



蟹笼渔具逃逸口位置对三疣梭子蟹逃逸行为的影响

张健^{1,2,3}, 邱昱¹, 裴占文¹, 吴建辉⁴, 石建高⁵, 陈锦辉^{1,4*}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

4. 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092;

5. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

摘要: 为了检验蟹笼渔具逃逸口对三疣梭子蟹逃逸行为的影响, 实验使用红外水下摄像装备观察了三疣梭子蟹对 3 种不同配置逃逸口 (位于侧网底部、开口高度 3.2 cm 和 4.0 cm 以及位于侧网顶部、开口高度 4.0 cm) 的反应行为。水下观察结果显示, 三疣梭子蟹在笼底的探索行为使其能轻易发现和接近底部逃逸口, 而垂直搜索行为能使其发现和接近顶部逃逸口, 虽然发现并接近顶部逃逸口所需的时间显著大于底部逃逸口, 但平均次数无显著性差异; 87% 接近逃逸口的个体企图穿越逃逸口, 且逃逸口位置对此无显著影响; 所有个体均采用侧身姿态穿越逃逸口, 甲高是决定个体成功逃逸的关键因素; 穿越顶部逃逸口的三疣梭子蟹需要花费更多的时间和精力调整姿态和位置以更好地匹配逃逸口, 但广义线性混合模型 (GLMM 模型) 拟合结果显示, 逃逸口位置对个体逃逸成功率没有显著影响, 表明三疣梭子蟹具有较高的个体姿态操纵能力, 而笼内个体数量对逃逸成功率具有显著的影响。结合水下观察, 研究认为个体在探索行为的活跃程度和浸泡时间会影响逃逸口的性能; 考虑到东海近海蟹笼的结构和渔业现状, 研究认为在蟹笼侧网靠近底部安装一个逃逸口是目前可行的技术措施。

关键词: 三疣梭子蟹; 蟹笼; 逃逸口; 位置; 水下观察

中图分类号: S 972

文献标志码: A

20 世纪 80 年代开始, 随着近海传统经济鱼类资源衰退, 虾、蟹类生存空间逐步放大、资源发生量逐步增加, 以三疣梭子蟹 (*Portunus trituberculatus*) 为目标种类的笼壶渔业逐渐起步。蟹笼渔具以其结构简单、成本较低、操作方便等特点, 在浙江、江苏和福建等省份得到了迅速推广, 已成为东海主要的作业方式之一^[1-2]。巨大的捕捞努力量给蟹类资源带来极大压力, 造成蟹笼渔业单位捕捞努力量渔获量 (CPUE) 逐年下降、渔获个

体逐渐小型化^[3-4]等。使用释放装置以保护幼蟹资源是优化蟹笼渔获性能的主要技术手段^[5-8]。在东海蟹笼渔业中, 有较多研究分析了释放装置对三疣梭子蟹的释放效果^[9-13], 但这些研究通常只设置一个逃逸口, 而近海经济作业所使用的蟹笼渔具 (圆柱形) 结构对称, 且采用延绳作业方式, 实际作业中无法控制蟹笼着底姿态、难以保证逃逸口始终贴近海底, 然而有关逃逸口位置 (位于蟹笼侧网底部或顶部) 是否会影响三疣梭子蟹的逃逸行为,

收稿日期: 2021-06-06 修回日期: 2021-10-26

资助项目: 国家自然科学基金 (31001138, 31972844); 国家重点研发计划 (2020YFD0900803)

第一作者: 张健 (照片), 从事生态型渔具渔法研究, E-mail: j-zhang@shou.edu.cn

通信作者: 陈锦辉, 从事渔业政策管理研究, E-mail: 1114260882@qq.com



进而影响蟹笼的渔获效率仍知之甚少。Zhang 等^[14]通过海上实验发现, 逃逸口安装位置对蟹笼渔具的渔获效率没有显著影响, 但由于缺乏行为观察, 导致入笼个体对不同位置逃逸口的行为反应及机制仍不清晰。通过水池实验, 观察并研究甲壳动物对笼壶等渔具反应行为的方法具有群体丰度已知、所有个体都处于饵料气味范围中、且有充足的时间搜索诱饵、环境和群体均可模拟、实验条件可重复以及观察方便等一系列优点^[15], 是甲壳动物笼壶渔业中常用的研究手段^[16-20]。

鉴于此, 本实验通过在可控条件下的水池实验, 观察三疣梭子蟹对逃逸装置的行为反应, 对比笼内个体对不同安装位置逃逸口的行为反应差异, 探索逃逸口位置对释放效果的影响机制, 为相关渔业标准的制订和今后开展相关研究提供参考。

1 材料与方 法

1.1 实验样本来源及管理

实验于 2019 年 11 月和 2020 年 9 月, 在江苏省通州湾南通经济产业园三疣梭子蟹养殖基地内完成。使用规格为 2.11 m×1.21 m×0.80 m (长×宽×深) 的实验水箱开展个体逃逸行为的观察。

实验样本均采自池塘养殖的成体三疣梭子蟹。所选样本均为体型完整、活跃度较高、不处于临近蜕壳或蜕壳后生殖阶段的个体。个体被取样后放入暂养水池, 保持与池塘养殖一致的投饵频率和种类 [寻氏肌蛤 (*Musculus senhousi*) 或杂鱼] 暂养 2~3 d, 待个体摄食、移动等行为稳定后, 随机选取样本用于水池行为观察实验。此次实验中共采样 97 尾三疣梭子蟹开展行为观察, 甲宽范围 (130.7±

45.6) mm、甲高范围 (31.8±14.3) mm, 雌雄比例约 2 : 1。

1.2 实验蟹笼及逃逸口设置

采用东海近海经济作业中普遍使用的圆柱形蟹笼作为实验蟹笼。实验蟹笼框架底部直径 58 cm, 高 24 cm, 外罩网目尺寸 (2a) 为 40 mm 的聚乙烯 (PE) 网衣; 蟹笼共有 6 个侧面, 间隔设置 3 个外大内小、末端呈扁椭圆形的网片式入口 (图 1)。

选用规格为 30.0 cm×10.0 m×0.3 cm (长×高×厚) 的聚丙烯 (PP) 平板作为逃逸口基板, 在平板内开设一矩形逃逸口, 根据张洪亮等^[10-11]、白伦等^[12]矩形逃逸口海上实验以及此次实验对象的甲宽分布, 将逃逸口尺寸设置为长 20 cm、高分别 3.2 cm 和 4.0 cm, 并将平板沿框架安装于蟹笼侧面靠近底部的网衣外侧, 其逃逸口下缘距离平板下缘 2.5 cm (图 1-a)。

为比较三疣梭子蟹对不同位置 and 不同尺寸矩形逃逸口的行为反应, 分别对对照笼 (无逃逸口)、侧网底部设置逃逸口 (以下简称底部逃逸口, B32, 开口高 3.2 cm; B40, 开口高 4.0 cm) 以及侧网顶部设置逃逸口 (以下简称顶部逃逸口, T40, 开口高 4.0 cm, 由 B40 笼倒置形成, 图 1-b) 的实验笼进行水下观察。

1.3 行为观察及数据采集

从暂养的群体中随机选取 4~8 尾三疣梭子蟹放入实验笼内, 观察个体从放入开始直至当日实验结束所有时间内的个体行为, 行为观察实验的时间为每日的 15:00 到次日 12:00, 并符合本实验室动物伦理使用规范; 为了强化笼内个体的逃逸行为, 观察期间未设置诱饵框; 为了模拟野外水

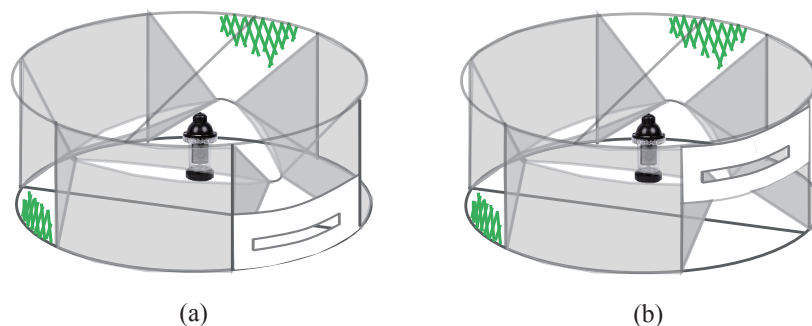


图 1 实验蟹笼逃逸口及摄像头设置

(a) 侧网底部逃逸口; (b) 侧网顶部逃逸口。

Fig. 1 Configuration and mounting of escape vents of crab pots and underwater observation devices

(a) located at bottom edge of side panel; (b) located at top edge of side panel.

深较大时的行为, 实验全程在黑暗的环境下开展。

使用云台式旋转防水红外水下摄像头(品牌: 晟优, 型号: FS-412)进行个体行为观察, 摄像头设置于蟹笼的中央位置(图 1); 对观察到的视频内容进行录像并存储, 再通过对存储视频剪辑分析, 实现个体行为的鉴定及量化。

为了便于定量分析, 将个体从放入笼内直至逃逸离开蟹笼的行为过程划分为 4 个阶段。

探索: 个体被放入笼内开始, 通过在笼内爬行(或游泳)、有目的地搜索逃逸出口或食物;

发现并接近逃逸口: 探索行为在逃逸口附近中断, 个体在逃逸口附近停留一段时间;

穿越企图: 个体通过姿态调整, 尝试将部分步足、游泳足、螯或部分头胸甲伸入逃逸口;

逃逸: 身体全部穿越逃逸口, 完全脱离逃逸口并不再返回。

鉴于实验条件限制和研究目的, 仅对个体探索阶段的时刻和持续时间、发现并接近逃逸口的时刻和距离入笼的持续时间、逃逸口前停留的时间、个体穿越(或卡住)逃逸口的时间、是否企图逃逸、是否逃逸成功、个体一次逃逸行为中企图穿越逃逸口的次数等行为进行了量化, 并记录个体在笼内的运动方向、个体间的相互行为、接近和穿越逃逸口的方向和姿态。

1.4 数据分析

将三疣梭子蟹在笼内以及对逃逸口的行为离散成不同阶段, 并假设不同阶段的行为事件之间相互独立, 对于不同阶段中特征行为的持续时间, 如发现和接近逃逸口、逃逸口前停留时间, 个体穿越逃逸口花费的时间等, 使用方差分析(ANOVA)对比不同逃逸口配置之间的差异。对于个体发现并接近逃逸口后, 是否企图逃逸以及个体能否穿越逃逸口等具有二项分布特征的行为, 使用广义线性混合模型(GLMM, Logit 分布)分析行为与不同影响因子之间的关系。采用 R 语言 lme4 程序包中 glmer 函数实现 GLMM 模型分析。实验过程中操作人员严格遵守上海海洋大学实验动物伦理规范, 并按照上海海洋大学实验动物伦理委员会制定的规章制度执行。

2 结果

对三疣梭子蟹的行为观察共持续 214 h, 其

中对照蟹笼观察 47 h, 底部逃逸口实验笼观察 85 h, 顶部逃逸口实验笼观察 82 h; 累计观察到个体接近逃逸口 182 次, 企图穿越逃逸口 162 次, 成功穿越逃逸口 73 次。

2.1 探索行为

三疣梭子蟹自入笼开始, 首先会保持静止一段时间 [(28±16) min] 以适应笼内环境, 而后表现出间歇性的探索行为; 几乎在所有观察时段内都有探索行为的发生, 但 18:00—24:00 是探索频率较高的时间范围, 个体在笼内探索行为的活跃程度和时间范围在对照笼与实验笼之间没有明显差异。水下观察显示, 无论是在对照笼还是实验笼中, 三疣梭子蟹的探索行为大多发生在蟹笼底部, 表现为个体背靠侧网做周向爬行(如磨盘运动, 顺时针和逆时针方向并无明显差异)寻找逃逸出口或食物, 绕行一周的持续时间约为 2 min; 当遭遇其他活跃个体时会表现出较为强烈的竞争行为, 即高举双螯、对峙驱赶, 企图吓退对方或迫使对方改变运动方向; 当遭遇静止个体时竞争行为相对缓和, 部分个体甚至尝试通过游泳或攀爬越过静止个体继续探索行为。在探索行为阶段, 笼内个体在蟹笼底部搜索一段时间后开始垂直方向探索, 即沿侧网网壁攀爬以探索蟹笼上部空间(图版-1)、并会停留在入口网片上方(图版-2), 而后继续搜索蟹笼上部空间。

2.2 发现和接近逃逸口

水下观察发现, 笼内三疣梭子蟹通过笼底探索行为能轻易地定位、发现并接近逃逸口, 表现为当个体搜索至逃逸口附近后停止搜索, 在逃逸口附近停留, 停留时间分别为 (29.8±19.7) s (B32) 和 (28.3±33.0) s (B40, 与 B32 无显著性差异, $P=0.965$); 部分个体甚至会在垂直探索阶段的向下搜索行为中发现底部逃逸口。当多个三疣梭子蟹同时出现在底部逃逸口附近时, 会表现出明显的竞争行为(图版-3)。图 2 描述了个体对不同逃逸口发生逃逸行为的过程及对应量化指标。一个观察日内, 个体发现并接近底部逃逸口的平均持续时间分别为 (1.66±0.81) h (B32) 和 (2.30±2.07) h (B40), 平均次数分别为 2.5 次 (B32, 图 2-a) 和 1.42 次 (B40, 图 2-b)。个体首次发现并接近逃逸口的时间 [平均花费 (0.64±0.45) h] 在 B32 和 B40 之间没有显著性差异 ($P=0.078$); 如果将单个个体发现并



图版 三疣梭子蟹在不同逃逸阶段的行为

1. 沿侧网攀爬至入口上方; 2. 个体停留于入口上方; 3. 底部逃逸口附近多个体竞争行为; 4. 左侧接触 B32 逃逸口; 5. 入口上方停留个体尝试接触 T40 逃逸口; 6. 沿蟹笼顶部网片攀爬接近顶部逃逸口; 7. 被 B32 逃逸口卡住; 8. 穿越 B40 逃逸口; 9. 穿越 T40 逃逸口。

Plate Behavior of *P. trituberculatus* in different phases of escaping through vents

1. climbing upwards along side panel; 2. staying on the upper panel of entrance; 3. aggressive behavior in front of the escape vent; 4. touching the B32 escape vent from leftside; 5. touching the T40 escape vent after staying on the upper panel of entrance; 6. touching the T40 escape vent by climbing along top panel; 7. wedged in the B32 vent; 8. passing through the B40 vent; 9. passing through the T40 vent.

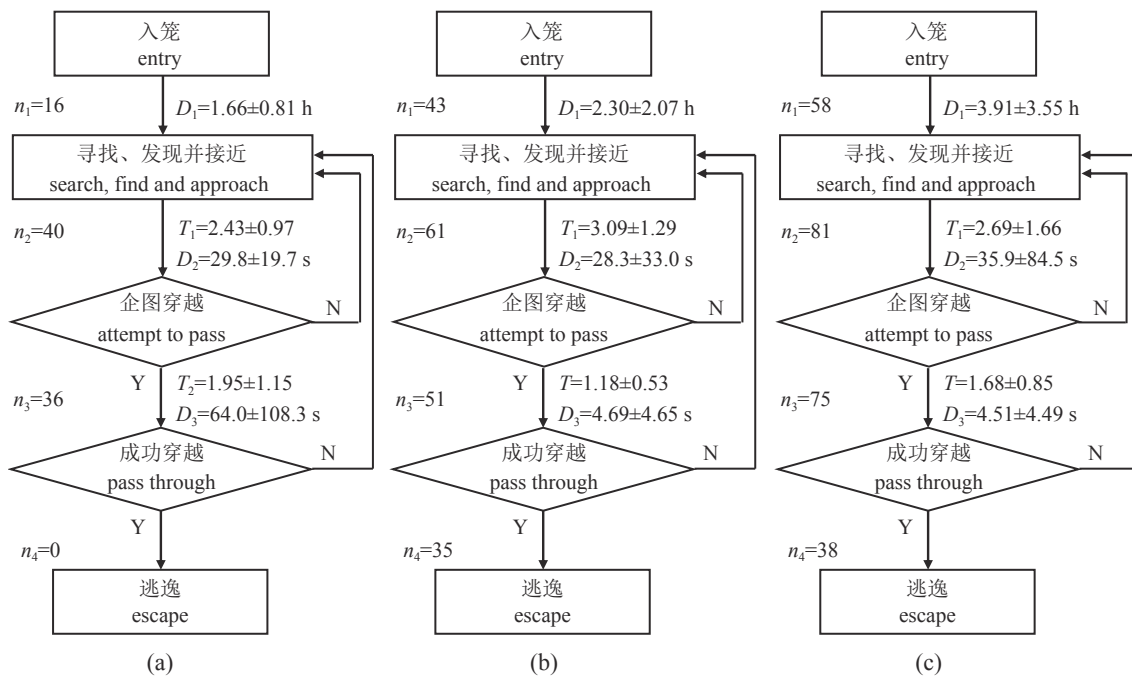


图 2 三疣梭子蟹对不同逃逸口的逃逸行为过程及量化指标

(a) B32 逃逸口, (b) B40 逃逸口, (c) T40 逃逸口; n. 个体数量, D. 对应行为的平均持续时间, T. 对应行为的平均次数。

Fig. 2 Procedure and quantitative indicators in different phases of escaping behavior of *P. trituberculatus*

(a) B32 vent, (b) B40 vent, (c) T40 vent; n. number of crabs, D. average duration of the corresponding behavior, T. average times of the corresponding behavior.

接近逃逸口的行为视为独立事件, 那么在一个观察日内, 实验笼内个体发现和接近逃逸口的平均次数分别为 (2.43±0.97) 次 (B32) 和 (3.09±1.29) 次 (B40), 两者间无显著性差异 ($P=0.448$)。

笼内个体只有通过垂直探索行为才有机会发现并接近顶部逃逸口。虽然部分三疣梭子蟹能直接沿侧网网壁攀爬直接发现逃逸口, 但多数顶部逃逸口的发现是发生在个体攀爬至入口网片并停留后的探索行为中; 个体在顶部逃逸口 (T40) 附近的平均停留时间 (35.9±85.0) s, 与底部逃逸口无显著性差异 ($P=0.464$)。一个观察日内, 个体首次及平均发现并接近顶部逃逸口的时间分别为 (1.38±0.51) h 和 (3.91±3.55) h (图 2-c), 均显著大于底部逃逸口 (首次发现 $P<0.01$; 平均发现 $P<0.001$); 个体发现并接近顶部逃逸口的平均次数为 1.40 次 (图 2-c), 与相同尺寸的底部逃逸口 (T40) 基本一致, 考虑到个体逃逸后笼内数量的减少, 实际个体发现并接近顶部逃逸口的平均次数为 (2.69±1.66) 次, 与底部无显著性差异 ($P=0.579$)。

2.3 企图逃逸

三疣梭子蟹发现并接近逃逸口后, 并不会立

即穿越逃逸, 而是稍作停留后再尝试逃逸。通过视频分析发现, 接近底部逃逸口的三疣梭子蟹中 86.1% (B32 和 B40 分别为 90% 和 83.61%, 图 2-a 和图 2-b 的个体尝试穿越逃逸口, 而 13.9% 的个体选择远离逃逸口。企图穿越的三疣梭子蟹会从逃逸口的左侧 (52.8%, 图版-4)、右侧 (41.7%) 及上方 (5.5%) 等方向接触逃逸口。

对于顶部逃逸口, 企图逃逸的三疣梭子蟹会根据自身和逃逸口的位置, 不断调整自身姿态, 使其能顺利穿越逃逸口。87.2% 接近顶部逃逸口的个体选择逃逸尝试 (图 2-c), 并分别从左上 (8.6%)、左下 (28.8%, 图版-5)、正下 (12.9%)、右上 (5.4%, 图版-6)、右下 (14.0%) 等方向接触逃逸口, 部分个体 (17.3%) 尝试从多个方向不断调整后接触逃逸口。

影响接近逃逸口的个体企图穿越逃逸口可能性的因素尚不明确, 水下观察难以描述这一行为的触发机制。GLMM 模型 (实验的日期作为随机因素) 分析结果 (表 1) 显示, 个体尺寸、逃逸口位置和尺寸、笼内的个体数量以及距离入笼的时间等对个体是否会企图穿越逃逸口行为都没有显著影响 ($P>0.05$)。

表 1 三疣梭子蟹不同阶段逃逸行为与主要影响因素 GLMM 模型拟合

Tab. 1 Output of GLMM fit for main factors that affect escaping behavior of *P. trituberculatus*

影响因素 factors	企图穿越 attemp of passing through vents				成功穿越 success in passing through vents				
	期望值 estimated	标准误 SE	Z值 Z-value	P值 P-value	期望值 estimated	标准误 SE	Z值 Z-value	P值 P-value	
截距 intercept	5.043	5.338	0.945	0.345	-0.808	0.633	-1.276	0.202	
个体尺寸 crab size	0.734	0.670	1.097	0.273	0.744	0.401	1.856	0.063	
笼内数量 number of crabs	0.131	0.239	0.548	0.584	0.348	0.142	2.445	0.015	
逃逸口 escape vent	位置 location	0.802	0.783	1.024	0.306	-0.670	0.412	-1.625	0.104
		高度 height	-0.998	1.263	-0.790	0.429	—	—	—
距离入笼时间 duration of stay	0.020	0.142	0.138	0.890	0.001	0.068	0.013	0.990	

注: “—”表示未检测。
Notes: “—” no detection.

2.4 逃逸口穿越

所有个体均采用侧身的方式 (图版-7、8、9, 方向取决于个体接近逃逸口时的方向) 穿越逃逸口, 即个体首先将一侧的游泳足、步足和螯足伸入逃逸口, 随后将头胸甲的一端伸入逃逸口, 依靠步足爬动、游泳足划水推动, 意图使头胸甲全部穿越逃逸口。由此可见, 头胸甲高度是决定个体能否穿越逃逸口的关键因素。当然, 逃逸口的位置

对个体穿越逃逸口的行为也有一定的影响。对于底部逃逸口, 从笼底接近的个体可轻松跨越逃逸口; 但个体接近顶部逃逸口时的位置和方向要复杂得多, 个体既可能从底部直接沿侧网向上攀爬接触逃逸口, 也可能从入口网片上方侧向接触到逃逸口 (图版-5), 甚至可能沿顶部网片攀爬靠近并接触逃逸口 (图版-6); 无论是从哪个方向接触顶部逃逸口, 个体必定需要花费更多精力和机会。

当逃逸口高度小于甲高时 (大多发生在 B32

逃逸口), 个体头胸甲会被卡在逃逸口(图版-7), 此时个体大多会沿逃逸口横向移动, 同时两螯夹住逃逸口边缘尝试调整个体姿态, 并伴随身体左右晃动, 尽可能使头胸甲穿越逃逸口; 若尝试失败, 则会调转头胸甲方向, 用头胸甲的另一侧重复上述过程。部分三疣梭子蟹会表现出间歇性的剧烈抖动, 持续时间为(23.60±27.61) s, 抖动 2~3 次失败后, 部分个体退回逃逸口附近片刻后继续尝试穿越, 部分则停止逃逸行为并远离逃逸口。此次观察实验中, 由于所选的研究对象均为成体, 个体较大, 均未能穿越 B32 逃逸口。根据视频分析, 在个体被卡住的情况下, 个体尝试穿越逃逸口平均(1.95±1.15)次, 持续时间(64.0±108.3) s(图 2-a)。

若逃逸口高度大于个体甲高时(大多发生在 B40 和 T40 逃逸口), 头胸甲整体穿越并成功逃逸(图版-8, 9); 水下观察发现, 虽然所有尝试穿越逃逸口的个体都最终成功逃逸, 但部分三疣梭子蟹在尝试穿越逃逸口后会退缩, 片刻后继续尝试穿越, 如此重复多次最终成功穿越。据观察, 企图穿越 B40 逃逸口的个体中 68.7% 的最终逃逸成功(图 2-b), 穿越过程持续时间为(4.69±4.65) s, 平均接触逃逸口(1.18±0.53)次, 均显著小于个体被卡住(B32)的情况($P<0.001$); 企图穿越 T40 逃逸口的个体中 50.7% 最终逃逸成功(图 2-c), 平均需要(1.68±0.85)次穿越尝试(显著大于底部逃逸口, $P<0.001$), 但平均持续时间为(4.51±4.49) s, 与底部逃逸口差异不大($P=0.815$)。

GLMM 模型分析结果(表 1)表明, 笼内的个体数量、个体尺寸对成功穿越逃逸口行为分别具有显著影响($P=0.015$)和边际显著影响($P<0.1$), 而逃逸口位置和距离入笼的时间等因素对个体穿越的成功率无显著影响。

实验期间未使用饵料, 从笼中逃逸的个体几乎没有再次入笼的意愿, 未观察到已逃逸个体通过穿越逃逸口再次入笼的行为, 仅观察到逃逸个体通过入口再次入笼行为 2 次; 未观察到笼内个体穿越入口的逃逸行为。

3 讨论

此次实验首次通过水下观察, 系统描述了三疣梭子蟹对逃逸装置的行为反应以及安装位置对个体逃逸行为的影响。虽然水池观察的实验环境、

笼内外的群体密度和分布、个体生理状况及群体间的相互行为等都无法准确模拟实际作业环境, 观察结果并不能完全反映实际作业环境下的反应行为, 仍需海上实地观察加以验证, 但实验结果对于近海蟹笼渔具的结构优化及渔业管理仍具有一定的参考意义。

蟹类、龙虾等甲壳动物动作灵活、行为多样, 对笼壶渔具的行为反应较鱼类等更加复杂, 人为将个体对笼壶的连续行为离散成不同阶段, 进而探索不同阶段的个体行为特征及其主要的影响因素和影响机制是研究甲壳动物行为的常用研究方法^[18, 21-23]。此次研究中, 将三疣梭子蟹对逃逸口的反应行为划分 4 个阶段, 进而比较逃逸口位置在不同行为阶段下对笼内个体逃逸的影响。

探索行为观察结果显示, 笼内个体能轻易定位、发现并接近底部逃逸口, 且开口高度对个体的探索行为没有明显的影响, 虽然个体从入笼到发现并接近的持续时间和平均接近次数在 B32 和 B40 之间存在差异, 但这些差异与笼内个体数量有关, 即 B32 逃逸口高度较小限制了个体的逃逸, 因而笼内个体数量保持不变, 而 B40 笼内个体数量随着逃逸逐渐减少, 造成个体接近次数减少, 持续时间增加; 对比个体首次发现和接近逃逸口的时间, 二者间没有观察到显著的差异。对于顶部逃逸口, 个体只有通过垂直探索行为才可能定位并发现逃逸口, 因此发现和接近所需的时间较底部逃逸口更大, 但平均接近次数与底部逃逸口接近, 这表明在充分的浸泡时间下, 个体发现并接近不同位置逃逸口的机会差异不大。

多数成功发现和接近逃逸口的个体会尝试穿越逃逸口, 但也有超过 10% 的个体会选择离开逃逸口, 且逃逸口的位置对此行为没有显著影响, 造成个体不愿逃逸的真实原因难以掌握, 一方面可能是因为龙虾和蟹类等甲壳动物本身具有穴居习性, 会将笼壶作为避难所而不愿逃逸^[15, 24-27], 在没有诱饵的情况下逃逸个体再次入笼(2 次)也说明了这一点; 另一方面此次实验样本均来自于养殖群体, 在生长发育过程中长期处于饵料充沛、缺乏捕食者威胁且群体密度较高等状态, 三疣梭子蟹本身的逃逸意愿已弱化, 且手工放入的个体较自行入笼的个体在笼内的行为更加平静^[21], 也可能是导致个体不愿逃逸的原因。

当逃逸口高度不足(B32)时, 所有被卡住的个体都未能穿越而返回笼内。Stasko^[28]认为个体

能否通过逃逸口取决于其身体最大截面, 并提出用手能将个体推过的逃逸口尺寸是个体能穿越的最小尺寸; Treble 等^[29]认为理论上逃逸口尺寸大于个体对应尺寸时都能有效释放。甲壳类坚硬的头胸甲和行为的敏捷性使其能够定向到最有利的逃生位置, 因此刚性释放装置较柔性释放装置或网目尺寸等具有更加精确的渔获选择性能^[16, 30-31], 但 Krouse^[32]认为逃逸口需要比个体对应尺寸大 2~3 mm 时才能起到有效释放的效果。此次水下观察为模拟低照度环境下的个体逃逸, 虽配备了红外摄像装备, 无法识别对不同尺寸个体的标识, 但水下观察总体反映出矩形逃逸口对三疣梭子蟹具有精确的选择性。

水下观察发现, 企图穿越顶部逃逸口的个体需要花费更多的时间和精力调整姿态和位置以更好地匹配逃逸口, 尝试穿越逃逸口的次数也显著大于底部逃逸口; Winger 等^[16]、Krouse^[32]认为, 企图逃逸的个体对身体的操纵和姿态调整能力是其能否穿越狭窄逃逸口的关键因素, 当不能准确调整头胸甲位置时大多以逃逸失败告终。不难想象, 个体的尺寸以及逃逸口的位置理应对个体穿越逃逸口的成功率有直接的影响, 因为所有的个体都能轻易接触到底部逃逸口, 而攀爬至入口网片上方行为中大个体可以跨越更大的距离而更轻易接触顶部逃逸口。然而, GLMM 拟合结果表明, 逃逸口位置和个体大小对穿越逃逸口的成功率没有显著影响。一方面可能是因为此次观察实验选用了尺寸较大的成体作为研究样本, 个体间尺寸差异整体较小削弱了个体尺寸对逃逸成功率的影响; 另一方面反映出三疣梭子蟹具有较强的个体姿态调整能力。观察发现, 无论是底部还是顶部逃逸口, 企图穿越的个体在数次姿态调整后都能准确地定位逃逸口并将部分游泳足、步足、螯和头胸甲一侧伸入逃逸口。当然, 笼内的竞争行为可能会刺激个体的逃逸行为, 笼内的个体数量对逃逸成功率具有显著影响。

虽然不同逃逸行为阶段的量化指标未能反映出底部逃逸口在三疣梭子蟹释放方面具有统计学意义上的显著优越性, 但水下观察结果仍然表明底部逃逸释放效果优于顶部的逃逸口(底部 82% > 顶部 66%, 图 2-b, c)。Winger 等^[16]通过实验室观察, 发现企图从距离蟹笼底部 5 cm 的释放装置逃逸的灰眼雪蟹 (*Chionoecetes opilio*) 数量是距离蟹笼底部 10 cm 释放装置的 3 倍以上; Jirapun-

pipat 等^[33]和 Boutson 等^[6]在实验室条件下发现底部的释放装置对青蟹 (*Scylla olivacea*) 和远海梭子蟹 (*Portunus pelagicus*) 具有最好的释放效果。因此有理由相信, 侧网底部是东海蟹笼渔具逃逸装置安装的首选位置, 这也是目前东海近海蟹笼渔具选择性研究最为常用的安装位置^[10-12]。

对于如东海蟹笼此类拥有对称结构、无法控制着底姿态的蟹笼, 在侧网底部和顶部各安装逃逸装置无疑是理想的配置方案, 一方面可以确保底部逃逸口较好的释放效果, 另一方面多个释放装置可以避免单个逃逸口被堵塞后失去释放效果的情况^[34]、增加个体接触装置的机会^[35-36], 顶部的逃逸口还可以防止蟹笼丢失较长时间后陷入海底使底部逃逸口失去作用而产生幽灵捕捞效应^[37]。但是当前东海近海蟹笼渔具规格较小, 单船携带数量巨大, 强制安装 2 个以上逃逸口既增加了渔具成本和作业中的维护成本, 还会增加渔业管理和渔具监管的难度, 推广难度较大。

此次实验结果表明, 笼内三疣梭子蟹从底部和顶部逃逸口逃逸成功率差异主要体现在探索阶段以及逃逸口穿越阶段(虽然差异并不显著)。个体能否穿越逃逸口, 取决于个体及逃逸口尺寸、个体姿态操纵能力、笼内的竞争等诸多行为, 通过技术手段提升个体穿越逃逸口成功率难以实现。众所周知, 甲壳动物的行为大多发生在海底^[8, 16], 但越来越多的研究发现笼壶附近(内外)的个体在水平方向的探索行为未能实现其行为目的(饵料、逃逸口甚至竞争者搜索)后会改变探索行为方向。Stiansen 等^[38]发现近 40% 的堪察加拟石蟹 (*Paralithodes camtschaticus*) 在入笼阶段表现出垂直探索行为, Zhou 等^[21]、Miller^[30]在水池观察实验中发现, 笼内的拟石蟹能通过攀爬侧网网衣接近并穿越入口开口实现逃逸; 而笼内的蟹类个体可以从位置较高释放装置逃逸^[6, 16, 33], 这些都表明个体在笼内普遍存在垂直探索行为。因此, 对于东海近海蟹笼这类对称结构的蟹笼, 设计和设置释放装置时应注重提升笼内个体探索行为积极性, 或为个体创造更多垂直方向探索行为的机会, 保证足够的浸泡时间, 如此可以减弱逃逸口位置对个体逃逸行为的影响。

相比国外常见的矩形、圆台形等蟹笼, 东海近海经济作业使用的蟹笼整体结构扁平, 即便逃逸口安装于顶部, 其开口下缘距离底部也仅 20 cm, 而且 3 个入口伸入笼内并连接在一起形成一

个平台(图 1-a), 笼内个体在垂直探索时都能轻易攀爬至入口上方并做停留; 实际作业过程中, 诱饵框被设置在笼壶中央, 个体垂直探索行为可能更加频繁。此外, 此次观察的对象均取自于养殖群体, 长期充沛的食物供给和捕食者的缺失弱化了个体间争夺空间和食物等竞争性行为和逃逸行为, 而当前实际作业条件下的群体或个体间的竞争, 特别是大个体会赢得争斗迫使小个体发生逃逸^[33] 等行为也将强化释放装置对小个体的释放效果、同时弱化安装位置对其性能的影响。Zhang 等^[14] 通过海上渔获实验, 发现虽然两侧安装逃逸口的蟹笼比单侧安装逃逸装置(50% 在底部, 50% 在顶部)的蟹笼更具选择性, 但未表现出统计学显著意义, 这与本次水下观察结果相匹配, 表明在东海近海蟹笼渔业中, 仅单侧设置合理尺寸的逃逸口也能实现释放幼蟹的渔业管理目标。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 俞存根, 宋海棠, 姚光展, 等. 浙江近海蟹类资源合理利用研究[J]. 海洋渔业, 2003, 25(3): 136-141.
Yu C G, Song H T, Yao G Z, et al. Study on rational utilization of crab resources in the inshore waters of Zhejiang[J]. Marine Fisheries, 2003, 25(3): 136-141 (in Chinese).
- [2] 宋海棠, 俞存根, 薛利建, 等. 东海经济虾蟹类 [M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
Song H T, Yu C G, Xue L J, et al. Commercial crustaceans in the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006 (in Chinese).
- [3] 贺舟挺, 刘子藩, 周永东. 浙江蟹笼渔业现状的探讨[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2007, 26(1): 54-58.
He Z T, Liu Z F, Zhou Y D. Study on status of the crab pot fishery in Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2007, 26(1): 54-58 (in Chinese).
- [4] 张健, 王忠秋, 管卫兵. 近海蟹笼两种主要渔获蟹类的渔业生物学特性[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(5): 540-545.
Zhang J, Wang Z Q, Guan W B. Fishery biology of two crab species caught by offshore pots[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2015, 30(5): 540-545 (in Chinese).
- [5] Tallack S M L. Escape ring selectivity, bycatch, and discard survivability in the New England fishery for deep-water red crab, *Chaceon quinque-dens*[J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(8): 1579-1586.
- [6] Boutson A, Mahasawasde C, Mahasawasde S, et al. Use of escape vents to improve size and species selectivity of collapsible pot for blue swimming crab *Portunus pelagicus* in Thailand[J]. Fisheries Science, 2009, 75(1): 25-33.
- [7] Rotherham D, Johnson D D, Macbeth W G, et al. Escape gaps as a management strategy for reducing bycatch in net-covered traps for the giant mud crab *Scylla serrata*[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2013, 33(2): 307-317.
- [8] Brown C G. The effect of escape gaps on trap selectivity in the United Kingdom crab (*Cancer pagurus* L.) and lobster (*Homarus gammarus* L.) fisheries[J]. ICES Journal of Marine Science, 1982, 40(2): 127-134.
- [9] 吴常文. 一种资源保护型蟹笼的初步试验[J]. 海洋渔业, 1996, 18(3): 114-116.
Wu C W. Preliminary tests on a kind of crab pot for protecting resources[J]. Marine Fisheries, 1996, 18(3): 114-116 (in Chinese).
- [10] 张洪亮, 林显鹏, 徐汉祥, 等. 选择性梭子蟹笼的设计与试验[J]. 渔业现代化, 2010, 37(4): 49-53.
Zhang H L, Lin X P, Xu H X, et al. Design and experiment on selective crab pot for *Portunus trituberculatus*[J]. Fishery Modernization, 2010, 37(4): 49-53 (in Chinese).
- [11] 张洪亮, 徐汉祥, 黄洪亮, 等. 东海区蟹笼渔具的选择性研究 [J]. 水产学报. 2010, 34(8): 1277-1284.
Zhang H L, Xu H X, Huang H L, et al. Selectivity of crab pot for *Portunus trituberculatus* in the East China Sea region[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(8): 1277-1284 (in Chinese).
- [12] 白伦, 张新峰, He P G, 等. 基于张网渔获的蟹笼渔具对三疣梭子蟹的相对选择性[J]. 中国水产科学, 2015, 22(2): 340-346.
Bai L, Zhang X F, He P G, et al. Relative selectivity of crab pots for *Portunus trituberculatus* based on stow-net catch in the East China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(2): 340-346 (in Chinese).
- [13] 张健, 王佚兮, 裴占文, 等. 东海近海蟹笼网目尺寸对三疣梭子蟹的选择性[J]. 中国水产科学, 2020, 27(11): 1341-1349.
Zhang J, Wang Y X, Pei Z W, et al. Mesh size selectivity of crab pots for swimming crab *Portunus trituberculatus* in the East China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(11): 1341-1349 (in Chinese).
- [14] Zhang J, Pei Z W, He P G, et al. Effect of escape vents on retention and size selectivity of crab pots for swimming crab *Portunus trituberculatus* in the East China Sea[J]. Aquaculture and Fisheries, 2021, 6(4): 340-347.
- [15] Miller R J, Addison J. Trapping interactions of crabs and

- American lobster in laboratory tanks[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1995, 52(2): 315-324.
- [16] Winger P D, Walsh P J. The feasibility of escape mechanisms in conical snow crab traps[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2007, 64(8): 1587-1591.
- [17] Archdale M V, Añasco C P, Kawamura Y, *et al.* Effect of two collapsible pot designs on escape rate and behavior of the invasive swimming crabs *Charybdis japonica* and *Portunus pelagicus*[J]. *Fisheries Research*, 2007, 85(1-2): 202-209.
- [18] Smith G S, Sumpton W D. Behavior of the commercial sand crab *Portunus pelagicus* (L.) at trap entrances[J]. *Asian Fisheries Science*, 1989, 3: 101-113.
- [19] Karnofsky E B, Price H J. Behavioural response of the lobster *Homarus americanus* to traps[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, 46(9): 1625-1632.
- [20] 张鹏, 张秀梅. 日本蟳入笼行为及其地笼网逃逸口选择性的实验研究[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(2): 338-345.
- Zhang P, Zhang X M. Ingress behavior and escape vent selectivity of *Charybdis japonica* in the cage net[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(2): 338-345 (in Chinese).
- [21] Zhou S J, Shirley T C. Behavioural responses of red king crab to crab pots[J]. *Fisheries Research*, 1997, 30(3): 177-189.
- [22] Jury S H, Howell H, O'Grady D F, *et al.* Lobster trap video: *in situ* video surveillance of the behaviour of *Homarus americanus* in and around traps[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2002, 52(8): 1125-1132.
- [23] Bergshoeff J A, McKenzie C H, Best K, *et al.* Using underwater video to evaluate the performance of the Fukui trap as a mitigation tool for the invasive European green crab (*Carcinus maenas*) in Newfoundland, Canada[J]. *PeerJ*, 2018, 6: e4223.
- [24] Groeneveld J C, Khanyile J P, Schoeman D S. Escape-ment of the Cape rock lobster (*Jasus lalandii*) through the mesh and entrance of commercial traps[J]. *Fishery Bulletin*, 2005, 103(1): 52-62.
- [25] Nulk V E. The effects of different escape vents on the selectivity of lobster traps[J]. *Marine Fisheries Review*, 1978, 40(5-6): 50-58.
- [26] Sturdivant S K, Clark K L. An evaluation of the effects of blue crab (*Callinectes sapidus*) behavior on the efficacy of crab pots as a tool for estimating population abundance[J]. *Fishery Bulletin*, 2011, 109(1): 48-55.
- [27] Guillory V. Ghost fishing by blue crab traps[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 1993, 13(3): 459-466.
- [28] Stasko A B. Modified lobster traps for catching crabs and keeping lobsters out[J]. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 1975, 32(12): 2515-2520.
- [29] Treble R J, Millar R B, Walker T I. Size-selectivity of lobster pots with escape-gaps: application of the SELECT method to the southern rock lobster (*Jasus edwardsii*) fishery in Victoria, Australia[J]. *Fisheries Research*, 1998, 34(3): 289-305.
- [30] Miller R J. Effectiveness of crab and lobster traps[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1990, 47(6): 1228-1251.
- [31] Zhou S, Shirley T C. Performance of two red king crab pot designs[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54(8): 1858-1864.
- [32] Krouse J S. Effectiveness of escape vent shape in traps for catching legal-sized lobster, *Homarus americanus*, and harvestable-sized crabs, *Cancer borealis* and *Cancer irroratus*[J]. *Fishery Bulletin*, 1978, 76(2): 425-432.
- [33] Jirapunpipat K, Phomikong P, Yokota M, *et al.* The effect of escape vents in collapsible pots on catch and size of the mud crab *Scylla olivacea*[J]. *Fisheries Research*, 2008, 94(1): 73-78.
- [34] Broadhurst M K, Millar R B, Hughes B. Utility of multiple escape gaps in Australian *Scylla serrata* traps[J]. *Fisheries Research*, 2018, 204: 88-94.
- [35] Brown R S, Caputi N. Conservation of recruitment of the western rock lobster (*Panulirus cygnus*) by improving survival and growth of undersize rock lobsters captured and returned by fishermen to the sea[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1986, 43(11): 2236-2242.
- [36] Nishiuchi S. A study on size-selectivity of hair crab pots[J]. *Scientific Reports of the Hokkaido Fisheries Experimental Station*, 2003, 64: 1-103.
- [37] Stearns G, Conrad R, Winfrey D, *et al.* Dungeness crab trap catch efficiency related to escape ring location and size[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2017, 37(5): 1039-1044.
- [38] Stiansen S, Fernö A, Furevik D, *et al.* Horizontal and vertical odor plume trapping of red king crabs explains the different efficiency of top-and side-entrance pot designs[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2010, 139(2): 483-490.

Effect of escape vent location on escaping behavior of *Portunus trituberculatus* in crab pots

ZHANG Jian^{1,2,3}, QIU Yu¹, PEI Zhanwen¹, WU Jianhui⁴, SHI Jiagao⁵, CHEN Jinhui^{1,4*}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. National Engineering Research Centre for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Shanghai Aquatic Wildlife Conservation and Research Center, Shanghai 200092, China;

5. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: Crab pots have become one of the main fishing gears for harvesting swimming crabs in the East China Sea since the 1980s. However, the tremendous fishing effort of the crab pot fishery in the East China Sea has brought great pressure on crab resources. Installation of escape vents on crab pots is one of the potential technical measures to improve the fishing efficiency of pots and conserve crab resources. In this study, to examine the effect of the location of escape vents on escaping behavior of *Portunus trituberculatus* in crab pots, the response behavior of *P. trituberculatus* to three rectangular escape vent configurations, including B32 vent, escape vent with 3.2 cm opening height and located at the bottom edge of the side panel, B40 vent, escape vent with 4.0 cm opening height and located at the bottom edge of the side panel, and T40 vent, escape vent with 4.0 cm opening height and located at the top edge of the side panel, was observed in a tank by infrared underwater cameras. Generalized linear mixed models (GLMM) with logit distribution were used to analyze the effect of the location of escape vents and quantitative behavioral indicators derived from underwater observations, including the number of crabs, duration of stay in pots, and so on, on the escaping behavior of crab. The results from underwater observation indicated that *P. trituberculatus* pre-stocked in the pots could detect and approach the bottom vents readily in their search behavior on the floor of pots. The detection and approaching of the top vents only took place in their vertical search behavior. Although the durations from ingress to first approaching and mean durations of all approaching the top vents were more than those for bottom vents, no significant difference in the mean number of times of approach was detected between the top and bottom vents. For crabs approaching vents, 87% of them attempted to pass through the vents and there was no significant difference in the attempt to pass through between bottom and top vents. The model fit of GLMM indicated that no significant quantitative behavioral indicators affected the escape attempts of crabs. All crabs walked sideways through vents, so whether crabs pass through an escape vent depends upon carapace depth. To better match the top escape vents, crabs spent more time and effort adjusting their posture and location. However, the output of GLMM fit shows that the location of escape vents has no significant effect on the ratio of crab escape, which indicates that *P. trituberculatus* are good at manipulating their body, while the effect of the number of crabs inside pots was a significant factor. According to behavior observation, it is suggested that the efficiency of the escape vent could be affected by the activity of search behavior of crabs and soaking time. Taking into account the structure of the crab pot and the current status of fisheries, the authors recommended an escape vent mounted at the bottom edge of the side panel should be a feasible technical measure.

Key words: *Portunus trituberculatus*; crab pot; escape vent; location; underwater observation

Corresponding author: CHEN Jinhui. E-mail: 1114260882@qq.com

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31001138, 31972844); National Key Research and Development Program of China (2020YFD0900803)