significant differences ($P<0.01$); the same superscript denotes no significant difference; no superscript denote no difference.

根据图 1A, F₀ 未捕捞下其孵化率为 43.83%, F₁ 孵化率均值为 42.70%, 极差为 19%; F₃ 孵化率为 36.14%, 极差为 17%。孵化率在代际间呈现降低的趋势。在 7 个处理组中, 90% H-R 孵化率从 F₀ 44%降到 F₂ 26%; 其次下降幅度最大的为 75% M-S, 从 44%下降到 33%; 下降幅度最小的为 90%H-B 和 75% M-R。F₁ 中, 90% H-B、50% L-B

和 50% L-R 大于等于 F₀; F₂ 中, 所有实验组孵化率均小于 F₀。

根据图 1B 可知, 对于 F₁ 和 F₂, 其存活率均低于 F₀ 未捕捞实验组; F₀ 未施加捕捞压力其存活率为 98%; F₁ 存活率均值为 94%, 极差为 6%, 其中最大值为 50% L-B(97%), 最小值为 75% M-S (91%); F₂ 中, 均值为 88%, 极差为 17%, 其中存

活率最大是 75% M-S, 90% H-B 存活率最低, 为 77%。对比 F_0 和 F_2 数值, 变化幅度最大的为 90% H-B 处理组, 两代差距 21%, 其次为 50% L-B 和 50% L-R(12%), 变化范围最小的为 75% M-S(4%)。从图中曲线走势情况可以看出, F_2 的 90%大个体捕捞存活率最低(77%), 其次为 F_2 的 50%大个体捕捞和 50%随机捕捞(86%); F_1 中 50%大个体捕捞强度存活率最高(97%), 其次为 F_1 中的 50%随机捕捞(96%)。根据表 1~表 2 卵径大小对比, 90% H-B 卵径增加幅度最大, 相比较其孵化率在两代之间较其余处理组较高; 低强度捕捞组卵径增加量较小, 其孵化率代际之间波动范围较小; 在孵

化率的变化可见, 即使出膜的仔鱼数量增加但是其存活数量降低, 胚胎质量下降。

2.2 不同捕捞策略下海水青鲮仔鱼生长特征

F_0 未进行捕捞, 其平均日增全长为 0.0935 mm/d, 全长平均增长率为 22.63%, 全长特定增长率为 2.55%, 以其为基准, 与其他处理组进行比较(表 3); F_1 中, 平均日增全长最大的为 75% M-S, 最小的为 75% M-B; 90% H-R 和 75% M-B 小于 F_0 ; 全长平均增长率和全长特定增长率最大处理组为 75% M-S, 最小为 75% M-B (表 3)。

根据图 2, 图中虚线表示 F_0 (即未捕捞)在相同条件下增长率, F_0 在 1~3 d 增长率为 4.79%; F_1 增

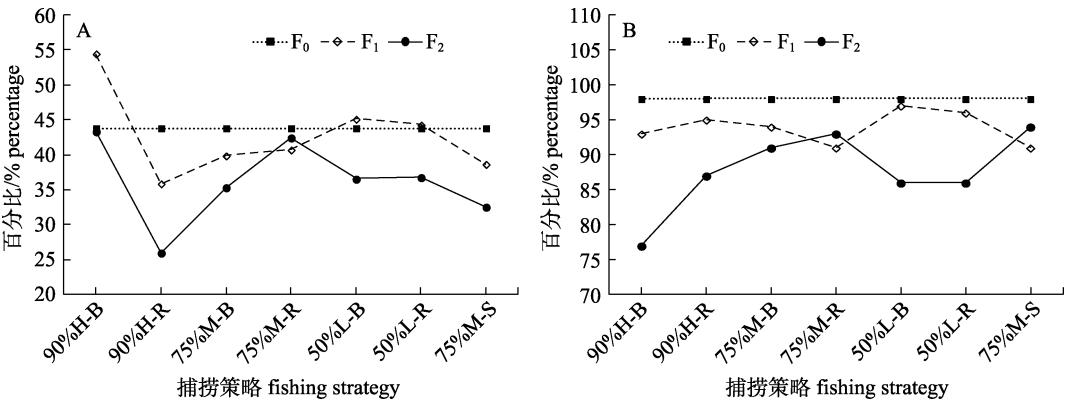


图 1 不同代际和捕捞策略下海水青鲮的孵化率(A)和存活率(B)
Fig. 1 Hatchability (A) and survival rate (B) of *Oryzias melastigma* in different generations and fishing strategy

表 3 不同捕捞策略下海水青鲮仔鱼增长率(1~9 d)
Tab. 3 Growth rates of larva under different fishing strategies of *Oryzias melastigma* (days 1–9)

代际 generation	捕捞策略 fishing strategy	平均日增全长 ADG/(μ m/d)	全长平均增长率 FLAG/%	全长特定增长率 FLSG/(%/d)
F_0	无 no	9.39	22.63	2.55
	90%H-B	9.87	24.07	2.70
	90%H-R	8.06	19.34	2.21
	75%M-B	7.48	17.56	2.02
F_1	75%M-R	9.12	22.23	2.51
	50%L-B	12.49	30.58	3.34
	50%L-R	12.34	30.31	3.31
	75%M-S	13.13	32.30	3.50
F_2	90%H-B	7.08	15.50	1.80
	90%H-R	9.89	22.06	2.49
	75%M-B	11.22	25.88	2.88
	75%M-R	12.59	30.55	3.33
	50%L-B	10.93	26.70	2.96
	50%L-R	9.93	22.85	2.57
	75%M-S	12.77	31.05	3.38

长率均值为 3.49%, 最大值为 90%H-B 处理组 (7.12%), 最小为 75%M-B 处理组为 1.06%(图 2A); F_2 增长率为 5.29%, 75% M-R 处理组增长率最大为 6.71%, 90%H-B 最小为 3.54%(图 2B)。 F_0 在 3~5 d 增长率为 2.93%; F_1 增长率均值为 2.11%, 其中 75% M-B (3.41%)和 90%H-R (3.20%)超过 F_0 , 最小为 90% H-B 处理组为 0.37%; F_2 平均增长率为 2.09%, 75% M-S 处理组增长率最大为 3.78%, 90% H-R 最小为 0.37%, 90% H-B 和 50% L-R 增长率小

于 1.00%。 F_0 在 5~7 d 增长率为 1.16%; F_1 增长率均值为 2.21%, 其中最大值为 75% M-S (3.70%)处理组, 最小为 75% M-B 处理组为 0.84%, 90%处理组小于 F_0 ; F_2 增长率为 1.02%, 只有 75% M-B 和 90% H-B 高于 F_0 , 其余均低于 F_0 。 F_0 在 7~9 d 增长率为 0.0136%; F_1 增长率均值为 1.91%, 其中最大值为 50% L-B 处理组, 为 3.96%, 所有的处理组增长率都大于 F_0 ; F_2 增长率均值为 1.23%, 50% L-R 处理组增长率最大为 2.96%, 90% H-B 最小为 0.006%。

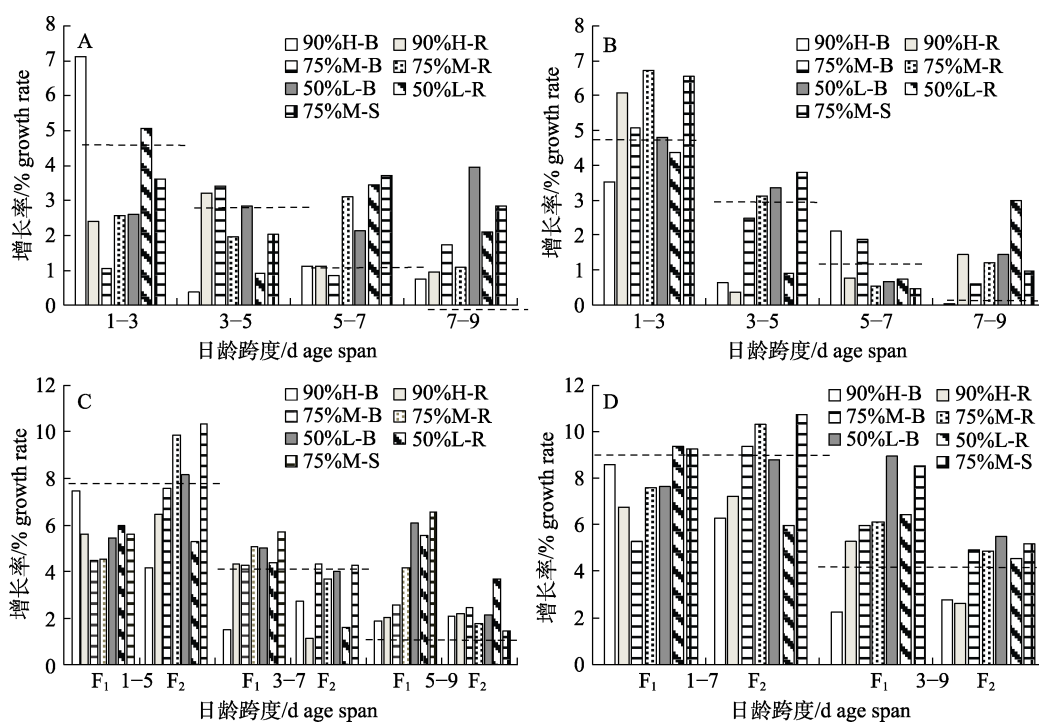


图 2 海水青鳉全长特定增长率

A: 3 d- F_1 ; B: 3 d- F_2 ; C: 5 d; D: 7 d.

Fig. 2 Specific growth rate of full length of *Oryzias melastigma*

A: 3 day-generation 1; B: 3 day-generation 2; C: day 5; D: day 7.

通过 5 d 内特定增长率的变化情况(图 2C), F_0 在 1~5 d, 3~7 d 和 5~9 d 的增长率逐渐降低, 由 7.72%降到 4.09%, 最后到 1.17%。 F_1 和 F_2 的增长率呈现降低的趋势, F_1 在 1~5 d, 3~7 d, 5~9 d 的平均增长率从 5.59%~4.32%~4.12%, F_2 从 10.32%~4.24%~1.42%, F_2 变化幅度最大。1~5 d, F_1 增长率均低于 F_0 , F_2 中, 75%M-R、50%L-B 和 75%M-S 增长率高于 F_0 , 其余均低于 F_0 且 90%H-B 最低。3~7 d, 90%H-B F_1 特定增长率低于 F_0 , 而 F_2 中仅有 75%M-B 和 75%M-S 高于 F_0 。

5~9 d, F_1 与 F_2 均高于 F_0 , F_1 中最高值为 75%M-S (6.54%), 最低值为 90%H-B (1.88%); F_2 中最高值为 50%L-R (3.67%), 最低值为 75%M-S (1.42%)。通过 1~7 d 和 3~9 d 增长率可见, 1~7 d 增长率明显高于 3~9 d, 90%捕捞组在前后两个时期的差值最大 (图 2D)。

由表 4 结果可知, F_1 未施加捕捞压力, 仔鱼在 1~9 d 时全长最大差值为 841 μm , F_2 和 F_3 在 1~9 d 全长最大差值分别为 985 μm 和 945 μm , 随着代际增加, 同日龄仔鱼全长呈现逐渐增大趋势。

根据表 5, F_1 为未捕捞, 以 F_1 为基准, F_2 中 50%低强度捕捞组卵径与 F_1 同日龄大小差异较小, 对于中高强度捕捞度差异较大, F_3 中差异较明显, 高强度捕捞组仔鱼全长明显高于 F_1 , 并且在 1~3 d 龄时差异较大。 F_2 为经过捕捞刺激后的第一代仔鱼, 其全长差异最明显的为低强度捕捞组。 F_2 与 F_1 相比变化幅度较小, 尤其是 90%捕捞组变化幅度小于其余处理组, 低强度捕捞组和小个体捕

捞组全长增量较大。 F_3 与 F_1 进行对比发现, 相同捕捞策略不同日龄下增长幅度最大的为 90%和 75%大个体和随机捕捞组, 其增加量远高于低强度捕捞组和 75%小个体捕捞组。

2.3 不同捕捞策略下海水青鲮幼鱼生长特征

在不同捕捞策略下, 根据海水青鲮体长和体重数据, 通过 SPSS 19.0 计算体长-体重关系式, 参数计算结果参考表 6。 F_1 , 在施加不同强度捕捞

表 4 同日龄不同代际间海水青鲮仔鱼全长比较
Tab. 4 Comparison of full length of larvae between different generations of *Oryzias melastigma* at the same age

n=20; $\bar{x} \pm SD$					
代际 generation	1 日 Day 1	3 日 Day 3	5 日 Day 5	7 日 Day 7	9 日 Day 9
F_1	3720.00±220.34 ^A	4153.33±143.20 ^A	4355.56±144.31 ^A	4443.33±147.82 ^A	4561.76±160.25 ^A
F_2	3705.91±224.41 ^A	4031.44±278.10 ^B	4231.56±250.32 ^B	4445.66±238.98 ^A	4690.23±320.51 ^B
F_3	3863.00±305.94 ^B	4346.50±299.90 ^C	4540.00±301.75 ^C	4675.00±293.78 ^B	4808.50±225.01 ^C

注: 同一列数值上标不同字母表示有极显著性差异($P<0.01$); 相同字母表述无显著性差异。
Note: Values in the same column with different superscripts denote significant differences ($P<0.01$); the same superscript denotes no significant difference.

表 5 F_1 ~ F_3 不同捕捞策略和日龄下海水青鲮仔鱼全长
Tab. 5 Full length of larvae under different fishing strategies and ages of F_1 ~ F_3 generations of *Oryzias melastigma*

n=20; $\bar{x} \pm SD$						
代际 generation	捕捞策略 fishing strategy	1 日 Day 1	3 日 Day 3	5 日 Day 5	7 日 Day 7	9 日 Day 9
F_1	无 no	3720.00±220.34	4153.33±143.20	4355.56±144.31	4443.33±147.82	4561.76±160.25
	90%H-B	3690.63±229.11	4364.10±295.12 ^{aA}	4387.50±294.36 ^{aA}	4511.43±211.12	4578.79±196.46 ^{aA}
	90%H-R	3751.72±232.41	3965.63±216.44 ^{bcBC}	4269.23±276.79	4380.95±210.97 ^{bcB}	4477.42±214.02 ^{aA}
F_2	75%M-B	3832.00±186.46 ^a	3926.47±265.50 ^{bcBC}	4247.22±202.11	4330.00±266.72 ^{cB}	4504.76±204.76 ^{aA}
	75%M-R	3692.59±197.92	3918.42±155.71 ^{cBC}	4100.00±220.91 ^{bB}	4402.38±249.38 ^{bc}	4513.33±167.61 ^{aA}
	50%L-B	3660.00±281.13	3976.67±209.57 ^{cC}	4165.00±159.4 ^b	4535.29±238.53 ^{bc}	4842.00±368.17 ^{bB}
	50%L-R	3675.00±209.45 ^b	3903.57±123.17 ^{bAB}	4168.97±230.07 ^b	4380.00±245.91 ^{aA}	4798.77±343.69 ^{bB}
	75%M-S	3665.52±181.81	4117.24±264.67 ^{bcBC}	4205.00±234.19 ^{bB}	4552.08±175.03 ^{ab}	4776.54±306.30 ^{bB}
	90%H-B	4086.67±318.11 ^{aA}	4433.33±220.24 ^{bAB}	4500.00±227.43	4723.33±244.50 ^{ab}	4720.00±215.60 ^{bB}
	90%H-R	4035.00±149.65 ^{aA}	4640.00±208.76 ^{aA}	4680.00±241.92 ^b	4765.00±215.88 ^a	4925.00±129.27 ^{aA}
F_3	75%M-B	3903.33±283.43 ^{ab}	4386.67±293.30 ^{bAB}	4643.33±211.21 ^b	4846.67±185.20 ^{aA}	4913.33±187.05 ^{aA}
	75%M-R	3710.00±342.76 ^{abB}	4330.00±317.48 ^{bcBC}	4653.33±326.67	4710.00±305.52	4843.33±207.92
	50%L-B	3770.00±261.49 ^{bcB}	4296.67±339.86 ^{cC}	4493.33±271.56	4710.00±264.38 ^{bcB}	4826.67±206.67 ^{bB}
	50%L-R	3683.33±213.48 ^{bc}	4113.33±217.72 ^{bcBC}	4443.33±374.79 ^a	4513.33±320.27 ^{cB}	4666.67±268.24
	75%M-S	3910.00±268.26 ^{cB}	4323.33±248.70 ^{bcBC}	4413.33±318.11	4486.67±311.54	4803.33±214.13

注: 同一列数值上标不同小写字母表示有显著性差异($P<0.05$), 大写字母表示极显著性差异($P<0.01$), 相同字母表示无显著性差异, 无字母表示与其他无差异。
Note: Values in the same column with different lowercase superscripts denote significant differences ($P<0.05$) with different capital superscripts denoting extremely different significant differences ($P<0.01$). Same superscripts denote no significant difference, and those no superscript denote no difference.

压力下, 其体长与体重方程参数差异较小, b 值均值为 3.10, 最大值为 3.21, 是 90%H-B 处理组, 最小值是 2.97 为 50%L-B 处理组, 极差为 0.24; a 值均值为 1.67×10^{-5} , 其中最大值为 2.45×10^{-5} , 最小值为 1.13×10^{-5} , 极差为 1.32×10^{-5} 。在 F_2 , 在不同强度捕捞策略下, 其体长与体重关系式参数较 F_1 变化大, b 值均值为 3.26, 变化范围为 3.11~3.44, 极差为 0.33, 其中 90%H-R 处理组数值最大, 50%L-R 处理组最小; a 值均值为 0.937×10^{-5} , 其变化范围为 $1.32\times 10^{-5}\sim 0.612\times 10^{-5}$, 极差为 0.715×10^{-5} , 最大值为 50%L-R 处理组, 最小值为 90%H-R。 F_3 中, 在不同强度捕捞策略下, b 的均值为 2.95, 变化范围为 3.15~2.80, 极差为 0.35, 其中 75%M-R 处理组数值最大, 75%M-B 处理组最小; a 值均值为

为 2.32×10^{-5} , 其变化范围为 $1.29\times 10^{-5}\sim 3.26\times 10^{-5}$, 极差为 1.96×10^{-5} 。最大值为 75%M-R 处理组, 最小值为 75%M-R。

根据指数生长方程计算其瞬时增长率(G), 结果如表 7 所示。 F_2 中, G 值在各处理组间差异较小, 最大为 50%L-B, 最小为 75%M-S; F_3 , 最小为 90%H-B 组, 仅为 0.01428, 最大值为 50%L-B。从 $F_1\sim F_3$, 随着捕捞压力的实施以及累积效应, F_3 幼鱼瞬时增长率均低于 F_2 对应处理组, 50%L-B 在两代中差异较小, 保持稳定水平, 其余均呈现不同程度降低, 所有处理组中 F_3 的 90%大个体捕捞组为瞬时增长率最低值。

表 8 为不同捕捞策略下幼鱼增长率, F_2 体重增长率均高于 100%, 平均值为 180.12%, 而 F_3 体

表 6 不同捕捞策略下海水青鲈体长与体重方程
Tab. 6 The model of length and weight under different fishing strategies of *Oryzias melastigma*

代际 generation	90%H-B	90%H-R	75%M-B	75%M-R	50%L-B	50%L-R	75%M-S
<i>a</i>							
F_1	1.13×10^{-5}	1.20×10^{-5}	1.27×10^{-5}	2.45×10^{-5}	2.31×10^{-5}	2.05×10^{-5}	1.29×10^{-5}
F_2	1.18×10^{-5}	6.12×10^{-6}	6.31×10^{-6}	8.27×10^{-6}	1.29×10^{-5}	1.33×10^{-5}	6.95×10^{-6}
F_3	2.60×10^{-5}	1.66×10^{-5}	3.26×10^{-5}	1.29×10^{-5}	2.70×10^{-5}	2.74×10^{-5}	1.98×10^{-5}
<i>b</i>							
F_1	3.21	3.20	3.17	2.98	2.97	3.02	3.16
F_2	3.17	3.44	3.39	3.28	3.12	3.11	3.36
F_3	2.90	3.07	2.80	3.15	2.89	2.88	3.00

表 7 不同捕捞策略下青鲈幼鱼瞬时增长率
Tab. 7 Instantaneous growth rates of juvenile *Oryzias melastigma* under different fishing strategies

代际 generation	90%H-B	90%H-R	75%M-B	75%M-R	50%L-B	50%L-R	75%M-S
F_2	—	—	0.05176	0.05140	0.05433	0.05323	0.04577
F_3	0.01428	0.02788	0.02706	0.03662	0.05171	0.02772	0.03178

表 8 不同捕捞策略下青鲈幼鱼增长率
Tab. 8 Growth rates of juvenile *Oryzias melastigma* under different fishing strategies

代际 generation	捕捞策略 fishing strategy	体重增长率 WGR	体长增长率 BLGR	代际 generation	捕捞策略 fishing strategy	体重增长率 WGR	体长增长率 BLGR
F_2	90%H-B	—	32.42	F_3	90%H-B	34.47	10.40
	90%H-R	—	21.07		90%H-R	61.22	14.17
	75%M-B	179.91	31.64		75%M-B	64.02	15.25
	75%M-R	179.53	27.46		75%M-R	112.26	24.11
	50%L-B	196.40	32.39		50%L-B	116.33	24.96
	50%L-R	206.82	32.38		50%L-R	154.47	25.28
	75%M-S	137.98	31.77		75%M-S	88.39	22.90

重增长率普遍降低, 平均值为 90.17%, F_2 为 F_3 的两倍, 且 F_2 每一个实验组增长率均高于 F_3 实验组, F_2 WGR 极差为 68.84, F_3 为 120; F_2 BLGR 极差为 11.35, F_3 为 14.88; F_2 FLGR 极差为 7.76, F_3 为 18.01, F_3 3 种增长率极差范围均大于 F_2 。 F_2 体长和全长增长率的平均值分别为 29.89%、29.23%, 而 F_3 体长增长率平均值为 19.58%、22.93%, 均低于 F_2 。 F_2 BLGR 的最低值为 90%H-R (21.07%), F_3 为 90%H-B (10.40%), F_2 最高值为 90%H-B (32.42%), F_3 为 50%L-R (25.28%), 最高、最低值差距较大。

3 讨论

卵径的大小对鱼类早期发育和存活研究具有重要的生物学意义, 一般认为大卵径鱼卵质量优于小卵径鱼卵, 大卵径鱼卵更容易存活^[18]。不同捕捞策略下, 海水青鲙在不同发育时期和代际之间卵径大小差异明显(表 1, 表 2), 随着代际增加, 其累积效应在同日卵径上差异上极显著, 并且随着日龄增加, 在不同代际间其卵径差异逐渐增加, 差异最大的为 9 日卵径, F_0 与 F_2 差异为 70 μm 。由此可见, 高强度捕捞对鱼卵大小差异十分显著, 并随着代际增加, 差异逐渐增大。为增加补充群体数量, 体型较大的个体通常有更高的存活率, 较高的繁殖力, 对异性更强的吸引力, 有更强的抵御饥饿的能力^[19], 通过对仔鱼在 1~9 d 全长分析结果, 不同代际之间有极显著性差异(表 4), 在相同捕捞策略下, 不同代际间差异性最大的为 90%和 75%中高强度捕捞组(表 5), 而低强度捕捞组在卵径和仔鱼全长形状上差异均为最小。通过中高捕捞强度刺激, 短短 3 代内, 青鲙在仔鱼全长明显增大, 不同日龄下卵径较未捕捞情况下有显著性差异。通常情况下, 海水鱼幼体死亡率在 99%^[20], 因而更大的卵径^[21]、孵化时仔鱼个体较大和更快的生长速度^[22-23]大大提高了存活的可能性, 这些幼体特征的轻微下降可能会对幼体阶段的补充群体产生相当大的后果。90%高强度捕捞组在孵化率上明显高于其余处理组, 但是其存活率却显著性下降, 卵径和仔鱼全长增加导致高强度组下孵化率的增加或维持稳定, 但是其仔鱼存

活率显著下降, 相比较, 75%和 50%捕捞强度下的处理组在两代之间差异较小, 基本处于稳定状态。高强度捕捞导致的孵化率升高、存活率降低, 与早期发育过程中卵径大小^[21]、孵化时仔鱼长度^[22]相关, 短期高强度捕捞所产生的表型性状的变化, 可能是遗传影响, 或产生的表型可塑性, 可在后续作进一步研究。

在高强度捕捞策略下, 仔鱼发育阶段全长增长率显著低于中低强度捕捞策略, 其前期增长速率明显高于后期。与此对比, 低强度捕捞策略下, 幼鱼发育阶段各项增长率显著高于其余捕捞策略组, 后期发育速度高于前期。然而, 有研究表明, 某些结构的发育速度会限制其他身体结构的增长率, 或者以其他结构缺陷作为代价, 例如快速增长的蜗牛壳会变薄, 因而更容易遭受到捕食者的袭击^[24], 快速增长会导致形态受损^[25]、疾病发病率增加^[36]、成年期高代谢率^[27]等, 因此仔鱼时期的快速增长是否会对后期某些器官、组织产生影响, 有待进一步研究。通过对体长体重方程(表 6)和指数生长方程(表 7)结果, 随着代际增加, 捕捞累积效应的存在, 导致 F_3 瞬时增长率明显低于 F_2 同处理组, 且两代中 50%大个体捕捞组瞬时增长率较稳定, 而 90%大个体捕捞组瞬时增长率最低。肥满度差异较大的是 F_2 中 90%和 75%中高强度捕捞组, 并且 F_1 和 F_3 中, 高强度捕捞组的肥满度均较小, 可以说明在高强度捕捞压力下, 海水青鲙的肥满度较差, 肥满度状况的变化会对鱼类繁殖力产生不同程度的影响。与目前我国多种经济鱼类的研究结果相同, 随着捕捞强度的增加, 20 世纪 80 年代比 60 年代 2 个小黄鱼群系个体生长速度升高, 性成熟年龄提前, 也是肥满度下降的主要原因; 小型个体所占比例升高导致异速生长因子偏向于低龄阶段生长^[28]; 蓝点马鲛 (*Scomberomorus niphonius*)繁殖群体低龄化、小型化现象突出^[29]; 东海带鱼渔获年龄已由 20 世纪 50 年代末期 0~6 龄缩短至 0~4 龄, 以 0~1 龄为主, 群体平均长度由 250 mm 降至 210 mm^[30-31]。可见面对高强度捕捞压力及环境压力, 鱼类为种群延续, 已经表现出适应性反应, 生物学特征发生变化^[32]。

本研究结果表明, 短期高强度捕捞使海水青鲈卵径增大、仔鱼全长增加, 孵化率增加但存活率下降, 世代累积效应明显, 通过对不同发育阶段的增长率分析, 高强度捕捞下海水青鲈的在仔鱼时期前期增长率明显高于后期, 幼鱼时期增长率明显低于低强度捕捞组, 高强度捕捞瞬时增长率为同代际间最低, 肥满度较差, 会导致繁殖力降低。根据本实验结果, 高强度捕捞会在短时间内对鱼类表型特征产生变化, 并且随着世代累积效应, 会加剧鱼类向小型化发展, 虽然现在网目尺寸有所放大, 但效果不显著。从渔业管理角度而言, 卵径、仔鱼长度和增长率的变化是至关重要的, FIE 导致的表型性状变化是很快的, 体型差异在表型变化到遗传变化的时间跨度需要多久还不可知, 目前的高强度捕捞会加剧这种变化, 对后续种群的恢复力和持续性影响程度如何, 有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Walsh M R, Munch S B, Chiba S, et al. Maladaptive changes in multiple traits caused by fishing: impediments to population recovery[J]. *Ecology Letters*, 2010, 9(2): 142-148.
- [2] Johansen O G. Size-dependent predation on juvenile herring (*Clupea harengus* L.) by Northeast Arctic cod (*Gadus morhua* L.) in the Barents Sea[J]. *Sarsia*, 2010, 88(2): 136-152.
- [3] Zimmermann F, Jørgensen C. Bioeconomic consequences of fishing-induced evolution: a model predicts limited impact on net present value[J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 2015, 72(4): 612-624.
- [4] Jørgensen C, Enberg K, Dunlop E S, et al. Managing evolving fish stocks[J]. *Science*, 2007, 318(5854): 1247-1248.
- [5] Wijk S J, Taylor M I, Creer S, et al. Experimental harvesting of fish populations drives genetically based shifts in body size and maturation[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(4): 181-187.
- [6] Uusi-Heikkilä S, Whiteley A R, Kuparinen A, et al. The evolutionary legacy of size-selective harvesting extends from genes to populations[J]. *Evolutionary Applications*, 2015, 8(6): 597-620.
- [7] Dunlop E S, Heino M, Dieckmann U. Eco-genetic modeling of contemporary life-history evolution[J]. *Ecological Applications*, 2009, 19(7): 1815-1834.
- [8] Heino M, Pauli B D, Dieckmann U. Fisheries-Induced Evolution[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 2015, 46: 461-480.
- [9] Conover D O, Munch S B. Sustaining fisheries yields over evolutionary time scales[J]. *Science*, 2002, 297(5578): 94-96.
- [10] Li J S, Hu F, Yan L P, et al. The fecundity of chub mackerel (*Scomber japonicus*) spawning stocks in the central east China Sea[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(6): 10-15. [李建生, 胡芬, 严利平, 等. 东海中部日本鲭(*Scomber japonicus*)产卵群体繁殖力特征[J]. *渔业科学进展*, 2014, 35(6): 10-15.]
- [11] Li Z L. Interannual changes in biological characteristics of small yellow croaker *Larimichthys polyactis*, Pacific Cod *Gadus macrocephalus* and Anglerfish *Lophius litulon* in the Bohai Sea and Yellow Sea[D]. Qingdao: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2011: 40-55. [李忠炉. 黄渤海小黄鱼、大头鳕和黄鮟鱇种群生物学特征的年际变化[D]. 青岛: 中国科学院研究生院, 2011: 40-55.]
- [12] Jørgensen T. Long-term changes in age at sexual maturity of Northeast Arctic cod (*Gadus morhua* L.)[J]. *Ices Journal of Marine Science*, 1990, 46(3): 235-248.
- [13] Klara B, Jakobsdóttir, Pardoe H, et al. Historical changes in genotypic frequencies at the Pantophysin locus in Atlantic cod (*Gadus morhua*) in Icelandic waters: evidence of fisheries-induced selection?[J]. *Evolutionary Applications*, 2011, 4(4): 562-573.
- [14] Therkildsen N O, Hemmer-Hansen J, Als T D, et al. Micro-evolution in time and space: SNP analysis of historical DNA reveals dynamic signatures of selection in Atlantic cod[J]. *Molecular Ecology*, 2013, 22(9): 2424-2440.
- [15] Zeng X J. Controllability and optimal catch strategy of fishery resource systems[J]. *Control Theory and Applications*, 1991, 8(4): 356-371. [曾晓军. 渔业资源系统的可控性与最优捕捞策略[J]. *控制理论与应用*, 1991, 8(4): 356-371.]
- [16] Liang R J, Lin Z S, Ren X H. Fishing strategy and study of dynamic prediction of sustainable utilize in marine fishery resources[J]. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition*, 2006, 29(3): 108-112. [梁仁君, 林振山, 任晓辉. 海洋渔业资源可持续利用的捕捞策略和动力预测[J]. *南京师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 29(3): 108-112.]
- [17] Lewin W, Arlinghaus R, Mehner T. Documented and potential biological impacts of recreational fishing: Insights for management and conservation[J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2006, 14(4): 305-367.
- [18] Brooks S, Tyler C R, Sumpter J P. Egg quality in fish: what makes a good egg?[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1997, 7(4): 387-416.
- [19] Bonner R, Peters R H. The ecological implications of body

- size[J]. Journal of Applied Ecology, 1985, 22(1): 291-292.
- [20] Houde E D. Early life dynamics and recruitment variability [J]. American Fisheries Society Symposium, 1987, 2: 17-29.
- [21] Rijnsdorp A D, Vingerhoed B. The ecological significance of geographical and seasonal differences in egg size in *Solea solea*(L)[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1994, 32(3-4): 255-270.
- [22] Pepin P, Myers R A. Significance of egg and larval size to recruitment variability of a temperate marine fish[J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 1991, 48(10): 1820-1828.
- [23] Houde E D. Patterns and trends in larval-stage growth and mortality of teleost fish[J]. Journal of Fish Biology, 2006, 51(sA): 52-83
- [24] Palmer A R. Do carbonate skeletons limit the rate of body growth?[J]. Nature, 1981, 292(5819): 150-152.
- [25] Arendt J D. Adaptive intrinsic growth rates: an integration across taxa[J]. Quarterly Review of Biology, 1997, 72(2): 149-177.
- [26] Saunders R L, Farrell A P, Knox D E. Progression of coronary arterial lesions in Atlantic Salmon (*Salmo salar*) as a function of growth rate[J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 1992, 49(5): 878-884.
- [27] Franois C, Pat M, Lubna N, et al. Early nutrition and phenotypic development: 'catch-up' growth leads to elevated metabolic rate in adulthood[J]. Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences, 2018, 275(1642): 1565-1570.
- [28] Li Z L, Jin X S, Shan X J, et al. Inter-annual changes on body weight-length relationship and relative fatness of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(3): 602-610. [李忠炉, 金显仕, 单秀娟, 等. 小黄鱼体长-体重关系和肥满度的年际变化[J]. 中国水产科学, 2011, 18(3): 602-610.]
- [29] Mou X X, Zhang C, Zhang C L, et al. The fisheries biology of the spawning stock of *Scomberomorus niphonius* in the Bohai and Yellow Seas[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(6): 1308-1316. [牟秀霞, 张弛, 张崇良, 等. 黄渤海蓝点马鲛繁殖群体渔业生物学特征研究[J]. 中国水产科学, 2018, 25(6): 1308-1316.]
- [30] Ling J Z, Li S F, Yan L P, et al. Utilization and management of *Trichiurus japonicus* resources in East China Sea based on Beverton-Holt model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(1): 178-182. [凌建忠, 李圣法, 严利平, 等. 基于 Beverton-Holt 模型的东海带鱼资源利用与管理[J]. 应用生态学报[J]. 2008, 19(1): 178-182.]
- [31] Lu J W, Luo B Z, Lan Y L, et al. Studies on characteristics and successions of structure of fishery resources in the China seas[J]. Studia Marina Sinica, 1995, 10: 195-211. [卢继武, 罗秉征, 兰永伦, 等. 中国近海渔业资源结构特点及演替的研究[J]. 海洋科学集刊, 1995, 10: 195-211.]
- [32] Han Y. Governance and policy adjustment of marine fishery resources in China since 1949[J]. Chinese Rural Economy, 2018, 9: 14-28. [韩杨. 1949 年以来中国海洋渔业资源治理与政策调整[J]. 中国农村经济, 2018, 9: 14-28.]

Growth of *Oryzias melastigma* with different fishing strategies

SU Chengcheng^{1,3}, SHAN Xiujuan^{1,2}, SHAO Changwei^{1,2}

1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; National Field Observation and Research Center for Changdao Marine Ecosystem; Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Environment, Qingdao 266071, China;
2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China;
3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Different fishing strategies have different effects on adaptive changes in the morphological characteristics of fish species. To evaluate the impact of different fishing strategies on the growth characteristics of fish, the marine medaka (*Oryzias melastigma*) was used as the model organism. Seven fishing strategies were used: 90% large individual fishing (high-intensity large individual fishing, H-B), 90% random fishing (high-intensity random fishing, M-R), 75% large individual fishing (middle-intensity large individual fishing, H-B), 75% random fishing (middle-intensity random fishing, M-R), 50% large individual fishing (low-intensity large individual fishing, L-B), 50% random fishing (low-intensity random fishing, L-R), and 75% small individual fishing (middle-intensity small individual fishing, M-S). The growth characteristics of *O. melastigma* in the F₁–F₃ generations were determined. The egg diameter and larval length of *O. melastigma* were significantly different under the different fishing strategies in the same generation ($P < 0.01$). Among different generations, the egg diameter increased in the high-intensity fishing treatment group (90% fishing strategy condition) and decreased in the low intensity fishing treatment group (50% fishing strategy condition). However, different generations had little effect on the hatchability and survival rate of the next generation of eggs. The growth rate of the low-intensity fishing treatment group was higher than that of the other treatment groups in the juvenile stage among different generations. During the inter-generational larval development stage, the growth rate of the high-intensity fishing treatment group increased rapidly. This growth rate was significantly higher in the early stage than in the late stage. However, the growth rate of the high-intensity fishing treatment group was lower in the larval and juvenile stages. With the increase in external fishing pressure, the instantaneous growth rate of the high-intensity fishing treatment group was the lowest among the same generation. The instantaneous growth rates of the low-intensity and large individual fishing strategy groups were stable among generations. Similar to the current fishing strategy, high intensity and large individual fishing will lead to great differences in the biological characteristics of fish in three generations. Therefore, for the sustainable utilization of fishery resources and to predict the development trend of fish evolution, it is imperative to study the changes in biological traits of fish caused by fish-induced evolution by simulating the different fishing strategies.

Key words: *Oryzias melastigma*; fishing strategy; growth; fishery resources

Corresponding author: SHAN Xiujuan. E-mail: shanxj@ysfri.ac.cn