

DOI: 10.5846/stxb201710171866

张宗航,董建宇,张雪梅,张秀梅.环境丰容对早期发育阶段许氏平鲈趋礁行为的影响.生态学报,2018,38(22): - .

Zhang Z H, Dong J Y, Zhang X M, Zhang X M. Effects of environmental enrichment on the distribution of *Sebastes schlegelii* in early developmental stages. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): - .

环境丰容对早期发育阶段许氏平鲈趋礁行为的影响

张宗航¹,董建宇¹,张雪梅¹,张秀梅^{1,2,*}

1 中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室,青岛 266003

2 青岛海洋科学与技术国家实验室,海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室,青岛 266072

摘要:采用实验生态学方法,观测了不同环境丰容水平下培育的许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)仔、稚、幼鱼的趋礁行为反应,统计分析了两结构模型礁对实验鱼的诱集效果,初步探究了环境丰容对实验鱼趋礁行为的影响。结果显示:许氏平鲈仔、稚、幼鱼具有明显不同的行为习性与趋礁行为特性,未放入模型礁前,稚鱼在水槽中分布较分散,仔、幼鱼则集中于水槽四周阴影区域,中央区域分布极少;放入模型礁后,仔、稚鱼在礁区的平均分布率无显著变化($P>0.05$);幼鱼则由 1.11% 分别增大至 47.78% (塔型礁)和 54.44% (管型礁) ($P<0.01$),随着个体生长发育,其趋礁性显著增强。环境丰容 25 d (即 48 日龄的稚鱼),对实验鱼群体重心与模型礁的平均距离 D_{gr} 、个体与模型礁的平均距离 D_{it} 、个体间的平均距离 D_{it} 及实验鱼在水槽中央区域 (VI 区) 的平均分布率均无显著影响 ($P>0.05$)。环境丰容 47 d (即 70 日龄的幼鱼),未放入模型礁前,高水平丰容组 (EH 组) 幼鱼在 VI 区的平均分布率显著高于空白对照组 (C 组) ($P<0.05$),低水平丰容组 (EL 组) 与 C 组、EH 组均无显著差异 ($P>0.05$),各处理组 D_{gr} 与 D_{it} 大小顺序为:EL 组>C 组>EH 组;放入模型礁后,各处理组幼鱼在模型礁区域 (VI 区) 的平均分布率:EL 组>C 组>EH 组, D_{gr} 与 D_{it} 大小顺序为:EL 组<C 组<EH 组;表明低水平环境丰容可有效增强许氏平鲈幼鱼的趋礁行为,减小幼鱼“胆量”,这对于提高放流幼鱼在野外的存活率具有重要意义。本研究旨在探讨环境丰容这一行为驯化手段,对于增强早期发育阶段许氏平鲈趋礁行为的可行性,为增殖放流苗种的高效健康培育及增殖型人工鱼礁的选型提供参考。

关键词:环境丰容;许氏平鲈;早期发育阶段;趋礁行为;人工鱼礁

Effects of environmental enrichment on the distribution of *Sebastes schlegelii* in early developmental stages

ZHANG Zonghang¹, DONG Jianyu¹, ZHANG Xuemei¹, ZHANG Xiumei^{1,2,*}

1 The Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

2 Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266072, China

Abstract: The effects of three levels of environmental enrichment treatments (no environmental enrichment (group C); low-level environmental enrichment (group EL); and high-level environmental enrichment (group EH)) on the behavioral response and distribution of *Sebastes schlegelii* in early developmental stages were studied with an experimental ecology method. Additionally, the attractive effect of two kinds of artificial reef models (pyramid and cylinder reef models) on *S. schlegelii* was also studied. The results showed that *S. schlegelii* had different behavioral habits in early developmental stages. The post-larvae were scattered, whereas larvae and juveniles concentrated around the test tanks when there were no artificial reef models. When the two kinds of artificial reef models were introduced into the test tanks, there were no significant changes in the larval and post-larval average distribution rates in the central region of the tanks where the artificial reef

基金项目:国家自然科学基金(31172447);海洋公益性行业科研专项(201405010)

收稿日期:2017-10-17; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn

models were placed ($P>0.05$), but juveniles increased significantly from 1.11% to 47.78% and 54.44%, for pyramid and cylinder reef models, respectively ($P<0.01$), indicating significantly increased attractive effects of the two kinds of models with the growth and development of the fish. Environmental enrichment of 25 days had no significant effects on the average distance between the center of gravity of colony and artificial reef models (D_{gr}), average distance of fish and the center of artificial reef models (D_{fr}), distance between individual fish (D_{ff}), nor average distribution rate in the central region ($P>0.05$). However, environmental enrichment of 47 days showed different behavioral characteristics among juvenile fish cultured in three types of net cage environments. When no reef models were introduced, the average distribution rate in the central region of group EH was significantly higher than that of group C ($P<0.05$). However, there were no significant differences between groups EL and C, nor between groups EL and EH ($P>0.05$). The order of D_{gr} and D_{fr} was group EL $>$ C $>$ EH. When artificial reef models were introduced into the tanks, the order of the average distribution rate in the central region was group EL $>$ C $>$ EH, and the order of D_{fr} and D_{ff} was group EL $<$ C $<$ EH. These results indicated that low-level environmental enrichment could strengthen the juvenile attractive effect of artificial reef models and decrease the boldness of fish, which is essential for their survival in the natural environment. The research may provide referential information for further studies in hatchery techniques and stock enhancement.

Key Words: environmental enrichment; *Sebastes schlegelii*; early developmental stages; attractive effect; artificial reef model

趋礁行为是指鱼类趋近礁体栖息的行为倾向,是其趋礁性强弱的外在反映,对于满足趋礁性鱼类在生长、发育、繁殖过程中的捕食、避敌、竞争等需求具有重要意义,在一定程度上决定了其能否适应野外复杂的生境,更好地存活和生长^[1]。近年来,在特定海域投放人工鱼礁以恢复和养护渔业资源已在国内外进行了大量实践^[2],但与此相关的研究报道多集中在礁区流场效应^[3]、生物多样性^[4-5]和资源养护效果评价^[6-7]等方面,对于鱼类趋礁行为的研究相对较少。通过行为驯化措施强化增殖放流鱼类的趋礁行为,提高其在野外的存活率,一直是海洋牧场建设过程中的关键环节。研究表明,环境丰容 (Environmental enrichment) 会对鱼类的行为、生理和生长产生诸多影响,能够增强其隐蔽、竞争、捕食能力,可能提高放流鱼类在野外的存活率^[8-12]。Naslund & Johnsson 认为,环境丰容是指有意识的增加(养殖)水体环境复杂程度,以减少鱼类的不适应行为或异常特征,从而实现提高增殖鱼类福利之目的^[13]。近年来,国外针对环境丰容对鱼类行为、生理的影响开展了较为系统的研究,而国内在该领域的研究报道极少。

许氏平鲈 (*Sebastes schlegelii*), 又名黑头、黑鲷, 隶属于鲈形目 (Scorpaeniformes)、鲈科 (Scorpaenidae)、平鲈属 (*Sebastes*), 广泛分布于渤海、东海, 具趋礁性, 喜栖于岩礁底质海域^[14-15]。近年来由于过度捕捞、生态破坏等原因, 其野生资源量严重衰退, 作为北方沿海地区重要的增殖放流鱼种, 如何通过一定的行为驯化措施增强人工培育苗种的趋礁行为, 提高放流存活率, 并根据鱼类行为特性设计合适的鱼礁, 以提升礁体对放流鱼类的诱集效果和庇护效应, 是目前亟需解决的关键问题。本研究通过室内行为观察实验, 比较了不同环境丰容水平下培育的许氏平鲈仔、稚、幼鱼的趋礁行为反应, 分析了不同结构模型礁对早期发育阶段许氏平鲈的诱集效果, 初步探究了环境丰容对早期发育阶段许氏平鲈趋礁行为的影响, 以期通过环境丰容等行为驯化手段, 提高增殖放流鱼类的存活率, 为人工鱼礁的选型、设计等提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料与养殖条件

选取捕于青岛海域的适龄怀仔雌鱼, 于青岛金沙滩水产有限公司育苗车间的室内育苗池 (3.9 m $\times$ 3 m $\times$ 1.3 m, 长 $\times$ 宽 $\times$ 深) 中自然产仔, 在亲鱼产仔原池培育仔鱼至 23 日龄。然后于育苗池中设置 9 个网箱 (0.9 m $\times$ 0.9 m $\times$ 0.9 m), 随机选取大小一致、活力较好的 23 日龄仔鱼各 1500 尾布放于每个网箱中开展养殖实验, 至

70 日龄实验结束。养殖实验设置 3 个处理(空白对照组 C,低水平环境丰容组 EL,高水平环境丰容组 EH),每个处理 3 个重复。实验所用海水为砂滤海水,育苗池内水位保持 0.8 m。采用流水培育,日换水量 100%—300%。实验期间 24 h 充气,仅在吸底前停气 0.5 h,投饵时不充气。为减少对实验鱼的干扰,每 2-3 d 吸底一次,每 3-5 d 清理一次网箱和环境丰容用构造物。实验期间(6-7 月)育苗池内水温随自然海水温度由(19.1 ± 0.1)℃逐渐升高至(23.3 ± 0.1)℃。鱼苗饵料系列为裂壶藻强化的卤虫无节幼体和粒径逐渐增大的配合饲料(鱼宝牌,日本林兼产业株式会社),每天投饵 2-4 次,饱食投喂,且保证每个网箱投喂量一致。

参照刘立明等^[16]、郭浩宇等^[17]的方法,对许氏平鲉仔、稚、幼鱼阶段进行划分:从鱼苗产出至背鳍、尾鳍等运动器官基本形成仔鱼期(约 0-25 日龄);奇鳍发育完全至全身披满鳞片为稚鱼期(约 26-55 日龄);幼鱼期则基本具备成鱼外部形态与生态习性(约 56 日龄以后至成鱼)。根据许氏平鲉发育时序,分别从各网箱随机选取数尾 23 日龄仔鱼(全长(0.979 ± 0.008) cm;体重(12.57 ± 0.35) mg)、48 日龄稚鱼(全长(1.590 ± 0.012) cm;体重(61.21 ± 1.40) mg)和 70 日龄幼鱼(全长(4.260 ± 0.094) cm;体重(1.36 ± 0.08) g)开展趋礁行为实验(详见 1.4)。

1.2 环境丰容用构造物的选择与设计

Naslund & Johnsson 指出,根据环境丰容的目的可将其划分为不同类别,对应不同的环境丰容措施,如向水体添加构造物(Physical structure)、人造植株、鹅卵石及改变光照、饵料条件等,其中向水体添加构造物是目前使用较普遍的一种方式^[13]。结合许氏平鲉在野外环境中的生态习性,本研究采用不同规格构造物(图 1)和人造植株(图 2)对养殖水体环境进行不同水平的环境丰容,具体参数列于表 1、表 2。环境丰容用构造物、人造植株、模型礁、趋礁行为实验水槽及养殖实验网箱材质均为 PVC,实验过程中未发现实验鱼对其有明显的排斥反应。

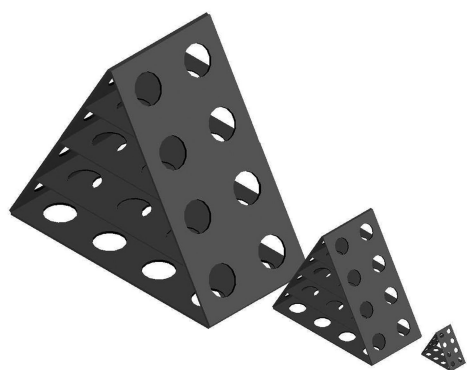


图 1 不同规格构造物模式图

Fig.1 Sketch of physical structures with different sizes



图 2 不同规格人造植株实物图

Fig.2 Picture of plastic plants with different sizes

表 1 不同规格构造物和人造植株的相关参数

Table 1 Parameters of physical structures and plastic plants with different sizes in the experiment

参数 Parameter	构造物 Physical structure			人造植株 Plastic plant	
	小型 Small	中型 Medium	大型 Large	小型 Small	大型 Large
高度 Height /cm	10	35	70	25	45
侧面长度 Length /cm	12	40	80	—	—
侧面宽度 Width /cm	6	20	40	—	—
侧面孔径 Diameter /cm	1.5	5	10	—	—
空方体积 Cube volume /dm ³	0.2	13.9	110.9	—	—

“—”表示无此参数

表 2 不同环境丰容水平的相关参数

参数 Parameter	构造物 Physical structure			人造植株 Plastic plant	
	小型 Small	中型 Medium	大型 Large	小型 Small	大型 Large
空白对照组 Control	0	0	0	0	0
低水平环境丰容组 Low-level enrichment	4	1	0	1	0
高水平环境丰容组 High-level enrichment	8	0	1	0	1

数字表示布设数量;小型构造物布设于网箱四角,中型、大型构造物及人造植株布设于网箱中央区域

1.3 趋礁行为实验水槽和模型礁的选择与设计

趋礁行为实验于灰色不透明水槽中开展,水槽规格 50 cm×30 cm×30 cm(长×宽×深),实验期间水位维持 15 cm。实验前用记号笔在水槽底部标记刻度,将其划分为不同区域(图 3),每区域面积相等,约为 250 cm²。以二维坐标对个体在水槽中的位置进行量化,礁区中心点坐标为(25, 0)。

本研究参照郭浩宇等^[14]、Xi 等^[15]的研究成果,结合目前实际应用的礁型,选取塔型礁和管型礁两种模型礁探究不同结构礁体对许氏平鲉仔、稚、幼鱼的诱集效果(图 4),具体参数列于表 3。

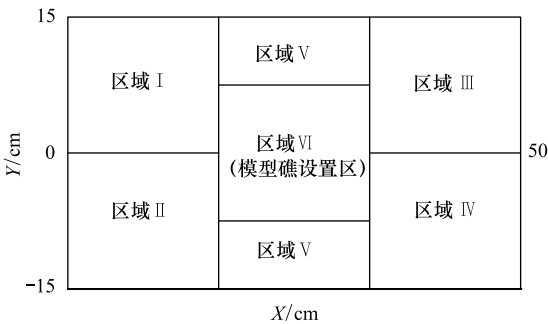


图 3 趋礁行为实验水槽模式图
Fig.3 Sketch of behavioral test tank

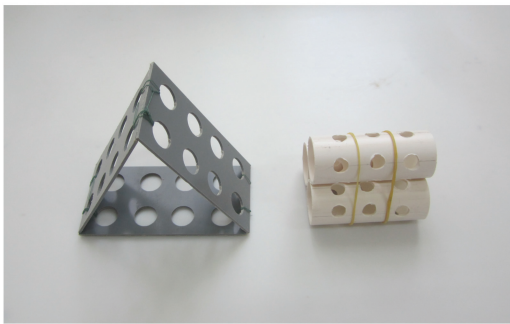


图 4 两种模型礁实物图
Fig.4 Picture of two kinds of artificial reef models

表 3 两种模型礁的相关参数

Table 3 Parameters of two kinds of artificial reef models					
参数 Parameter	塔型礁 Pyramid reef model	管型礁 Cylinder reef model	参数 Parameter	塔型礁 Pyramid reef model	管型礁 Cylinder reef model
高度 Height /cm	10	8	侧面孔径 Diameter of side /cm	1.5	1
侧面长度 Length /cm	12	—	圆管直径 Diameter of tube /cm	—	3
侧面宽度 Width /cm	6	—	空方体积 Cube volume /cm ³	187.1	169.6

“—”表示无此参数

1.4 趋礁行为实验设计

从每个网箱中随机捞出 10 尾体表无损伤、活力较好的个体作为实验鱼,将其置于无模型礁的趋礁行为实验水槽中,持续观察 1 h。1 h 后,在水槽指定位置放入 3 个模型礁,再持续观察 1 h。在 2 h 内,每 20 min 记录一次实验鱼在水槽中的位置坐标(以头部所在位置为准)。实验期间连续观察实验鱼在有模型礁和无模型礁时的行为反应。为避免对实验鱼行为产生干扰,观察、记录位置、拍照等操作均在水槽一侧设置的高架处进行。

1.5 数据统计与处理方法

参照何大仁等^[18]、陈勇等^[19]的方法,选取以下指标定量衡量许氏平鲉仔、稚、幼鱼的趋礁行为。

1) 实验鱼群重心位置 $G(X_G, Y_G)$

设有实验鱼 n 尾, 各个体瞬间位置为 $F_i(X_{Fi}, Y_{Fi}), i=1, 2, \dots, n$, 则鱼群的重心位置 $G(X_G, Y_G)$:

$$X_G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{Fi}; Y_G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{Fi}$$

2) 实验鱼群重心与模型礁的平均距离 D_{gr}

设模型礁位置为 $R(X_R, Y_R)$, 不同时刻实验鱼群重心位置为 $G_i(X_{Gi}, Y_{Gi})$, 记录次数为 m , 则:

$$D_{gr} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sqrt{(X_R - X_{Gi})^2 + (Y_R - Y_{Gi})^2}$$

3) 实验鱼个体与模型礁的平均距离 $D_{fr} D_{fr} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sqrt{(X_R - X_{Fi})^2 + (Y_R - Y_{Fi})^2}$ 4) 实验鱼个体间的平均距离 $D_{ff} D_{ff} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{1}{C_2^n} \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \sqrt{(X_{Fi} - X_{Fj})^2 + (Y_{Fi} - Y_{Fj})^2}$

5) 礁区实验鱼的平均分布率

设礁区每次分布有 n_i 尾实验鱼, 则:

$$\text{各区实验鱼的平均分布率} = \frac{\text{该区实验鱼个体数}}{\text{总个体数}} \times 100\%$$

$$\text{礁区实验鱼的平均分布率} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m n_i \times 100\%$$

采用 AutoCAD 2014 软件绘制实验装置模式图, Origin 8.5 软件绘制数据统计图。采用 SPSS 17.0 软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 若差异显著则进行 Duncan's 多重比较检验组间差异; 若数据不满足正态性或方差齐性, 先对数据进行适当转换, 再进行单因素方差分析; 若转换后仍不满足正态性或方差齐性, 则需进行非参数检验。 $P < 0.05$ 作为差异显著标准, $P < 0.01$ 作为差异极显著标准。统计结果均以平均值 $\pm$ 标准误(mean $\pm$ S.E.) 表示。

2 结果与分析

2.1 早期发育阶段许氏平鲈的行为特征

观察发现, 空白对照组与环境丰容组实验鱼行为无明显可察性差异, 需通过位置坐标对其进行量化, 但不同发育阶段实验鱼行为特征差异明显。仔、稚、幼鱼均喜栖于水槽中光线较弱的阴影区域, 且随着个体的生长发育, 这种习性逐渐增强。未放入模型礁前, 实验鱼常栖于水槽边缘, 游动不频繁, 或浮于水体中上层(仔鱼), 或静卧水底(稚、幼鱼)。至幼鱼期, 有较明显的结群游动现象。放入模型礁后, 仔鱼对礁体不敏感, 稚鱼趋性有所增强, 幼鱼则迅速聚集至礁区, 将其作为隐蔽场所。通常进入礁体内部, 有时挤入礁体之间的缝隙或形成的阴影区域。受外界干扰后, 仔鱼反应不明显, 稚鱼缓慢游至礁体内部或水槽四周边缘区域, 幼鱼则迅速钻入礁体内部进行躲避。

2.2 早期发育阶段许氏平鲈的趋礁行为

将不同发育阶段作为变量, 统计得到空白对照组实验鱼于不同礁型条件下在水槽各区的平均分布率(表 4)。不难看出, 未放入模型礁前, 早期发育阶段许氏平鲈在水槽中的分布呈现出不同特点。仔、稚、幼鱼在各区平均分布率的极大值与极小值分别为: 30.00%(I 区)与 2.78%(VI 区); 22.22%(II 区)与 11.67%(VI 区); 25.56%(III 区)与 1.11%(VI 区)。幼鱼在 VI 区的平均分布率与其他各区均差异显著($P < 0.01$), 仔鱼在 VI 区的平均分布率与 I 区、II 区、III 区差异显著($P < 0.01$), 而稚鱼仅与 II 区差异显著($P < 0.05$)。对仔、稚、幼鱼在 VI 区的平均分布率进行单因素方差分析结果显示, 稚鱼显著高于仔、幼鱼($P < 0.01$)。以上结果表明, 未放入模型礁前, 稚鱼在水槽中的分布较分散, 仔、幼鱼则集中于水槽四周, 中央区域(VI 区)分布极少。放入模型礁后, 仔、稚鱼在礁区(VI 区)的平均分布率没有显著变化($P > 0.05$); 幼鱼则由 1.11% 分别增大至 47.78%(塔型

礁)和 54.44%(管型礁),有无模型礁的平均分布率差异极显著($P<0.01$),但两种模型礁的集鱼效果无显著差异($P>0.05$)。

表 4 许氏平鲈于不同礁型条件下在水槽各区的平均分布率

Table 4 Average distribution rate of *S. schlegelii* within different artificial reef model conditions

时期 Stage	礁型 Type	区域 Area					
		I	II	III	IV	V	VI
仔鱼期 Larvae	无模型礁	30.00±4.20a	22.78±4.56ab	21.67±4.37ab	10.56±2.35c	12.22±3.58bc	2.78±1.09c
	塔型礁	18.89±3.89	4.44±2.94	32.22±4.94	35.56±2.94	7.78±3.64	1.11±1.11
	管型礁	36.67±4.71	37.78±4.65	11.11±3.09	8.89±3.51	4.44±1.76	1.11±1.11
稚鱼期 Post-larvae	无模型礁	19.44±2.62ab	22.22±5.08a	18.33±3.16ab	12.22±2.86b	16.67±2.87ab	11.67±2.18b
	塔型礁	14.44±3.77	22.22±2.78	14.44±3.38	17.78±3.64	18.89±5.12	12.22±4.34
	管型礁	17.78±2.78	20.00±3.33	16.67±4.71	22.22±3.24	15.56±2.94	7.78±2.78
幼鱼期 Juvenile	无模型礁	20.56±3.38ab	12.78±2.53b	25.56±3.36a	17.78±3.58ab	22.22±2.63a	1.11±0.76c
	塔型礁	12.22±2.78	4.44±2.42	12.22±4.65	10.00±3.33	13.33±5.77	47.78±11.03
	管型礁	5.56±2.42	3.33±2.36	17.78±3.64	8.89±3.89	10.00±3.73	54.44±7.29

表中区域 I、II、III、IV、V、VI 分别表示行为实验水槽划分中的对应区域,其中 VI 区为模型礁设置区;数值后方不同小写字母表示同一发育阶段同一处理组实验鱼在不同区域的平均分布率差异显著($P<0.05$)

2.3 环境丰容对早期发育阶段许氏平鲈趋礁行为的影响

由图 5 可见,不同环境丰容水平对许氏平鲈稚鱼在 VI 区的平均分布率无显著影响($P>0.05$),但幼鱼则表现出不同行为特征。未放入模型礁前,EH 组幼鱼在 VI 区的平均分布率显著高于 C 组($P<0.05$),EL 组与 C 组、EH 组均无显著差异($P>0.05$)。放入模型礁后,各处理组幼鱼在 VI 区的平均分布率:EL 组>C 组>EH 组,其中 EL 组与 EH 组差异显著($P<0.05$)。

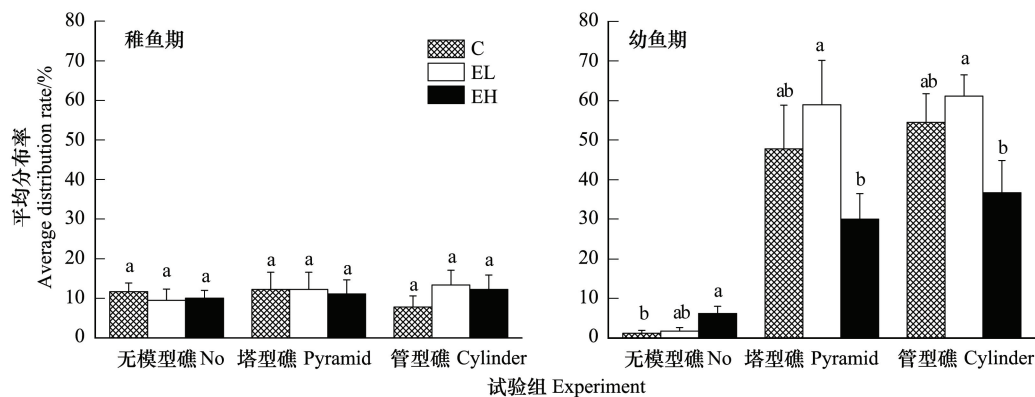


图 5 不同环境丰容水平下许氏平鲈在模型礁区 (VI 区) 的平均分布率

Fig.5 Average distribution rate in area VI of *S. schlegelii* at different environmental enrichment levels

C:空白对照组,control;EL:低水平环境丰容组,low-level environmental enrichment;EH:高水平环境丰容组,high-level environmental enrichment

放入模型礁后,实验鱼群体重心轨迹发生明显变化,且群体重心大都在模型礁附近移动,环境丰容组尤为明显(图 6)。单因素方差分析结果显示,环境丰容 25 d(即 48 日龄的稚鱼)对实验鱼群体重心与模型礁的平均距离 D_{gr} 、个体与模型礁的平均距离 D_{fr} 、个体间的平均距离 D_{ff} 均无显著影响($P>0.05$)(图 7)。环境丰容 47 d(即 70 日龄的幼鱼),未放入模型礁前,各处理组 D_{gr} 与 D_{fr} 大小顺序为:EL 组>C 组>EH 组,其中 EL 组、C 组均与 EH 组差异显著($P<0.05$);放入模型礁后,各处理组 D_{gr} 无显著差异($P>0.05$), D_{fr} 差异较明显,大小顺序为:EL 组<C 组<EH 组, D_{ff} 大小顺序为:EL 组<C 组<EH 组,其中 EL 组与 EH 组差异显著($P<0.05$)(图 7)。

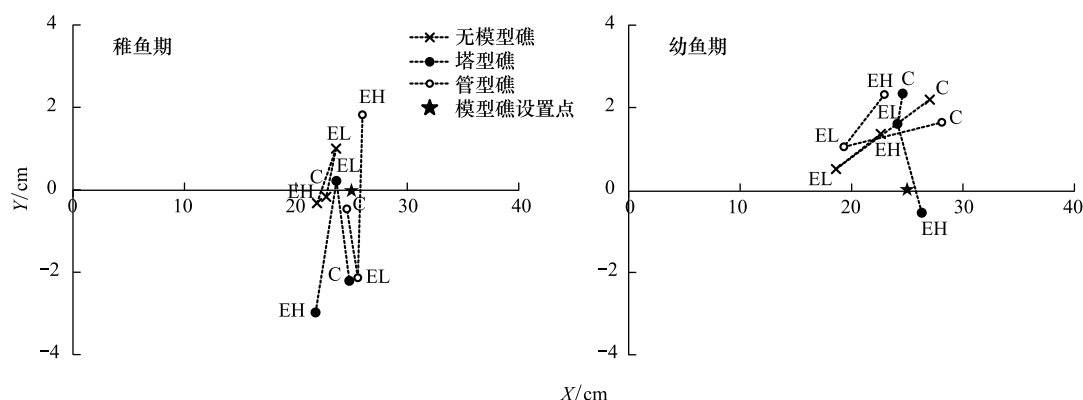


图 6 不同环境丰容水平下许氏平鲈群体重心移动轨迹

Fig.6 Changes of barycenter of *S. schlegelii* at different environmental enrichment levels

图中横纵坐标表示实验鱼在行为实验水槽中的位置

3 讨论

3.1 早期发育阶段许氏平鲈的行为特征

处于早期发育阶段的仔、稚、幼鱼,其身体形态、感觉、运动、消化等系统均处于快速生长期,这些器官的发生、发育与其存活、生长及行为习性的变化等密切相关。研究表明,许氏平鲈在早期发育阶段视觉系统和运动能力均发生剧烈变化,仔鱼具弱趋光性,游泳能力较弱,活动于水体中上层;随着鱼体生长,视锥视杆细胞逐渐增多,运动器官快速发育,游泳能力极大增强,转入水体中下层活动;至幼鱼期,各器官发育基本完成,具备成鱼生态习性^[16,20]。本研究结果显示,未放入模型礁前,23 日龄仔鱼与 70 日龄幼鱼多集中于水槽四周,中央区域(VI 区)分布极少,而 48 日龄稚鱼在水槽中呈分散分布。分析认为,本研究所用 23 日龄仔鱼趋光性渐已消失,视觉系统逐渐发育,已转入水体较暗区域活动,但游泳能力相对较弱,活动不频繁,因此集中分布于水槽四周区域。随着鱼体发育,稚鱼视觉系统进一步完善,此时游泳能力极大增强,活动较频繁,感觉系统与运动系统相协调,从而表现出分散分布的特征。至幼鱼期,已基本具备成鱼生态习性,警惕性提高,活动相对较少,喜栖于水槽四周阴影区域。基于本研究观察到的行为特征,结合刘立明等^[16]、席丹等^[20]的研究结果,总结归纳了早期发育阶段许氏平鲈行为习性的变化规律(图 8)。

3.2 早期发育阶段许氏平鲈的趋礁行为

本研究结果表明,两种结构的模型礁均对 70 日龄幼鱼(全长(4.260 ± 0.094) cm;体重(1.36 ± 0.08) g)产生了良好的诱集效果,二者对幼鱼的聚集率无显著差异,这与何大仁等^[18]、陈勇等^[19]的研究结果基本一致。在投放人工鱼礁进行资源修复与增殖时,这两种模型礁的结构均可作为人工鱼礁的选型参考,同时陈勇等认为,最好以遮盖效果和阴影效果较好的礁型为首选^[19]。

两种模型礁并未对许氏平鲈仔、稚鱼产生明显的诱集效果。分析认为,仔、稚鱼尚处于身体形态、器官剧烈变化的关键时期,运动、感觉等系统发育不成熟,趋礁性不强,此发育阶段未具备成鱼的生态习性,因而模型礁未产生明显的集鱼效果。放入塔型礁后,仔、稚、幼鱼在礁区的平均分布率分别为 1.11%、12.22%、47.78% (管型礁分别为 1.11%、7.78%、54.44%),随着鱼体生长发育,实验鱼的趋礁性逐渐增强。陈勇等比较了几种模型礁对较大规格许氏平鲈(体长(12.2 ± 0.5) cm;体重(26.4 ± 0.1) g)的诱集效果,礁区幼鱼的平均分布率达 56.7%—90%^[19],郭浩宇等也得到类似结果^[14]。分析认为,除模型礁结构等影响外,实验鱼的趋礁性与礁区聚集率密切相关。

3.3 环境丰容对早期发育阶段许氏平鲈趋礁行为的影响

围绕环境丰容增加养殖鱼类福利等已有大量相关研究^[21-25],近年来针对环境丰容能否增加放流鱼类福

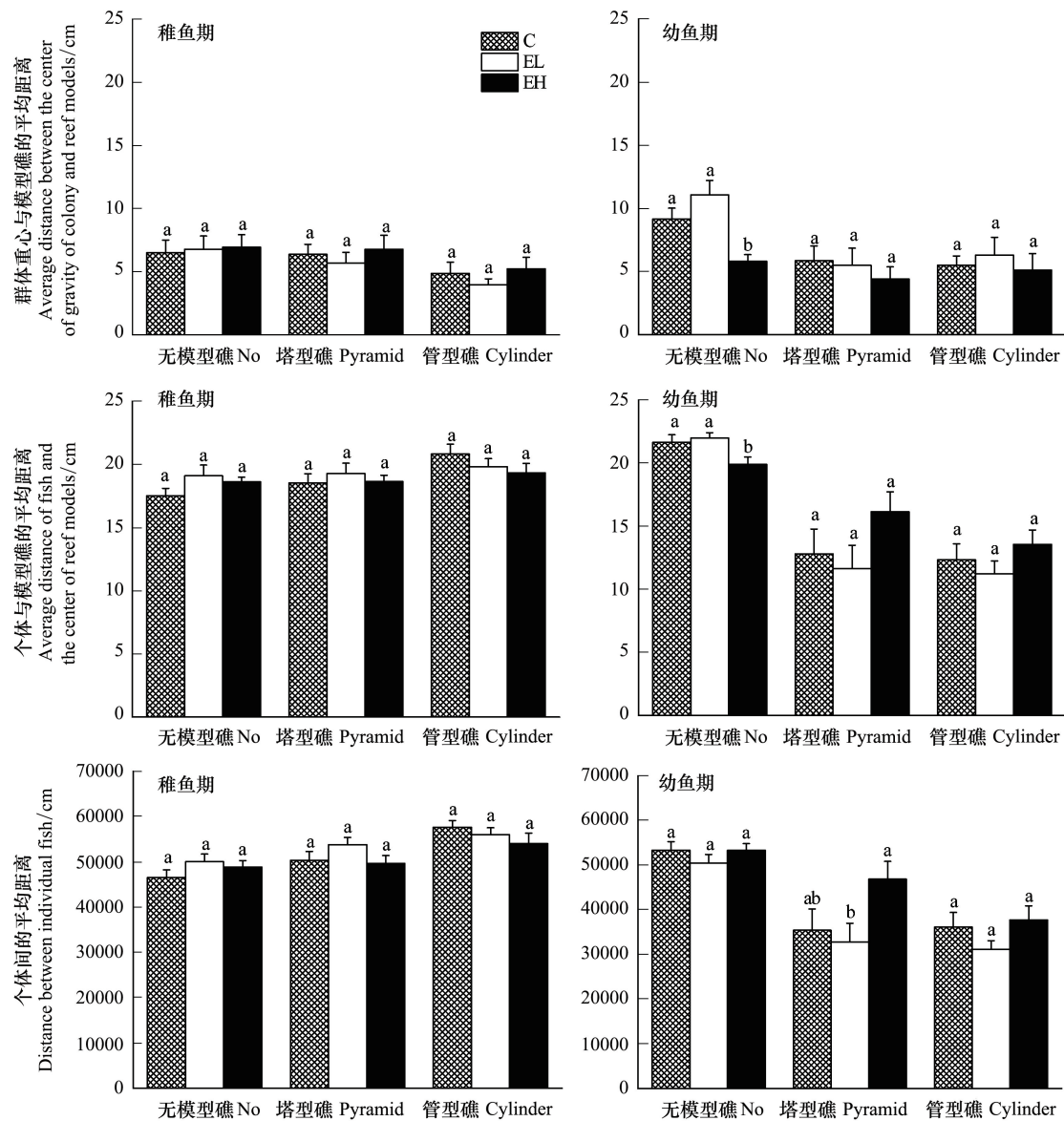


图7 不同环境丰容水平下许氏平鲈的趋礁行为

Fig.7 Distribution of *S. schlegelii* at different environmental enrichment levels

利、提高放流存活率的研究也多有报道^[26-30],已逐渐成为鱼类行为生态学领域的热点,但国内相关研究报道极少。本研究初步探究了不同环境丰容水平对早期发育阶段许氏平鲈趋礁行为的影响。由于环境丰容用构造物和人造植株均设置于水体中下层,尚在水体中上层活动的仔、稚鱼与构造物接触较少,因此环境丰容措施未对实验稚鱼的趋礁行为产生显著影响。而幼鱼已基本具备成鱼生态习性(图8),活动于水体底层,且具有强烈的趋礁性,构造物和人造植株的设置适应了其在自然环境中最基本的需求,幼鱼与构造物间的相互作用增加,势必对其生长发育与行为可塑性产生影响。

鱼类行为是其“胆量”(Boldness)的外在反映,Sneddon认为可将鱼类“胆量”定义为个体在实验水槽空白区域停留时间的长短^[31]。Castanheira等总结了鱼类反应模式(Coping style)之间的联系,指出与被动、胆小(Shy)的个体相比,主动、胆大(Bold)的个体虽可能具有较强的竞争能力,但其行为多样性和神经可塑性较差^[32],在复杂多变的自然环境中,具有较强的行为和神经可塑性对放流后的存活与生长至关重要。近年来国外针对环境丰容对鱼类胆量的影响已开展了许多研究,但由于鱼类种间差异、环境丰容方式及丰容水平等不

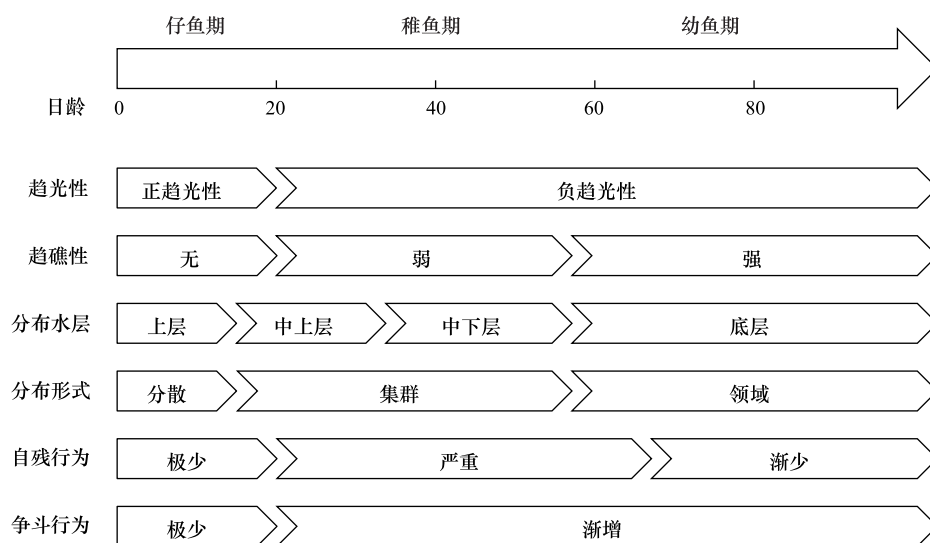


图 8 早期发育阶段许氏平鲈行为习性变化规律

Fig.8 Behavioral habits of *S. schlegelii* in early developmental stages

同常会得出相左的结果,如环境丰容会使大西洋鳕 (*Gadus morhua*)^[33]、大西洋鲑 (*Salmo salar*)^[34] 胆量减小,但会使硬头鲂 (*Oncorhynchus mykiss*)^[35]、印度鲃 (*Tor putitora*)^[11] 胆量增大。基于此,本研究初步探究了环境丰容水平对幼鱼胆量的影响,结果显示未放入模型礁前 EH 组幼鱼在中央区域 (VI 区) 的平均分布率最大而群体与水槽中心点的距离最小,EL 组则相反,暗示各处理组幼鱼胆量大小可排序为:EL 组 < C 组 < EH 组,说明环境丰容水平会对幼鱼胆量产生影响,分析认为丰容水平的差异可能是造成相关研究报道论点不一的重要原因。在本研究实验条件下,低水平环境丰容对提高幼鱼的行为可塑性更有利。

对于许氏平鲈等趋礁性鱼类而言,幼鱼放流至野外后,趋礁性强弱在一定程度上决定了其能否有效避敌、适应野外复杂的环境。结果表明,放入模型礁后各处理组幼鱼在礁区 (VI 区) 的平均分布率:EL 组 > C 组 > EH 组, D_{ir} 与 D_{ir} 大小顺序为:EL 组 < C 组 < EH 组,表明低水平环境丰容可有效增强许氏平鲈幼鱼的趋礁行为,但高水平环境丰容可能会产生消极影响,这一结果与对幼鱼胆量的影响基本一致。分析认为,羞怯的个体对于隐蔽物具有更高的依赖性,寻找隐蔽物的倾向更强,且在隐蔽物中停留时间更长,反映于外在的行为表现则是具有更强的趋礁行为。环境丰容会使水体环境复杂程度增加,这意味着其多样性和不可预测性极大增加,信息量极大丰富,鱼类为应对“挑战”,需对自身行为、生理做出适应性调整。Sorensen 等认为,当鱼体压力和皮质醇含量较低时,对认知起刺激作用,含量过高则可能抑制鱼类的认知和行为^[36],暗示可能存在一个“最佳压力水平”,可对鱼类行为产生最强的刺激作用。目前虽鲜有环境丰容水平影响鱼类皮质醇含量的相关报道,但许多研究表明,相对于空白对照组,适当的环境丰容可使鱼体皮质醇含量显著降低^[10,23],暗示不同环境丰容水平可能通过影响鱼体内在压力 (皮质醇水平) 进而作用于外在行为。Castanheira 等认为鱼类胆量与其内在生理 (神经可塑性、HPI 轴反应、耗氧量等) 及外在行为 (冒险行为、攻击行为、行为多样性等) 存在极为密切的相关性^[32],而许氏平鲈幼鱼的胆量与趋礁行为的同步性亦证实了这一观点。综上,利用不同构造物提高水体环境的空间异质性,鱼体内在生理将对复杂的环境做出适应性调整,胆量在此过程中逐渐发生变化,并最终对鱼类行为产生影响。

本研究采用室内行为观测方法,通过环境丰容这一行为驯化手段,使许氏平鲈幼鱼趋礁行为得以增强,该方法将有助于放流鱼类更好地适应自然环境,增强鱼礁的集鱼效果和庇护效应。今后,需通过海上标记放流等追踪监测实验,以进一步确认环境丰容对增殖放流鱼类的行为驯化作用。

参考文献 (References):

- [1] 汪振华, 章守宇, 陈清满, 许强, 王凯. 马鞍列岛岩礁生境鱼类群落生态学. I. 种类组成和多样性. 生物多样性, 2012, 20(1): 41-50,

117-119.

- [2] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望. 水产学报, 2016, 40(7): 1133-1140.
- [3] 郑延璇. 人工鱼礁流场效应与物理稳定性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [4] 吴忠鑫, 张磊, 张秀梅, 张沛东, 李文涛. 荣成俚岛人工鱼礁区游泳动物群落特征及其与主要环境因子的关系. 生态学报, 2012, 32(21): 6737-6746.
- [5] 任彬彬, 袁伟, 孙坚强, 陈瑞盛, 王俊. 莱州湾金城海域鱼礁投放后大型底栖动物群落变化. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1863-1870.
- [6] 陈勇, 杨军, 田涛, 刘永虎, 尹增强, 陈雷, 王刚. 獐子岛海洋牧场人工鱼礁区鱼类资源养护效果的初步研究. 大连海洋大学学报, 2014, 29(2): 183-187.
- [7] 郭书新, 高东奎, 张秀梅, 李文涛, 张沛东. 青岛崂山青山湾人工鱼礁区及附近海域鱼卵仔稚鱼种类组成与数量分布. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1984-1992.
- [8] D'Anna G, Giacalone V M, Fernández T V, Vaccaro A M, Pipitone C, Mirto S, Mazzola S, Badalamenti F. Effects of predator and shelter conditioning on hatchery-reared white seabream *Diplodus sargus* (L., 1758) released at sea. Aquaculture, 2012, 356-357: 91-97.
- [9] Einfalt L M, Wojcieszak D B, Wahl D H. Behavior, growth and habitat selection of hatchery esocids reared with artificial vegetation. Transactions of the American Fisheries Society, 2013, 142(2): 345-352.
- [10] Näslund J, Rosengren M, Del Villar D, Gansel L, Norrgård J R, Persson L, Winkowski J J, Kvingedal E. Hatchery tank enrichment affects cortisol levels and shelter-seeking in Atlantic salmon (*Salmo salar*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2013, 70(4): 585-590.
- [11] Ullah I, Zuberi A, Khan K U, Ahmad S, Thörnqvist P O, Winberg S. Effects of enrichment on the development of behaviour in an endangered fish mahseer (*Tor putitora*). Applied Animal Behaviour Science, 2017, 186: 93-100.
- [12] Johnsson J I, Brockmark S, Näslund J. Environmental effects on behavioural development consequences for fitness of captive-reared fishes in the wild. Journal of Fish Biology, 2014, 85(6): 1946-1971.
- [13] Näslund J, Johnsson J I. Environmental enrichment for fish in captive environments; effects of physical structures and substrates. Fish and Fisheries, 2016, 17(1): 1-30.
- [14] 郭浩宇, 张秀梅, 高天翔. 人工隐蔽物及投喂频率对许氏平鲈幼鱼生长和行为的影响. 中国水产科学, 2015, 22(2): 319-331.
- [15] Xi D, Zhang X M, Lü H J, Zhang Z X. Cannibalism in juvenile black rockfish, *Sebastes schlegelii* (Hilgendorf, 1880), reared under controlled conditions. Aquaculture, 2017, 479: 682-689.
- [16] 刘立明, 姜海滨, 王茂剑, 杜荣斌. 黑鲷仔、稚、幼鱼生长、发育与成活率变化的研究. 中国海洋大学学报, 2013, 43(3): 25-31.
- [17] 郭浩宇, 张秀梅, 张宗航, 李超. 许氏平鲈仔、稚鱼的摄食特性及幼鱼胃排空率. 水产学报, 2017, 41(2): 285-296.
- [18] 何大仁, 施养明. 鱼礁模型对黑鲷的诱集效果. 厦门大学学报: 自然科学版, 1995, 34(4): 653-658.
- [19] 陈勇, 刘晓丹, 吴晓郁, 石国锋. 不同结构模型礁对许氏平鲈幼鱼的诱集效果. 大连水产学院学报, 2006, 21(2): 153-157.
- [20] 席丹. 许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)早期发育生长模式与自残行为研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [21] Kadry V O, Barreto R E. Environmental enrichment reduces aggression of pearl cichlid, *Geophagus brasiliensis*, during resident-intruder interactions. Neotropical Ichthyology, 2010, 8(2): 329-332.
- [22] Persson L, Alanärä A. The effect of shelter on welfare of juvenile Atlantic salmon *Salmo salar* reared under a feed restriction regimen. Journal of Fish Biology, 2014, 85(3): 645-656.
- [23] Barcellos L J G, Kreutz L C, Quevedo R M, Da Rosa J G S, Koakoski G, Centenaro L, Pottker E. Influence of color background and shelter availability on jundiá (*Rhamdia quelen*) stress response. Aquaculture, 2009, 288(1/2): 51-56.
- [24] Batzina A, Karakatsouli N. The presence of substrate as a means of environmental enrichment in intensively reared gilthead seabream *Sparus aurata*: growth and behavioral effects. Aquaculture, 2012, 370-371: 54-60.
- [25] Batzina A, Dalla C, Papadopoulou-Daifoti Z, Karakatsouli N. Effects of environmental enrichment on growth, aggressive behaviour and brain monoamines of gilthead seabream *Sparus aurata* reared under different social conditions. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2014, 169: 25-32.
- [26] Brockmark S, Neregård L, Bohlin T, Björnsson B T, Johnsson J I. Effects of rearing density and structural complexity on the pre-and postrelease performance of Atlantic salmon. Transactions of the American Fisheries Society, 2007, 136(5): 1453-1462.
- [27] Fast D E, Neeley D, Lind D T, Johnston M V, Strom C R, Bosch W J, Knudsen C M, Schroder S L, Watson B D. Survival comparison of spring Chinook salmon reared in a production hatchery under optimum conventional and seminatural conditions. Transactions of the American Fisheries Society, 2008, 137(5): 1507-1518.
- [28] Tatara C P, Riley S C, Scheurer J A. Growth, survival, and habitat use of naturally reared and hatchery steelhead fry in streams: effects of an enriched hatchery rearing environment. Transactions of the American Fisheries Society, 2009, 138(3): 441-457.
- [29] Brockmark S, Adriaenssens B, Johnsson J I. Less is more: density influences the development of behavioural life skills in trout. Proceedings:

- Biological Sciences, 2010, 277(1696): 3035-3043.
- [30] Roberts L J, Taylor J, Gough P J, Forman D W, Garcia De Leaniz C. Silver spoons in the rough: can environmental enrichment improve survival of hatchery Atlantic salmon *Salmo salar* in the wild? Journal of Fish Biology, 2014, 85(6): 1972-1991.
- [31] Sneddon L U. The bold and the shy: individual differences in rainbow trout. Journal of Fish Biology, 2003, 62(4): 971-975.
- [32] Castanheira M F, Conceição L E C, Millot S, Rey S, Bégout M L, Damsgård B, Kristiansen T, Höglund E, Øverli Ø, Martins C I M. Coping styles in farmed fish: consequences for aquaculture. Reviews in Aquaculture, 2017, 9(1): 23-41.
- [33] Salvanes A G V, Braithwaite V A. Exposure to variable spatial information in the early rearing environment generates asymmetries in social interactions in cod (*Gadus morhua*). Behavioral Ecology and Sociobiology, 2005, 59(2): 250-257.
- [34] Roberts L J, Taylor J, de Leaniz C G. Environmental enrichment reduces maladaptive risk-taking behavior in salmon reared for conservation. Biological Conservation, 2011, 144(7): 1972-1979.
- [35] Lee J S F, Berejikian B A. Effects of the rearing environment on average behaviour and behavioural variation in steelhead. Journal of Fish Biology, 2008, 72(7): 1736-1749.
- [36] Sørensen C, Johansen I B, Øverli Ø. Neural plasticity and stress coping in teleost fishes. General and Comparative Endocrinology, 2013, 181: 25-34.