

人工鱼礁模型和大型海藻对许氏平鲷和 大泷六线鱼幼鱼的诱集作用

刘鸿雁¹, 吕洪斌¹, 张沛东¹, 李文涛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, 山东 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, 山东 青岛 266072)

摘要: 为了探究大型海藻和人工鱼礁对鱼类的诱集作用, 依据崂山湾人工鱼礁区游泳动物和大型海藻调查结果, 以海黍子、孔石莼、带形蜈蚣藻、石花菜和小珊瑚藻5种优势藻类, 许氏平鲷和大泷六线鱼2种优势鱼类以及人工鱼礁模型为研究对象, 于室内实验水槽观察了许氏平鲷和大泷六线鱼幼鱼在海藻和模型礁中的行为反应和分布。结果显示, 水槽中未投放模型礁和海藻时, 实验鱼密集出现在水槽边缘区(A9), 分布率分别为 $75.71\% \pm 7.79\%$ 和 $73.63\% \pm 4.41\%$ 。放入模型礁和海藻丛后, 许氏平鲷和大泷六线鱼出现短暂的排斥反应, 然后迅速聚集其中; 2种鱼对带形蜈蚣藻的响应时间最短[(12.75~21.00) s], 对模型礁的响应时间最长[(66.50~151.25) s]; 带形蜈蚣藻聚集许氏平鲷用时最短[(151.50±8.14) s], 海黍子聚集大泷六线鱼用时最短[(56.00±2.53) s]; 大泷六线鱼对模型礁的聚集时间为(216.25±5.59) s, 远低于许氏平鲷(1343.50±5.38) s; 2种鱼在模型礁中的停留时间远长于海藻丛, 且大泷六线鱼的停留时间(211.85±7.96) s长于许氏平鲷(199.75±16.82) s。海藻丛和模型礁对2种岩礁性幼鱼的诱集效果明显, 实验区幼鱼的分布率由未投放模型礁和海藻前的0.91%~8.78%上升到4.21%~31.42%; 高密度带形蜈蚣藻和海黍子的诱集效果最好, 对许氏平鲷和大泷六线鱼的聚集率分别达到 $30.42\% \pm 1.14\%$ 和 $31.42\% \pm 1.74\%$, 而低密度小珊瑚藻的诱集作用不明显。

关键词: 大型海藻; 人工鱼礁; 许氏平鲷; 大泷六线鱼; 分布率; 聚集率

中图分类号: S 937.3

文献标志码: A

人工鱼礁是指利用鱼类等海洋生物的趋性(如趋触性、趋流性等), 为聚集鱼类和其他海洋生物而在海域中设置的人工构造物^[1]。人工鱼礁的投放能够提高海区空间异质性, 利于大型底栖藻类[红藻(Rhodophyta)、绿藻(Chlorophyta)和褐藻(Phaeophyta)等]附着生长, 底栖海藻作为海洋初级生产者, 不仅可以支撑起整个海藻场的食物网^[2], 而且其复杂的栖息空间成为近岸众多海洋生物的避护所和产卵场^[3]。不同种类的底栖藻类辅以底栖动物、游泳动物以及浮游生物等众多群落共同构成了近岸海藻场生态系统, 该系

统拥有巨大的初级生产力, 在近岸海域发挥着重要的生态和生物功能^[4-5]。目前, 国内外对人工鱼礁诱集效果的研究已有许多报道, 多涉及投礁海区的资源调查^[6-10]和室内模型实验^[11-17], 而对鱼礁附着生物, 尤其是一些大型底栖藻类对鱼类的诱集效果却鲜有报道^[18]。

许氏平鲷(*Sebastes schlegelii*)和大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)均为我国北方沿海重要的岩礁性经济种。近年来由于过度捕捞, 环境污染不断加剧, 近岸海洋生态遭到严重破坏, 野生生物资源急剧减少^[13, 19]。因此, 采取必要的保

收稿日期: 2016-12-07 修回日期: 2017-04-20

资助项目: 国家自然科学基金(31172447, 31572227); 国家海洋公益性行业科研专项(201405010)

通信作者: 张秀梅, E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn

护措施为典型岩礁性鱼类营造适宜的栖息环境显得尤为重要^[14]。本研究依据崂山青山湾人工鱼礁区大型底栖海藻和游泳动物调查结果^[20-21], 以海黍子(*Heterosiphonia japonica*)、孔石莼(*Ulva pertusa*)、带形蜈蚣藻(*Grateloupia turuturu*)、石花菜(*Gelidium amansii*)和小珊瑚藻(*Corallina pilulifera*)5种优势藻类以及许氏平鲷和大泷六线鱼2种优势鱼类为研究对象, 比较观察人工鱼礁和底栖大型海藻对许氏平鲷和大泷六线鱼幼鱼的诱集效果, 定量解释大型海藻与岩礁性鱼类之间的相互关系, 为人工鱼礁、海藻场构建和渔业资源养护提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验鱼驯养

实验用鱼为青岛崂山青山湾海域采捕的许氏平鲷和大泷六线鱼幼鱼, 许氏平鲷平均体长为(8.89±0.51) cm, 平均体质量为(24.63±5.47) g, 大泷六线鱼平均体长为(8.19±0.6) cm, 平均体质量为(9.11±2.48) g。选取无损伤个体, 在养殖池内暂养。暂养期间水温为(19.04±0.68) °C, 盐度为31.18±0.04, pH为7.95±0.03, 光照为10.8 lx。养殖池内连续充气, 以保证溶解氧含量维持在5 mg/L以上, 暂养期间不喂食。

1.2 实验装置

实验于2015年5月下旬至8月初, 在青岛金海富源水产开发有限公司青山湾育苗场的实验水槽中进行。水槽规格为2.24 m×1.30 m×0.90 m (长×宽×高)。水槽底部用马克笔划分为9个区域(编号A1~A9, 图1), 其中A9为边缘区, A1、A4、A5、A8为实验区域, 用于放置模型礁和海

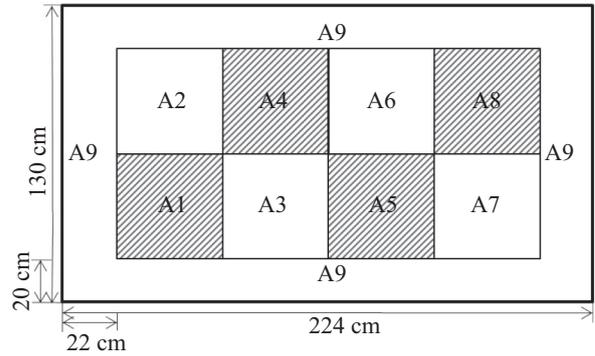


图1 实验水槽示意图(阴影部分为实验区)

Fig. 1 Sketch of the tank (the shaded part is test area)

藻丛(图2), A2、A3、A6、A7为空白对照区。实验用水为砂滤海水, 实验期间水温、盐度、pH以及光照等与暂养期间一致, 水槽水深60 cm。水槽上方固定摄像机, 以监测水槽内实验幼鱼的活动。其他仪器设备包括数码相机(Canon, EOS 5D Mark III)、多参数水质检测仪(YSI-650)、Hobo光照记录仪(UA-002-64)及充气泵等。

1.3 实验方法

将许氏平鲷和大泷六线鱼幼鱼在养殖池内暂养7 d后, 分别随机选取60尾开始实验。实验期间不充气不投饵, 尽可能减少外部条件的影响。实验包括3组, 分别为只有实验鱼的对照组、放入模型礁的实验组1以及放入海藻的实验组2。实验组1是将模型礁放置在A1、A4、A5和A8 4个实验区, 每个实验区各放置1个模型礁, 模型礁为35 cm×35 cm×30 cm (长×宽×高)钢筋框架结构, 内部用渔网平均隔离成9个网洞来模拟自然礁体孔洞; 实验组2是将每种大型海藻的成体固定在不锈钢制立体框架(长35 cm, 宽35 cm, 高30 cm, 图2)上, 每个框架分别固定10、15、



图2 模型礁(a)和海藻丛(b)结构图

Fig. 2 The diagram of reef (a) and macroalgae cluster (b)

20和25株海藻来模拟海区不同的海藻密度,将4个框架按照海藻密度由低到高的顺序依次放置在A1、A4、A5和A8 4个实验区内,根据海黍子、孔石莼、带形蜈蚣藻、石花菜和小珊瑚藻5种海藻在自然海区的旺发时期,依次进行实验。实验观测时间为8:00—20:00,实验过程全程录像,每隔30 min拍照1次以记录实验幼鱼的分布情况。一天实验结束后投饵,次日清晨实验前清理残饵,使幼鱼适应一段时间后再开始实验,每组实验连续观察3 d,每次实验均在A8和A9之间的角落区域投放实验鱼。为了避免实验鱼对鱼礁和海藻丛产生适应性反应,每次实验进行到第10天时更换全部的60尾实验鱼,继续开展实验。

1.4 统计与分析方法

采用以下指标来分析模型礁和大型海藻对实验鱼的诱集效果。

平均分布率(mean distribution rate, MDR)^[12, 17]表示某观察区实验鱼的平均分布数量与实验鱼总数量之间的比值,公式:

$$MDR(\%) = \frac{\sum_{i=1}^m M_i}{mM} \times 100 \quad (1)$$

式中, M_i 为观察对象第*i*次在某区的分布数量; M 为实验对象数; m 为观察次数。

平均聚集率(mean gathered rate, MGR)^[22]表示投放礁或海藻丛后,每天某个固定时间幼鱼在模型礁或海藻丛的聚集数量与实验幼鱼总数量的比值,公式:

$$MGR(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{nN} \times 100 \quad (2)$$

式中, N_i 为各固定时间点第*i*次的聚集数; N 为实验对象数; n 为实验记录数。

响应时间(response time)为从实验开始到第1尾实验鱼进入模型礁或海藻丛的时间,反映的是实验鱼的敏感程度。

聚集时间(aggregation time)为从实验开始到没有实验鱼进入模型礁或海藻丛的时间,反映的是模型礁或海藻丛对实验鱼吸引力的大小。

停留时间(dwelling time)为实验开始后实验鱼进入模型礁或海藻丛再游出所经历的时间,反映的是实验鱼对模型礁和海藻丛的忠诚度。

采用SPSS 19.0软件对相关数据进行分析,显著性水平为 $\alpha=0.05$,图件绘制采用Excel 2010软件。

2 结果

2.1 实验鱼的行为反应

许氏平鲈幼鱼的行为特征 对许氏平鲈幼鱼的行为观察发现,对照组幼鱼放入水槽后会迅速向A4和A9之间的角落区域游动,多数停留在水槽边缘以及光线较弱的角落里,活动不频繁;适应1~2 h后,少数幼鱼开始在实验区游动,但出现次数较少,停留时间也较短。放入模型礁后,幼鱼对刚放入的鱼礁出现一定的排斥(恐惧)反应,适应5~8 min后,个别幼鱼会向礁体做试探性游动,随着时间的延长,游向鱼礁的幼鱼数量逐渐增多,且主要分布在鱼礁内部,在鱼礁内部的幼鱼达到相对饱和后,内部个体开始阻止外来个体进入,表现出明显的领域行为。放入海藻丛后,幼鱼也会对海藻丛产生相应的排斥(恐惧)反应,但不如鱼礁模型明显,仅在适应2~3 min后,个别幼鱼就开始向海藻丛做试探性游动,在海藻丛中的活动能力明显增强。随着时间的延长,幼鱼开始在4个实验区之间来回穿梭,也有部分个体停留在海藻丛上方,与鱼礁模型类似,进入海藻丛的幼鱼也会表现出明显的领域行为。在实验进行到第2和第3天时,幼鱼对模型礁和海藻丛的适应时间越来越短,活动能力也越来越强,但在水槽边缘和角落区域始终分布着一定数量的幼鱼。

大泷六线鱼幼鱼的行为特征 对大泷六线鱼幼鱼的行为观察发现,对照组幼鱼放入水槽后随即停留于投放区(A8和A9之间的角落区域),同样栖息在水槽边缘及光线较弱的角落里;适应10 min左右,幼鱼开始集群在水槽边缘游动,少数个体在整个水槽内游动,活动范围和活动能力均大于许氏平鲈。放入模型礁后,幼鱼也会有一定的排斥反应,表现为迅速游动,聚集成群,但仅在适应1 min后便开始在礁体之间来回游动,此时边缘区的幼鱼数量明显减少;大泷六线鱼的领域行为也明显强于许氏平鲈,表现为幼鱼激烈追逐外来个体后迅速游回礁体中。放入海藻丛后,幼鱼仅适应30 s后便向海藻丛游动,活动也更加剧烈,常常撕扯海藻,游动时间变长;由于大泷六线鱼较许氏平鲈体细长,多数幼鱼会钻入藻丛,在藻丛底部穿梭,静止时停留在底部被海藻丛完全覆盖,个别幼鱼亦会停留在藻丛上方,受到惊吓后会

立即钻入藻丛中。第2和第3天的观察结果与第1天无明显差异, 但海藻丛实验组在水槽边缘区分布的幼鱼数量明显少于模型礁实验组。

2.2 响应时间、停留时间和聚集时间

不同实验组许氏平鲉和大泷六线鱼的响应

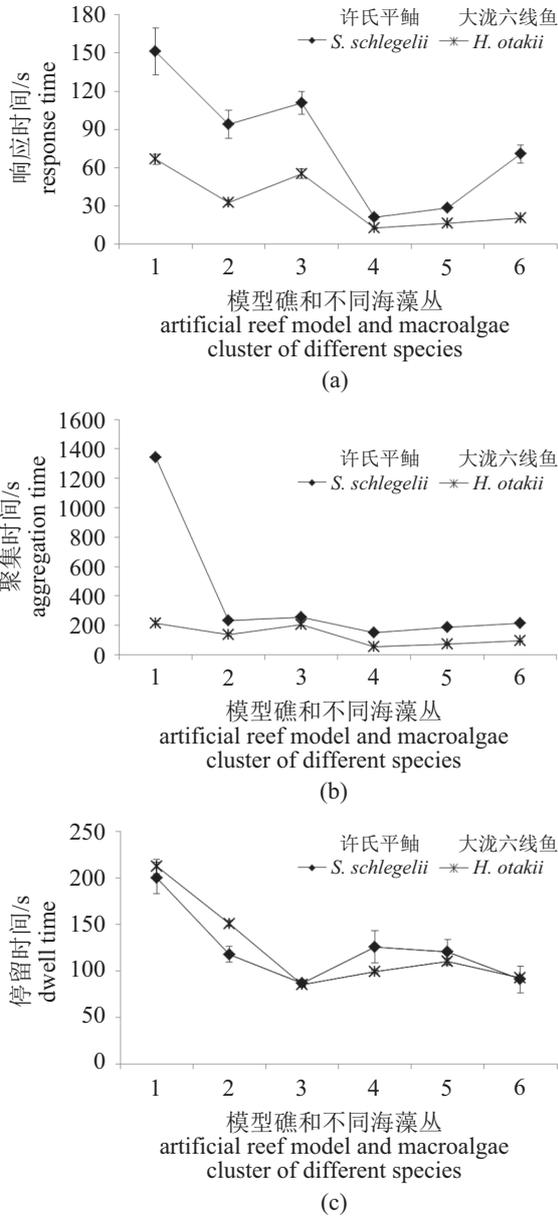


图3 许氏平鲉和大泷六线鱼的响应时间(a)、聚集时间(b)和停留时间(c)

- 1. 模型礁, 2. 海黍子, 3. 孔石莼, 4. 带形蜈蚣藻, 5. 石花菜, 6. 小珊瑚藻, 下同

Fig. 3 Response time (a), aggregation time (b) and dwell time (c) of *S. schlegelii* and *H. otakii*

- 1. reef model, 2. *H. japonica*, 3. *U. pertusa*, 4. *G. tureturu*, 5. *G. amansii*, 6. *C. pilulifera*, the same below

时间、聚集时间以及停留时间均存在极显著差异(图3) ($P < 0.01$)。许氏平鲉和大泷六线鱼对带形蜈蚣藻的响应时间最短, 平均时间分别为(21.00±4.10)和(12.75±1.11) s, 对礁体模型的响应时间最长, 平均时间分别为(151.25±9.62)和(66.50±2.72) s; 许氏平鲉和大泷六线鱼的响应时间依次为鱼礁模型>孔石莼>海黍子>小珊瑚藻>石花菜>带形蜈蚣藻, 大泷六线鱼的响应时间明显小于许氏平鲉; 对带形蜈蚣藻的响应时间最短, 对礁体模型的响应时间最长, 说明这2种鱼对自然物体的敏感度强于人工建造物。许氏平鲉向鱼礁模型聚集耗时最长, 平均为(1343.50±5.38) s, 向带形蜈蚣藻聚集耗时最短, 平均为(151.50±8.14) s, 其中海黍子组的聚集时间较红藻门的小珊瑚藻短; 大泷六线鱼向鱼礁模型聚集的耗时也最长, 平均为(216.25±5.95) s, 向海黍子聚集耗时最短, 平均为(56.00±2.53) s, 明显快于其他红藻组。但许氏平鲉和大泷六线鱼均在鱼礁模型中停留时间最长, 平均停留时间分别为(199.75±16.82)和(211.85±7.96) s, 在孔石莼中停留时间最短, 平均停留时间分别为(86.50±3.73)和(85.08±1.45) s, 大泷六线鱼在不同实验组的停留时间均略大于许氏平鲉, 说明大泷六线鱼对异质空间的依赖程度要大于许氏平鲉。

2.3 平均聚集率

许氏平鲉的平均聚集率 不同实验组许氏平鲉的平均聚集率显示, 鱼礁模型实验中, 许氏平鲉在4个实验区的平均聚集率无显著差异 ($P > 0.05$), 平均为15.57%±0.57%(图4)。海藻丛聚集实验中, 许氏平鲉在带形蜈蚣藻、石花菜和

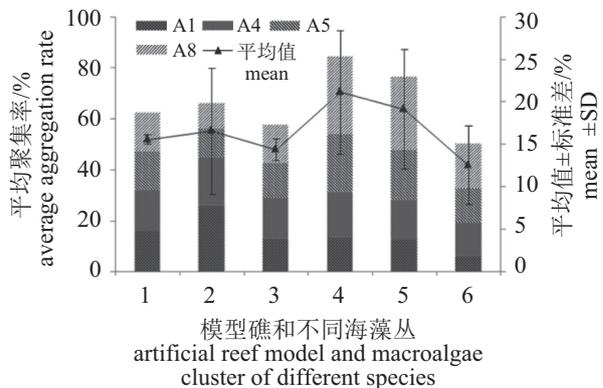


图4 许氏平鲉的平均聚集率

Fig. 4 Average aggregation rate of *S. schlegelii*

小珊瑚藻中的聚集率随海藻密度的增加而增加，高密度组A8区最高(30.42%±1.14%)，低密度组A1区最低(6.25%±1.18%)；许氏平鲉在海葵子中的聚集率随海藻密度的增加而降低，低密度组A1区最大(26.00%±2.01%)，高密度组A8区最小(9.89%±0.90%)；许氏平鲉在孔石莼组的聚集率无明显差异($P>0.05$)，平均为14.37%±1.47%。

相同海藻丛密度下许氏平鲉的平均聚集率显示，在A1实验区(10株密度组)，海葵子实验组的聚集率显著高于其他实验组，小珊瑚藻组的聚集率则显著低于其他实验组，其他4个实验组在A1区的聚集率无显著差异($P>0.05$)；在A4实验区(15株密度组)，所有实验组的聚集率均无显著差异；在A5和A8实验区(20、25株密度组)，带形蜈蚣藻组和石花菜组的平均聚集率均显著高于其他实验组($P<0.05$)，海葵子组则显著低于其他实验组($P<0.05$)，其他3个组间无显著差异(图4)。总体而言，带形蜈蚣藻组和石花菜组许氏平鲉在相同实验区的聚集率无显著差异，但极显著高于海葵子、孔石莼实验组($P<0.01$)，在小珊瑚藻组中的聚集率极显著低于其他组($P<0.01$)，鱼礁模型组与海葵子组、鱼礁模型组与孔石莼组均无显著差异($P>0.05$)，而海葵子组则显著高于孔石莼组($P<0.05$)。

大泷六线鱼的平均聚集率 不同实验组大泷六线鱼的平均聚集率显示，鱼礁模型实验中，大泷六线鱼在4个实验区的聚集率保持恒定，平均为15.69%±0.88%；与许氏平鲉不同，大泷六线鱼在不同海藻丛中的平均聚集率随着海藻丛密度的增加而增加，在高密度组(A8区)海葵子中聚集率最高(31.42%±1.74%)，在低密度组(A1区)小珊瑚藻中聚集率最低(9.17%±1.26%)(图5)。

相同海藻丛密度下大泷六线鱼的平均聚集率显示，在A1实验区(10株密度组)，大泷六线鱼在海藻丛实验组中的聚集率显著低于鱼礁模型组($P<0.05$)，小珊瑚藻中的聚集率显著低于其他海藻组($P<0.05$)；在A4实验区(15株密度组)，所有实验组的聚集率均无显著差异；在A5和A8实验区(20、25株密度组)，海葵子组和石花菜组的聚集率无显著差异($P>0.05$)，但显著高于鱼礁组、孔石莼组、带形蜈蚣藻组以及小珊瑚藻组($P<0.05$)(图5)。总体而言，大泷六线鱼的聚集率在海葵子组和石花菜组间不存在显著差异($P>$

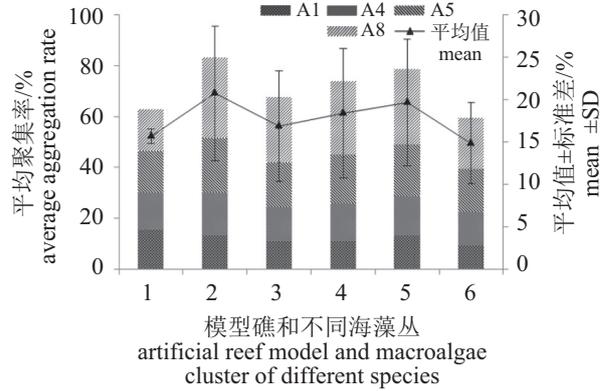


图5 大泷六线鱼的平均聚集率

Fig. 5 Average aggregation rate of *H. otakii*

0.05)，但均显著高于其他组($P<0.05$)，鱼礁模型组、孔石莼组以及小珊瑚藻组间也无显著差异($P>0.05$)，但显著低于带形蜈蚣藻组($P<0.05$)。

2.4 平均分布率

许氏平鲉的平均分布率 对照组许氏平鲉在各区的平均分布率与各实验组存在明显差异，水槽四周边缘处A9区的平均分布率为75.71%±7.79%，极显著高于其他区域($P<0.01$)；鱼礁模型实验中，4个投放礁体实验区(A1、A4、A5和A8)的平均分布率分别增加到15.94%±2.27%、16.18%±2.41%、15.08%±3.61%和15.08%±4.17%，各区域间不存在显著差异($P>0.05$)，A9区的平均分布率降低至30.42%±11.86%，4个空白对照区(A2、A3、A6和A7)的平均分布率较低且不存在显著差异($P>0.05$)；海葵子实验组，A1、A4、A5和A8 4个海藻丛实验区的平均分布率分别增加至26.00%±1.92%、18.89%±1.71%、11.39%±2.24%和8.89%±1.04%，各实验区存在显著差异($P<0.05$)，A9区的平均分布率降低至26.03%±5.55%，4个空白对照区的分布率也略有增加，但不存在显著性差异($P>0.05$)；孔石莼实验组，A1、A4、A5和A8 4个海藻丛实验区的平均分布率分别增加至13.06%±1.87%、15.91%±2.72%、13.64%±4.14%和14.88%±2.25%，不存在显著的组间差异($P>0.05$)，A9区的平均分布率降至32.85%±2.93%；带形蜈蚣藻实验组，A1、A4、A5和A8 4个海藻丛实验区的平均分布率分别增加至13.44%±1.29%、17.81%±1.17%、22.75%±1.29%和30.42%±1.14%，各实验区存在显著差异($P<0.05$)，A9区的平均分布率降低至4.52%±2.63%；石花菜实验组，A1、A4、A5和

A8 4个海藻丛实验区的平均分布率分别增加至 $12.67\% \pm 0.86\%$ 、 $15.50\% \pm 1.17\%$ 、 $19.50\% \pm 1.76\%$ 和 $28.83\% \pm 1.37\%$, 各实验区存在显著差异 ($P < 0.05$), A9区的平均分布率降低至 $12.17\% \pm 2.00\%$; 小珊瑚藻实验组, A1、A4、A5和A8 4个

海藻丛实验区的平均分布率分别增加至 $6.25\% \pm 1.18\%$ 、 $12.83\% \pm 0.89\%$ 、 $13.75\% \pm 1.18\%$ 和 $17.29\% \pm 0.86\%$, 各实验区存在显著差异 ($P < 0.05$), A9区的平均分布率降至 $38.96\% \pm 3.88\%$ (图6)。总体而言, 放入鱼礁模型后, 各实验区的平均分布率

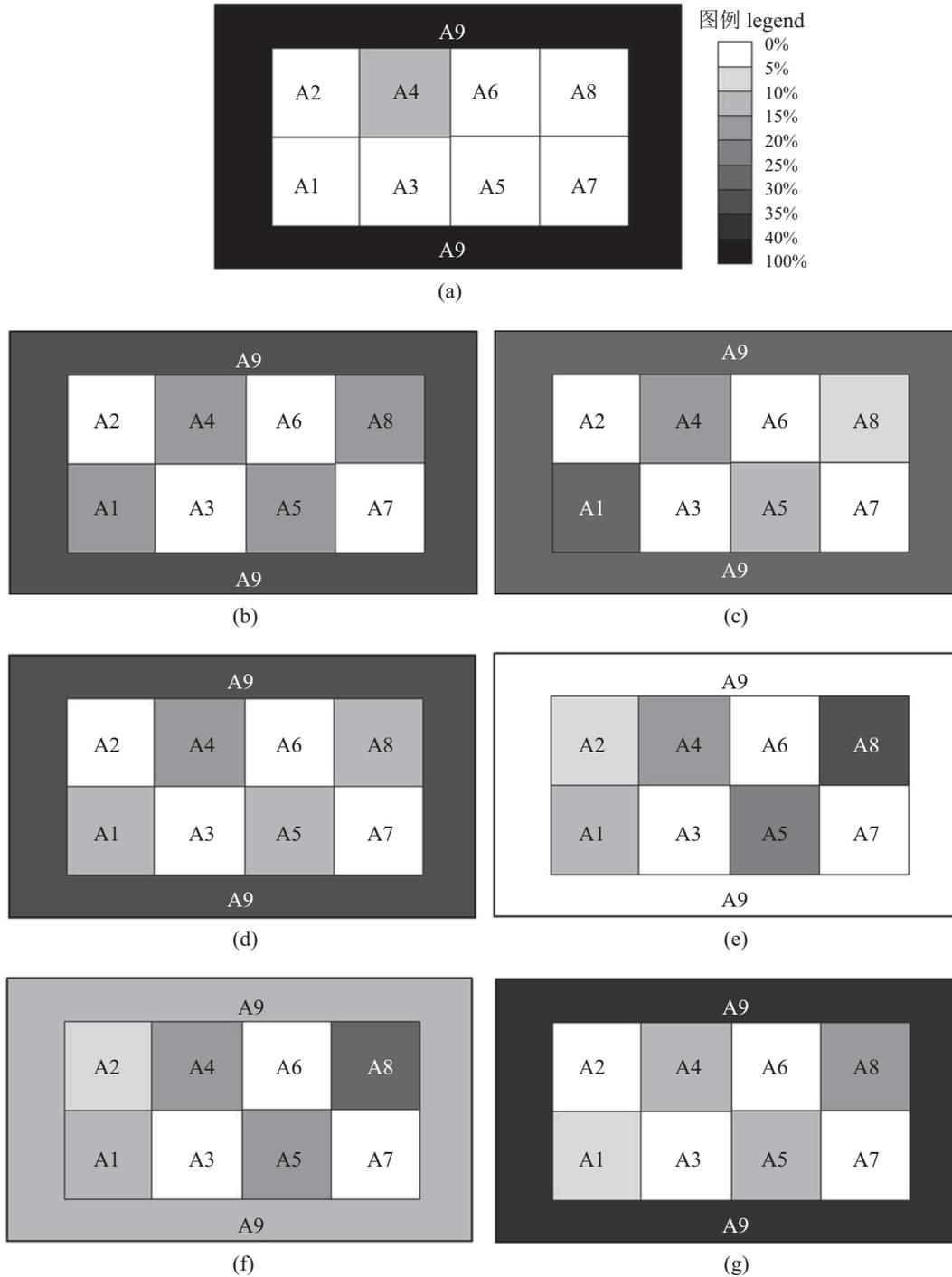


图 6 对照组和实验组许氏平鲷的平均分布率

a. 对照组, b. 鱼礁模型, c. 海黍子, d. 孔石莖, e. 带形蜈蚣藻, f. 石花菜, g. 小珊瑚藻, 下同

Fig. 6 Average distribution rate of *S. schlegelii* in the control group and experimental groups

a. control, b. artificial reef model, c. *H. japonica*, d. *U. pertusa*, e. *G. turuturu*, f. *G. amansii*, g. *C. pilulifera*, the same below

均有所增加,但不存在显著差异;带形蜈蚣藻组、石花菜组和小珊瑚藻组实验中,高密度组(A8区)平均分布率的增幅较大,低密度组(A1区)平均分布率的增幅较小;海黍子组实验中,高密度组(A8区)平均分布率的增幅较小,低密度组(A1区)平均分布率增幅较大;孔石莼组实验中,各实验区平均分布率增幅差异不显著。

大泷六线鱼的平均分布率 对照组大泷六线鱼在各区的平均分布率与各实验组存在显著差异,A9区的平均分布率为 $73.33\% \pm 4.41\%$,极显著高于其他区($P < 0.01$);在鱼礁模型实验中,4个投放礁体实验区(A1、A4、A5和A8)的平均分布率分别增至 $15.58\% \pm 1.56\%$ 、 $14.48\% \pm 2.41\%$ 、 $16.39\% \pm 2.61\%$ 和 $16.30\% \pm 1.46\%$,各区域间不存在显著差异($P > 0.05$),A9区的平均分布率降低至 $26.43\% \pm 5.44\%$,4个空白对照区(A2、A3、A6和A7)的平均分布率均较低,且A6区显著高于A2、A3和A7区($P < 0.05$);海黍子实验组,A1、A4、A5和A8 4个海藻丛实验区的平均分布率分别增加至 $13.17\% \pm 1.31\%$ 、 $16.83\% \pm 1.24\%$ 、 $21.50\% \pm 1.21\%$ 和 $31.42\% \pm 1.74\%$,各区域间差异显著($P < 0.05$),A9区的平均分布率降低至 $4.42\% \pm 1.02\%$,4个空白对照区的平均分布率无显著差异($P > 0.05$);孔石莼实验组,A1、A4、A5和A8 4个海藻丛实验区的平均分布率分别增加至 $10.64\% \pm 1.32\%$ 、 $13.69\% \pm 1.50\%$ 、 $17.58\% \pm 1.76\%$ 和 $25.72\% \pm 0.65\%$,A9区的平均分布率降低至 $21.94\% \pm 3.82\%$,4个空白对照区的平均分布率依然较低且无显著差异($P > 0.05$);带形蜈蚣藻实验组,A1、A4、A5和A8 4个海藻丛实验区的平均分布率分别增加至 $11.03\% \pm 1.20\%$ 、 $14.58\% \pm 1.07\%$ 、 $19.33\% \pm 1.31\%$ 和 $28.67\% \pm 1.48\%$,A9区的平均分布率降低至 $16.08\% \pm 2.25\%$;石花菜实验组,A1、A4、A5和A8 4个实验区的平均分布率分别增加至 $13.00\% \pm 1.05\%$ 、 $15.50\% \pm 1.23\%$ 、 $20.33\% \pm 1.05\%$ 和 $29.88\% \pm 1.37\%$,A9区的平均分布率降低至 $10.83\% \pm 1.24\%$;小珊瑚藻实验组,A1、A4、A5和A8 4个海藻丛实验区的平均分布率均较低,但明显高于许氏平鲷相同实验区(图7)。总体而言,放入鱼礁模型后,各实验区的平均分布率均有所增加,但不存在显著差异;海藻丛实验中,高密度组(A8区)平均分布率的增幅较大,低密度组(A1区)平均分布率的增幅较小。

3 讨论

3.1 许氏平鲷和大泷六线鱼的行为特征

鱼礁渔场的鱼类生态研究表明,鱼群的聚集活动与索饵和逃避行为密切相关,主要由饵料密度、可能逃避空间以及索饵需求等决定,而幼鱼的行为主要是逃避敌害、索饵和嬉戏。因此,鱼礁与大型海藻对许氏平鲷和大泷六线鱼的诱集效果主要由这两种鱼本身的行为习性决定^[16]。Partridge等^[23]研究指出鱼群与个体之间的聚集行为表现出一定差异,聚集时整个鱼群是领导者,而任何一个个体均为跟随状态,这亦在本研究中得到证实,即水槽中无鱼礁和海藻投放时,实验幼鱼集群分布在水槽边缘区域(聚集率分别为 $75.71\% \pm 7.79\%$ 和 $73.33\% \pm 4.41\%$),放入鱼礁和海藻丛后,实验幼鱼表现为集群游动,集群入礁、入藻,这可能与其生活习性有关。许氏平鲷和大泷六线鱼均为冷温性中下层岩礁鱼类,常栖息于海藻丛及浅海岩礁等光线较弱的地方^[13, 24-25],放入鱼礁和海藻丛后,礁体和藻丛附近的光线明显低于水槽其他区域,从而吸引实验鱼到鱼礁或海藻丛内栖息、躲避,礁体和海藻丛外部的实验鱼受到外部干扰后会迅速躲入礁体和海藻丛内,这与其他一些岩礁性鱼类的研究结果一致^[11-12, 14-16]。观察发现,大泷六线鱼的活动能力明显强于许氏平鲷,这与张硕等^[13]的研究结果相反,分析认为可能与实验条件不同导致鱼类行为差异有关,另据有野外潜水经验的渔民观察,发现大泷六线鱼在海底不停地游动,许氏平鲷则相对安静地在礁区某处栖息,与本实验观察结果一致。未投放鱼礁模型和大型海藻之前,实验鱼大部分分布在水槽边缘和角落区域,这与岩礁性鱼类的趋触性和水槽边缘、角落区有阴影且利于隐藏、躲避有关。

3.2 响应时间、聚集时间和停留时间的差异

侍炯^[26]观察了声、光驯化下褐菖鲈(*Sebastes marmoratus*)的反应时间和聚集时间,结果表明不同的外界刺激会引起鱼类不同的行为反应,时间指标更能直接反映出驯化效果及聚集效果。本实验通过响应时间、聚集时间以及停留时间3个指标来探讨海藻、鱼礁模型与鱼类之间的关系,发现两种鱼类对海藻和鱼礁的响应时间表现出一定的差异,对海藻的响应时间更

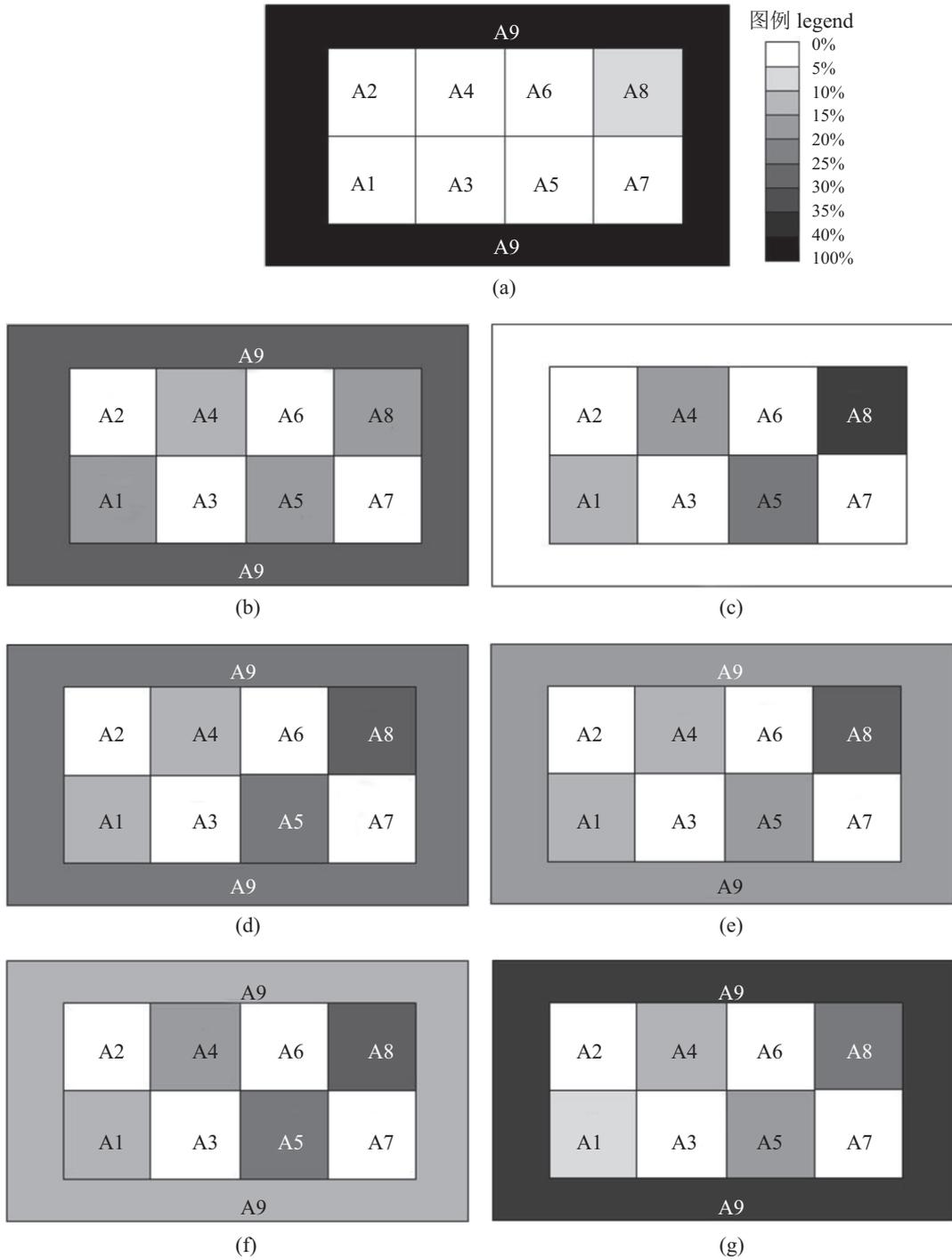


图 7 对照组和实验组大泷六线鱼的平均分布率

Fig. 7 Average distribution rate of *H. otakii* in the control group and experimental groups

短, 进一步说明了大型海藻与鱼类之间的依存关系。聚集时间的长短可以体现出藻类和鱼礁对鱼类吸引力的大小, 其中大型蜈蚣藻聚集许氏平鲈时间最短, 分析认为带形蜈蚣藻藻体较高、叶面较宽, 随波摇摆时会卷曲形成大量孔洞, 许氏平鲈背棘坚硬且鱼体粗糙, 在孔洞中

即可畅通无阻又可隐蔽栖息, 因而其对带形蜈蚣藻最为敏感, 聚集率也最高; 大泷六线鱼体细长光滑, 喜好钻洞, 而海黍子枝叶繁茂, 隐蔽性较好, 可为大泷六线鱼提供足够的空间, 因此大泷六线鱼在海黍子中聚集最快, 聚集率也最高。鱼类在鱼礁和海藻中停留时间的

长短不仅可以反映出环境对鱼类吸引力的大小,也可以反映鱼类对所处环境的忠诚度。观察发现,实验鱼在模型礁中的停留时间远大于海藻丛,这可能与许氏平鲈和大泷六线鱼自身的恋礁习性有关,鱼礁固定的孔洞或缝隙更偏向栖息与庇护功能,而海藻丛则主要为幼鱼提供索饵和活动场所。

3.3 人工鱼礁和海藻丛的集鱼效果

大量人工鱼礁诱集作用研究表明,人工鱼礁可以明显吸引鱼类等海洋生物聚集^[14-15, 27-28]。本研究发现,带形蜈蚣藻、海黍子、石花菜等海藻对鱼的聚集率均较高,最大可超过人工鱼礁的15.33%,诱集作用明显强于人工礁体。小珊瑚藻藻体较小,其长度仅为带形蜈蚣藻和海黍子的二分之一到三分之一,孔石莼虽然藻体较长,但其叶状体呈薄片状,形成的隐蔽空间有限,分析是导致这两种藻类鱼类聚集率较低的原因之一。鱼类对鱼礁材料的选择是由生境特征、自身行为习性、食物有效性、捕食以及竞争等多种因素共同造成的^[29]。海藻作为一种自然植物,鱼类对其敏感性可能要优于人工构造物,同时,鱼礁和海藻丛形成的隐蔽空间各异,从而使两种幼鱼的聚集率参差不齐。此外,自然海区的海藻丛中栖息着大量的饵料生物,许氏平鲈和大泷六线鱼亦摄食多种海藻^[24, 30-31],在多种因素的共同作用下,导致了海藻的诱集作用优于人工礁体。本研究发现鱼礁组和海藻实验组鱼类的聚集率始终未达到100%,这可能是由于岩礁性鱼类需要占据一定的栖息空间,具明显的领域行为所致。研究表明,实验鱼在鱼礁中的停留时间远长于海藻丛,因此可以通过人工礁体与大型海藻组合来为鱼类提供更多的隐蔽空间,从而提高水域空间的利用率。人工鱼礁有利于海藻附着,为海藻生长提供必要的基质^[32],同时海藻丛内部栖息的大量饵料生物可供鱼类摄食^[20],选择具有高诱集率的海藻作为构建海藻场的基本支撑物,鱼礁和海藻共同构成岩礁性海洋生物的适宜生境,既为其提供了有效的异质空间,也为其提供育幼、索饵场所。

本研究定性和定量分析了2种岩礁性鱼类对礁体模型和大型海藻的行为反应,这与自然海区的实际观察结果尚存在一定差异^[33-35]。今后应

利用潜水观察、水下摄像等技术手段对海区投放的人工鱼礁礁体及附着大型海藻的集鱼效果进行观察,确定礁体和藻场的实际影响半径,与室内诱集实验相结合,为礁体材料的选择、礁体结构的设计以及人工藻场的构建提供参考。

参考文献:

- [1] Rounsefell G A. Ecological effects of offshore construction[J]. *Journal of Marine Science*, 1972, 2(1): 201-208.
- [2] Yu Y Q, Zhang Q S, Tang Y Z, *et al.* Establishment of intertidal seaweed beds of *Sargassum thunbergii* through habitat creation and germlingseeding[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44: 10-17.
- [3] Allen L G, Pondella II D J, Horn M H. *The Ecology of Marine Fishes: California and adjacent Waters*[M]. California: University of California Press, 2006.
- [4] Ohno M. Succession of seaweed communities on artificial reefs in Ashizuri, Tosa Bay, Japan[J]. *The Korean Journal of Phycology*, 1993, 8(2): 191-198.
- [5] 柴召阳, 霍元子, 于克锋, 等. 枸杞岛瓦氏马尾藻藻场生态系统健康评价[J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(3): 386-389.
Chai Z Y, Huo Y Z, Yu K F, *et al.* Assessment of *Sargassum vachellianum* bed ecosystem health in Gouqi Island[J]. *Marine Environmental Science*, 2013, 32(3): 386-389(in Chinese).
- [6] 赵静, 章守宇, 沈天跃, 等. 人工鱼礁投放误差分布研究[J]. *水产学报*, 2016, 40(11): 1790-1799.
Zhao J, Zhang S Y, Shen T Y, *et al.* Distribution model of deviation in artificial reef installation[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(11): 1790-1799 (in Chinese).
- [7] Godoy E A S, Almeida T C M, Zalmon I R. Fish assemblages and environmental variables on an artificial reef north of Rio de Janeiro, Brazil[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59: S138-S143.
- [8] 陈勇, 于长清, 张国胜, 等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果[J]. *大连水产学院学报*, 2002, 17(1): 64-69.
Chen Y, Yu C Q, Zhang G S, *et al.* The environmental function and fish gather effect of artificial reefs[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2002, 17(1): 64-69(in Chinese).
- [9] 王宏, 陈丕茂, 李辉权, 等. 澄海莱芜人工鱼礁集鱼效果初步评价[J]. *南方水产*, 2008, 4(6): 63-69.

- Wang H, Chen P M, Li H Q, *et al.* Preliminary evaluation on fish-aggregating effects of artificial reefs in Chenghai coast, Guangdong, China[J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(6): 63-69(in Chinese).
- [10] 袁华荣, 陈丕茂, 黎小国. 江门三号人工鱼礁集鱼效果初步评价[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(6): 129-133.
- Yuan H R, Chen P M, Li X G. Preliminary evaluation on fish-aggregation effects of Jiangmen 3 artificial reef in Jiangmen coast[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(6): 129-133(in Chinese).
- [11] 何大仁, 丁云. 鱼礁模型对赤点石斑鱼的诱集效果[J]. *台湾海峡*, 1995, 14(4): 394-398.
- He D R, Ding Y. Gathering effect of artificial reef model on garrupa (*Epinephelus akaara*)[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1995, 14(4): 394-398(in Chinese).
- [12] 何大仁, 施养明. 鱼礁模型对黑鲷的诱集效果[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1995, 34(4): 653-658.
- He D R, Shi Y M. Attractive effect of fish reef model on black porgy (*Sparus macrocephalus*)[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 1995, 34(4): 653-658(in Chinese).
- [13] 张硕, 孙满昌, 陈勇. 人工鱼礁模型对大泷六线鱼和许氏平鲷幼鱼个体的诱集效果[J]. *大连水产学院学报*, 2008, 23(1): 13-19.
- Zhang S, Sun M C, Chen Y. The attractive effects of different structural artificial reef models on juvenile Schlegel's rockfish *Sebastes schlegeli* and fat greenling *Hexagrammos otakii*[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2008, 23(1): 13-19(in Chinese).
- [14] 周艳波, 蔡文贵, 陈海刚, 等. 不同人工鱼礁模型对花尾胡椒鲷的诱集效应[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(3): 103-107.
- Zhou Y B, Cai W G, Chen H G, *et al.* Attraction effect of various artificial reef models on *Plectorhynchus cinc-tus*[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(3): 103-107(in Chinese).
- [15] 周艳波, 蔡文贵, 陈海刚, 等. 试验水槽中多种人工鱼礁模型组合对紫红笛鲷幼鱼的诱集效果[J]. *台湾海峡*, 2012, 31(2): 231-237.
- Zhou Y B, Cai W G, Chen H G, *et al.* Attractive effect of combination of artificial reef models on young *Lutjanus argentimaculatus* in experimental tank[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2012, 31(2): 231-237(in Chinese).
- [16] 周艳波, 蔡文贵, 陈海刚, 等. 不同人工鱼礁模型对褐菖鲈的诱集效应[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(2): 8-10, 33.
- Zhou Y B, Cai W G, Chen H G, *et al.* Attraction effect of various artificial reef models on *Sebastes marmoratus* (Cuvier et Valenciennes)[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(2): 8-10, 33(in Chinese).
- [17] 林超, 桂福坤. 不同光色下人工鱼礁模型对褐菖鲈和日本黄姑鱼诱集效果试验[J]. *渔业现代化*, 2013, 40(2): 66-70, 75.
- Lin C, Gui F K. The attractive effects of artificial reef model at different light colors on *Sebastes marmoratus* and *Argyrosomus japonicas*[J]. *Fishery Modernization*, 2013, 40(2): 66-70, 75(in Chinese).
- [18] 山内信, 木村創, 高橋芳明, 等. アイゴの摂食行動に及ぼすクロメ密度の影響について[J]. *Aquaculture Science*, 2009, 57(3): 429-435.
- Yamauchi M, Kimura H, Takahashi Y, *et al.* The influence of *Eckloniakurome* densities feeding behavior of siganid fish, *Siganus fuscescens*[J]. *Aquaculture Science*, 2009, 57(3): 429-435.
- [19] 冯昭信, 韩华. 大泷六线鱼资源合理利用的研究[J]. *大连水产学院学报*, 1998, 13(2): 24-28.
- Feng Z X, Han H. Rational utilization of *Hexagrammos otakii* resources[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 1998, 13(2): 24-28(in Chinese).
- [20] 吕洪斌. 崂山青山湾人工鱼礁区海藻场结构及其功能的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2016.
- Lü H B. Preliminary study on the structure and function of kelp beds in artificial reefs of Qingshan Bay at Laoshan[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2016(in Chinese).
- [21] 刘鸿雁, 杨超杰, 张沛东, 等. 青岛崂山湾人工鱼礁区底层游泳动物群落结构特征[J]. *生物多样性*, 2016, 24(8): 896-906.
- Liu H Y, Yang C J, Zhang P D, *et al.* Demersal nekton community structure of artificial reef zones in Laoshan Bay, Qingdao[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(8): 896-906(in Chinese).
- [22] 陈勇, 吴晓郁, 邵丽萍, 等. 模型礁对幼鲷、幼海胆行为的影响[J]. *大连水产学院学报*, 2006, 21(4): 361-365.
- Chen Y, Wu X Y, Shao L P, *et al.* The influence of model artificial reef on behavior in juvenile abalone and sea

- urchin[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2006, 21(4): 361-365(in Chinese).
- [23] Partridge B L, Pitcher T J. The sensory basis of fish schools: relative roles of lateral line and vision[J]. Journal of Comparative Physiology, 1980, 135(4): 315-325.
- [24] 纪东平, 卞晓东, 宋娜, 等. 荣成俚岛大泷六线鱼摄食生态研究[J]. 水产学报, 2014, 38(9): 1399-1409.
- Ji D P, Bian X D, Song N, *et al.* Feeding ecology of *Hexagrammos otakii* in Lidao Rongcheng[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(9): 1399-1409(in Chinese).
- [25] Jayasinghe J D H E, Bathige S D N K, Nam B H, *et al.* Comprehensive characterization of three glutathione S-transferase family proteins from black rockfish (*Sebastes schlegelii*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2016, 189: 31-43.
- [26] 侍炯. 声、光对褐菖鲉(*Sebastes marmoratus*)的行为影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
- Shi T. The behavior of *Sebastes marmoratus* by using sound or light[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014(in Chinese).
- [27] Walker B K, Henderson B, Spieler R E. Fish assemblages associated with artificial reefs of concrete aggregates or quarry stone offshore Miami Beach, Florida, USA[J]. Aquatic Living Resources, 2002, 15(2): 95-105.
- [28] Einbinder S, Perelberg A, Ben-Shaprut O, *et al.* Effects of artificial reefs on fish grazing in their vicinity: evidence from algae presentation experiments[J]. Marine Environmental Research, 2006, 61(1): 110-119.
- [29] 颜忠诚, 陈永林. 动物的生境选择[J]. 生态学杂志, 1998, 17(2): 43-49.
- Yan Z C, Chen Y L. Habitat selection in animals[J]. Chinese Journal of Ecology, 1998, 17(2): 43-49(in Chinese).
- [30] 张迎秋. 前三岛海域底层鱼类群落结构、摄食生态和运动行为特征[D]. 北京: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2015.
- Zhang Y Q. Community structure, feeding ecology and movement behaviors of demersal fish around Qiansan-Islets[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Oceanography), 2015(in Chinese).
- [31] 吴忠鑫. 山东俚岛人工鱼礁区生态效果初步评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- Wu Z X. The preliminary assessment of ecological effect of Lidao artificial reef zone, Shandong province[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015(in Chinese).
- [32] Okuda K. Coastal environment and seaweed-bed ecology in Japan[J]. Kuroshio Science, 2008, 2(1): 15-20.
- [33] 章守宇, 张焕君, 焦俊鹏, 等. 海州湾人工鱼礁海域生态环境的变化[J]. 水产学报, 2006, 30(4): 475-480.
- Zhang S Y, Zhang H J, Jiao J P, *et al.* Change of ecological environment of artificial reef waters in Haizhou Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(4): 475-480(in Chinese).
- [34] 刘洪生, 马翔, 章守宇, 等. 人工鱼礁流场效应的模型实验[J]. 水产学报, 2009, 33(2): 229-236.
- Liu H S, Ma X, Zhang S Y, *et al.* Research on model experiments of effects of artificial reefs on flow field[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(2): 229-236(in Chinese).
- [35] 汪振华, 章守宇, 王凯, 等. 三横山人工鱼礁区鱼类和大型无脊椎动物诱集效果初探[J]. 水产学报, 2010, 34(5): 751-759.
- Wang Z H, Zhang S Y, Wang K, *et al.* A preliminary study on fish and macroinvertebrate enhancement in artificial reef area around Sanheng Isle, Shengsi, China[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(5): 751-759(in Chinese).

Attraction effect of artificial reef model and macroalgae on juvenile *Sebastes schlegelii* and *Hexagrammos otakii*

LIU Hongyan¹, LÜ Hongbin¹, ZHANG Peidong¹, LI Wentao¹, ZHANG Xiumei^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Process,

Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266072, China)

Abstract: A field survey in an artificial reef zone of Laoshan Bay was conducted to assess the demersal nekton and macroalgae in the area, and five dominant macroalgae (*Heterosiphonia japonica*, *Ulva pertusa*, *Grateloupia turuturu*, *Gelidium amansii* and *Corallina pilulifera*) and two dominant fish species (*Sebastes schlegelii* and *Hexagrammos otakii*) and artificial reef model were studied to examine the attraction of artificial reef model and the five macroalgae to juvenile *S. schlegelii* and *H. otakii* in an experimental trough. The results showed that without artificial reef model and macroalgae in trough, *S. schlegelii* and *H. otakii* preferred to stay in the edge area of the trough, and the distribution rate was 75.71% and 73.63% respectively. After the artificial reef model and macroalgae were deployed in the trough, these two kinds of fish would swim into artificial reef holes and macroalgae cluster quickly after a short escape response; their response time to *G. turuturu* was the shortest ([12.75–21.00] s) and the longest was to artificial reef ([66.50–151.25] s); the aggregation time of *S. schlegelii* was shortest to *G. turuturu* ([151.50±8.14] s) and that of *H. otakii* was shortest to *H. japonica* ([56.00±2.53] s); the aggregation time of *H. otakii* in artificial reef was (216.25±5.59) s, much less than that of *S. schlegelii* ([1343.50±5.38] s); the dwell time of two kinds of fish in artificial reef is much longer than the time in macroalgae cluster, and the dwell time of *H. otakii* ([211.85±7.96] s) is longer than *S. schlegelii* ([199.75±16.82] s). Artificial reef and macroalgae cluster were attractive to them, increasing distribution ratio in the experimental areas from 0.91%–8.78% to 4.21%–31.42%, and the highest aggregation rates were observed in higher density of *G. turuturu* for *S. schlegelii* (30.42%±1.14%) and *H. japonica* for *H. otakii* (31.42%±1.74%), respectively, but the aggregation by the lower-density *C. pilulifera* was not apparent.

Key words: macroalgae; artificial reef; *Sebastes schlegelii*; *Hexagrammos otakii*; distribution rate; aggregation rate

Corresponding author: ZHANG Xiumei. E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn

Funding projects: National Nature Science Foundation of China (31172447, 31572227); Marine Public Welfare Industry Research (201405010)