

克氏原螯虾对配合饲料感知能力的研究

冯玉铭^{1,2,3}, 王建志^{1,2}, 吴利⁴, 龚坤^{1,2}, 李为^{1,2,3}, 苑晶^{1,2}, 张堂林^{1,2,3}

- (1. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072;
2. 湖北省稻田综合养殖工程技术研究中心, 湖北 武汉 430072;
3. 中国科学院大学, 北京 100039;
4. 合肥师范学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为了解克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)对饲料感知的最大空间距离,在稻田养殖环境条件下,利用特定设计的试验设施,研究其对配合饲料的感知能力,以期合理确定养殖水体投饵点数量和空间布局、增加饲料利用率提供科学依据。结果显示,克氏原螯虾对配合饲料感知的最大间隔距离估算为 12 m;在食物间隔距离 3 m 和 6 m 捕获的雌虾与雄虾数量无显著性差异($\chi^2 > 1.19$, $df = 1$, $P > 0.270$),表明雌性与雄性对配合饲料的感知能力没有显著差异。食物感知-搜索时间与食物间隔距离呈正相关,在食物间隔距离为 3 m、6 m、9 m、12 m 时,食物感知-搜索的最短时间分别为(1.8±0.5) min、(5.0±1.1) min、(11.4±1.7) min、(25.2±2.4) min,最长时间分别为(3.4±0.9) h、(7.3±0.6) h、(9.0±0.8) h、(10.0±1.3) h。当食物间隔距离为 3 m 和 12 m 时,受到配合饲料刺激后分别有(68.3±1.6)%和(36.3±1.9)%的克氏原螯虾能在 3 h 内到达食物源。研究表明,克氏原螯虾对配合饲料的感知能力在 12 m 以内,食物间隔距离越小,感知-搜索时间越短。

关键词: 克氏原螯虾;感知能力;觅食行为;食物间隔距离

中图分类号: S963.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2023)01-0139-06

饲料精准投喂是水产集约化养殖管理的核心之一,是由投喂时间、投喂水平、投喂频次、投喂地点、投喂方式等技术要点构成的有机整体,是使养殖对象获取最佳生长速度、减少饲料浪费、降低残饵污染的有效途径(王华等, 2008)。动物内在的摄食节律是建立合理投喂时间和频次的生物学基础,克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)一天之内存在早晚 2 个相对集中的摄食高峰(冯玉铭, 2021);已有研究探讨了克氏原螯虾的适宜投喂水平问题(Jin et al, 2019; Luo et al, 2021)。在稻田和池塘养殖中,克氏原螯虾饲料投喂普遍采用人工撒投的方式,也就是在整个养殖水面均匀投喂,没有设置固定的投饵点(食台)。由于在池塘养殖中水草覆盖度一般在 60% 左右,稻田养殖中(水稻休耕期)水草和稻茬的覆盖度至少占 40%,采用这

种撒投方式,可能有相当比例的饲料投在草丛或稻茬中,也有一些饲料落在水草茎叶上、泥底裂缝中或凹凸不平的底质上。与基于网布制作的食台生境相比,草丛生境会显著降低克氏原螯虾的摄食效率,增加饲料残留率(冯玉铭, 2021)。为了减少残饵率,有必要在养殖水体设置一些固定的投饵点,以利于分散栖息的克氏原螯虾摄食。因此,在一定面积的水体如何确定投饵点的合理数量及相邻投饵点的适宜间隔距离是需要考虑的首要问题。为了解决以上问题,需要评估克氏原螯虾对饲料感知的最大空间距离。

水生动物通过化学感觉与外界环境进行信息交流,化学感觉在不同生活阶段都有着重要作用,如索饵、生殖、集群、洄游、躲避敌害等行为都不同程度地受到化学感觉作用的支配(Chivers et al, 1996; Zimmer & Butman, 2000)。化学感觉可分嗅觉和味觉,均是特殊分化了的外部感受器。甲壳动物的第一触角是主要的嗅觉器官,口器和步足是甲壳动物的味觉器官,口器(特别是大颚)与食物咀嚼有关,步足与捕食有关(苗玉涛等, 2002)。甲壳动物能利用触角化学感觉并识别有吸引力的食物(Derby, 2000; Derby et al, 2001),可在远处定位食物(Zimmer & Butman, 2000);化学刺激可引起甲壳类动物的摄食反应(Zimmer-Faust, 1989; Weissburg

收稿日期: 2021-06-06 修回日期: 2022-08-05

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0900304);湖北省重点研发计划项目(2021BBA230);湖北省技术创新专项重大项目(2018ABA102)。

作者简介: 冯玉铭, 1995 年生,男,硕士研究生,研究方向为水产养殖。E-mail: 2278195393@qq.com

通信作者: 张堂林, 1966 年生,男,研究员,主要从事水产养殖技术研究。E-mail: tlzhang@ihb.ac.cn

& Zimmer–Faust, 1991)。研究表明,氨基酸和糖都是引起甲壳类动物摄食行为的刺激性物质,尤其是氨基酸的刺激作用更强(Zimmer–Faust & Case, 1982; Zimmer–Faust et al, 1984; Rittschof & Buswell, 1989)。

根据现已掌握的资料,目前没有见到克氏原螯虾食物感知的空间距离和摄食行为的相关报道。在稻田养殖环境条件下,利用特定的试验设施,评估克氏原螯虾对配合饲料感知的最大间隔距离,估算从饲料刺激到进入食物源时的最短时间和最长时间,可为合理确定养殖水体投饵点数量和空间布局提供科学依据,也可为进一步改进传统投喂方式、提高饲料利用率提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2020年8–10月在湖北省大冶市克氏原螯虾养殖基地进行,试验虾共计3 600尾,规格整齐,附肢齐全,健康无病,体长(10.50±2.78) cm,体重(52.20±3.12) g。试验虾暂养于稻田中独立设置的多个围格(200 cm×150 cm)内,每天投喂1次配合饲料,暂养1周,使其适应试验环境。暂养和试验期间,水深25–27 cm,水温25–30℃,pH 8.1–8.5,溶解氧浓度5.2–7.5 mg/L,采用自然光照周期。试验所用饲料由广东海大集团股份有限公司生产的专用配合饲料,主要营养成分为粗蛋白质26.9%、粗脂肪5.8%、灰分5.7%、水分8.9%。

1.2 试验设计

在养殖水田中采用塑料网片制作防逃墙,设计了长方形的试验区 and 对照区及试验虾投放区(点),试验区和对照区与投放区分别有可移动的网片挡板相隔(图1)。试验区与对照区相同,长×宽均为20 m×1 m,投放区为正八边形(对边垂直宽度约1.2 m)。在试验区设置6个食物间隔距离(饲料与虾相隔距离),即投饵点与试验虾投放区挡板处的间距,由小到大依次是3、6、9、12、15、18 m;在对照区设置6个对应的非投饵点。每次试验时在试验区的某个投饵点及其对应的非投饵点分别安放一个六角形地笼(直径90 cm,高度40 cm)和高清红外摄像机(索尼H.264DVR),试验组的饲料投在地笼中心位置以作食物源;地笼用于监测捕到的试验虾数量,摄像机用于监测试验虾进入地笼的时间。地笼的6个侧面分别有向内的喇叭形入口(直径20 cm),试验虾经过入口可进入地笼,但难以逃出。

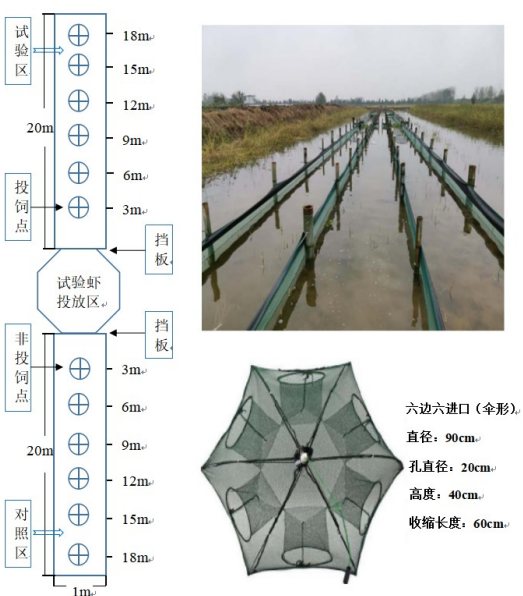


图1 克氏原螯虾摄食试验装置与设计
Fig.1 Schematic diagram and photograph of the trial facilities

1.3 试验步骤

试验设计程序如下:独立进行6个食物间隔距离试验,从最小间隔距离3 m开始,10次重复试验结束后,再开始6 m的间距试验,以此类推,直到最大间隔距离18 m的试验结束为止。每次试验开始时,把饥饿24 h的虾(60尾,性比为1:1)从暂养围隔移入试验装置的投放区,使其适应30 min;同时,在试验区的某一个投饵点安置地笼和摄像机。投放区试验虾适应时间结束的同时,在试验区投饵点的地笼里投放50 g配合饲料,对照区相应的非投饵点地笼里不投放配合饲料,把投放区通向试验区和对照区的挡板同时移出,试验虾可自由出入;与此同时,打开摄像机,随后间隔3、6、9、12 h观察统计进入试验区投饵点和对照区相应的非投饵点地笼的试验虾数量。试验持续12 h,用过的虾不再重复使用。

1.4 数据统计与分析

12 h试验结束后,统计试验区的每个投饵点及对照区的相应非投饵点地笼捕获的虾数量,按雌、雄分开记录。基于摄像机记录的影像资料,采用Windows Live影音制作软件,提取了试验期间(12 h)各区每个投饵点中第一尾虾和最后一尾虾进入地笼(即食物源)的时间,以及在不同时间段(0–3 h、3–6 h、6–9 h、9–12 h)地笼捕获的试验虾数量。通过以下指标评估克氏原螯虾对配合饲料的感知能力:

- (1)食物间隔距离。指食物与虾的直线距离,本研究是指投饵点与试验虾投放区挡板处的间距。
- (2)食物感知的最大间隔距离。指通过化学感

应主动发现食物并达到食物源(指投饲点地笼)的虾在食物开始投饲时离食物的最大距离。

(3)食物感知-搜索最短时间。指离食物源一定距离的一群虾,从食物投饲时开始直到进入食物源时所经历的最短时间;本研究以第一尾虾进入投饲点地笼所经历的时间来表示。

(4)食物感知-搜索最长时间。指离食物源一定距离的一群虾,从食物投饲时开始直到进入食物源时所经历的最长时间;本研究以最后一尾虾进入投饲点地笼所经历的时间来表示。

卡方检验用于分析在投饲点与非投饲点捕获的虾数量及投饲点捕获的雌虾与雄虾数量是否存在差异,若无显著的差异,则符合1:1理论假设;单因子方差分析(ANOVA)用于比较多个平均数之间的差异, t 检验用于比较2个均数之间的差异。所有平均数采用(均值±标准差)表示, $P<0.05$ 为差异显著。数据统计分析均使用Excel和SPSS进行。

2 结果

2.1 食物感知的空间距离

不同间隔距离的地笼捕获虾数量见图2。与对照组相比,试验组在3、6、9、12 m的间隔距离(投饲点)通过地笼捕获虾的数量占绝对优势,分别为(50.5±3.5)、(47.3±2.1)、(43.2±2.3)、(37.1±1.7)尾,分别是对照组的10.5、5.0、3.5、2.5倍。卡方检验表明,各试验组之间存在显著差异($\chi^2>32.2$, $df=1$, $P<0.00001$),不符合1:1的理论假设。但在15 m和18 m间距,尽管每次重复试验中试验组捕获虾的数量大于对照组,但与对照组没有显著差异(间隔15 m: $\chi^2=3.76$, $df=1$, $P=0.052$;间隔18 m: $\chi^2=1.25$, $df=1$, $P=0.263$);表明克氏原螯虾对配合饲料感知的最大间隔距离为12 m。

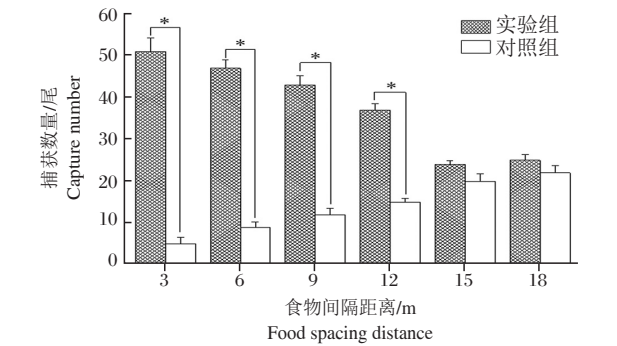


图2 不同食物间隔距离捕获的克氏原螯虾数量
Means with asterisk are significantly different
Fig.2 Number of red swamp crayfish captured at each food spacing distance

此外,试验区不同食物间隔距离捕获的雌雄虾数量存在一定的差异,性比变化没有表现出一定的规律性(图3)。在间距9 m捕获的雌虾显著多于雄虾($\chi^2=7.56$, $df=1$, $P<0.01$),而3、6、12 m间距捕获的雄虾均多于雌虾,但没有显著的差异($\chi^2>1.19$, $df=1$, $P>0.270$),符合1:1的理论假设。在食物感知的最大间距外(15 m、18 m),捕获的雌虾与雄虾数量相差很小,几乎接近1:1($\chi^2>0.007$, $df=1$, $P>0.803$)。

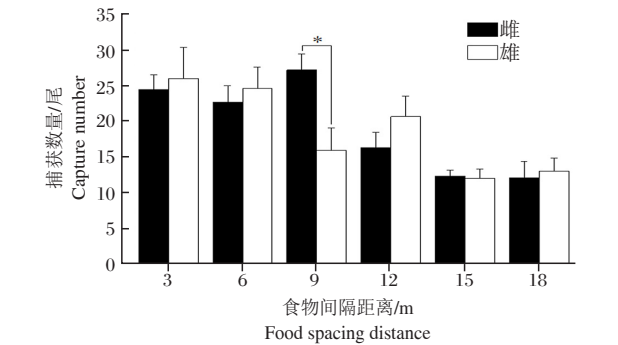
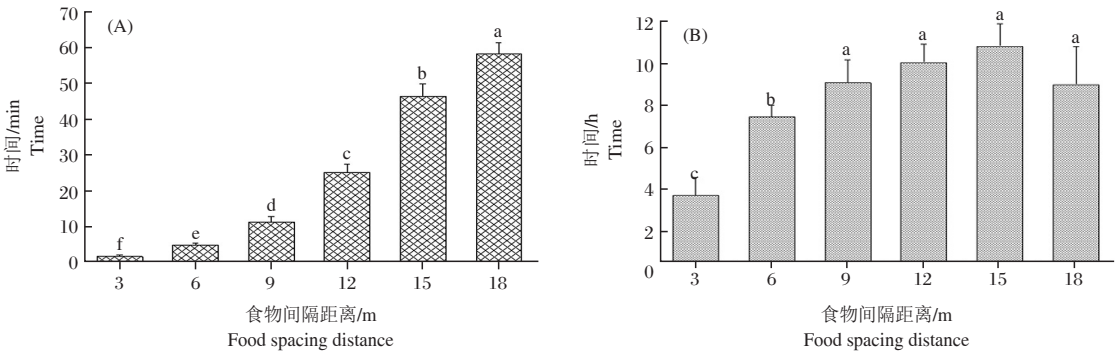


图3 不同食物间隔距离捕获的雌雄虾数量
Means with asterisk are significantly different
Fig.3 Number of female and male crayfish captured at each food spacing distance

2.2 食物感知-搜索时间

食物感知的最大间隔距离在12 m以内,食物感知-搜索时间与食物间隔距离呈正相关,间隔距离越大,食物感知-搜索时间越长。在食物间隔距离为3、6、9、12 m时,食物感知-搜索的最小时长分别为(1.8±0.5) min、(5.0±1.1) min、(11.4±1.7) min、(25.2±2.4) min(图4-A),最大时长分别为(3.4±0.9) h、(7.3±0.6) h、(9.0±0.8) h、(10.0±1.3) h(图4-B)。

不同食物间距的试验中,不同时间段进入食物源(投饲点)的虾占投放虾数量的百分比见图5。当食物间隔距离为3、6、9、12 m时,0~3 h内(从饲料投饲时开始计时)进入食物源的虾占比分别为(68.3±1.6)%、(51.1±2.0)%、(40.0±2.4)%、(36.3±1.9)%,占比随食物间距增加而呈现明显减少趋势;3~6 h内占比依次为(16.4±1.6)%、(16.0±1.7)%、(15.2±1.7)%、(16.3±1.8)%,占比与食物间距没有关联。在食物间距3 m试验中,6~9 h和9~12 h内没有虾进入地笼;在食物间距6 m试验中,6~9 h内还有少量虾进入地笼,9~12 h就没有虾进入;在食物间距9 m和12 m试验中,9~12 h还有少量虾进入地笼。结果表明,在食物感知的最大间隔距离内,克氏原螯虾接受配合饲料刺激后,超过50%的个体能在6 h以内进入食物源。



不同字母表示存在显著性差异
图 4 克氏原螯虾到达食物源的第一尾虾(A)和最后一尾虾(B)历时统计

Means with different letters are significantly different

Fig.4 Time for the first (A) and last (B) crayfish to reach the food at different food spacing distances

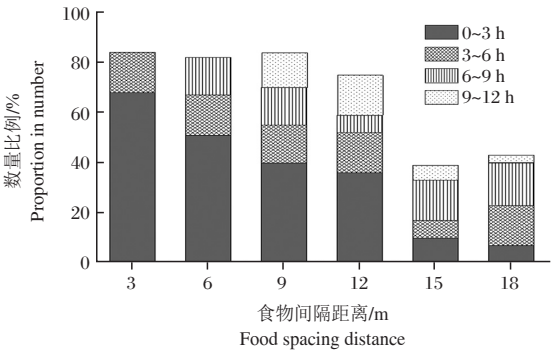


图 5 不同时间段到达食物源的虾数量占比

Fig.5 Proportion of crayfish reaching the food during each time interval for each food spacing distance

3 讨论

3.1 克氏原螯虾对食物感知的空间范围

甲壳类动物具有高度发达的嗅觉,可通过多种化学感觉来感知和识别环境中的化学物质(Zimmer-Faust, 1989)。Hindley (1975)研究表明,墨吉对虾(*Penaeus merguensis*)成体主要靠化学感觉来发现食物和识别食物,视觉在食物的察觉和定位中的重要性是次要的;刺龙虾(*Panulirus interruptus*)发现远方的食物是通过嗅觉器官完成的,包括辨别食物发出的特殊气味、定位食物来源方向、主动朝向食物方向的基本过程(Derby et al, 2001)。本次研究从摄食行为生态学的角度评估了克氏原螯虾对配合饲料的感知能力,研究结果表明克氏原螯虾对配合饲料产生感应的最大间隔距离为 12 m。在食物间隔距离 12 m 以内,试验组在投饲点(食物源)捕获虾的数量是对照组(非投饲点)的 2.5 倍以上,两者之间存在极显著的差异,表明克氏原螯虾通过自身化学感觉能对一定距离的配合饲料产生化学感应,表现出强烈的食物发现和定向搜索能力。当食物间隔距离为 15 m 和 18 m 时,

试验组在投饲点捕获虾的数量与对照组的差异非常小,每次试验尽管前者始终高于后者,但无明显差异,表明克氏原螯虾对超过 12 m 以外的配合饲料可能没有感知能力,因而未能产生定向搜索食物的行为。

3.2 克氏原螯虾对食物的感知速度

在本研究中,采用了食物感知-搜索的最短时间和最长时间来反映克氏原螯虾对配合饲料的感知速度。在食物间隔距离为 3 m 时,食物感知-搜索的最短时间为(1.8±0.5) min,最长时间为(3.4±0.9) h;当间隔距离增加到 12 m 时,食物感知-搜索的最短时间为(25.2±2.4) min,最长时间为(10.0±1.3) h,表明食物感知-搜索的时间与食物间隔距离密切相关。从本研究结果看(图 4),食物感知-搜索的最短时间与食物间隔距离的相关程度非常高,具有较好的敏感性;而食物感知-搜索的最长时间与食物间隔距离的相关程度较低。因此认为采用食物感知-搜索的最短时间作为评价参数较好,能够更好地反映克氏原螯虾的食物感知能力。

3.3 克氏原螯虾对食物感知的性别差异

在本研究中,在食物间隔距离 3、6、12 m 捕获的雄虾与雌虾数量均无显著差异(χ^2 检验, $P>0.270$),符合 1:1 的理论假设,而在食物间隔距离 9 m 捕获的雌虾显著多于雄虾(χ^2 检验, $P<0.01$)。从理论上讲,在食物感应的空间范围内,食物间隔距离越近,克氏原螯虾对食物刺激的化学感应就会越强烈。因此,从食物间隔距离 3 m 和 6 m 的试验结果看(图 3),克氏原螯虾的雌性与雄性对配合饲料的感知能力可能没有显著差异。

3.4 化学刺激提高克氏原螯虾的摄食感知力

许多研究涉及虾蟹化学感应和觅食行为的关系,一般认为引起觅食行为的化学刺激主要是由低分子质量的物质引起,如氨基酸、有机酸、核苷酸和糖,诱食剂能提高虾蟹对饲料的感知能力,这种能力

的提高往往与诱食剂的类型和剂量及饲料本身营养有关(Zimmer-Faust, 1989)。目前,生产中的饲料成分中大多添加了诱食剂等化学刺激物,克氏原螯虾对远方饲料的感知应是来自配合饲料释放的化学刺激物,这种刺激物可能不是单一的化合物,而是一种复杂的混合物。本文涉及的克氏原螯虾对食物感知能力的研究内容还没有考虑食物类型、饲料营养成分、诱食剂以及一些环境条件(如光照、水流)的影响,今后有必要开展更深入的相关研究。

参考文献

- 冯玉铭,2021. 克氏原螯虾摄食行为生态的初步研究[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所.
- 孟庆武,2006. 不同养殖模式中对虾摄食行为及消化酶活力的研究[D]. 青岛:中国海洋大学.
- 苗玉涛,张亦陈,王安利,等,2002. 水产动物摄食化学感觉研究进展[J]. 海洋科学, (6):20-23.
- 王华,李勇,陈康,等,2008. 水产养殖动物摄食节律与投喂模式的研究进展[J]. 饲料工业, 29 (24):17-21.
- Chivers D P, Brown G E, Smith R J F, 1996. The evolution of chemical alarm signals: attracting predators benefits alarm signal senders[J]. *American Naturalist*, 72(3):649-659.
- Derby C D, 2000. Learning from spiny lobsters about chemosensory coding of mixtures[J]. *Physiology Behaviour*, 69: 203-209.
- Derby C D, Steullet P, Horner A J, et al, 2001. The sensory basis to feeding behavior in the Caribbean spiny lobster *Panulirus argus*[J]. *Marine and Freshwater Research*, 52:339-1350.
- Hindley J P R, 1975. The detection, location and recognition of food by juvenile banana prawns, *Penaeus merguensis* de Man[J]. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 3:193-210.
- Jin S Y, Jacquin L, Ren Y, et al, 2019. Growth performance and muscle composition response to reduced feeding levels in juvenile red swamp crayfish *Procambarus clarkii* (Girard, 1852)[J]. *Aquaculture Research*, 50(3):934-943.
- Luo S, Li X, Onchari M M, et al, 2021. High feeding level alters physiological status but does not improve feed conversion efficiency and growth performance of juvenile red swamp crayfish *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) [J]. *Aquaculture*, 537:736507.
- Rittschof D, Buswell C U, 1989. Stimulation of feeding behavior in three species of fiddler crabs by hexose sugars[J]. *Chemical Senses*, 14(1):121-130.
- Weissburg M J, Zimmer-Faust R K, 1991. Ontogeny versus phylogeny in determining patterns of chemoreception: initial studies with fiddler crabs[J]. *The Biological bulletin*, 181(2):205-215.
- Zimmer-Faust R K, 1989. The relationship between chemoreception and foraging behavior in crustacea[J]. *Limnology & Oceanography*, 34:1367-1374.
- Zimmer-Faust R K, Butman C A, 2000. Chemical signaling processes in the marine environment[J]. *The Biological Bulletin*, 198(2):168-187.
- Zimmer-Faust R K, Case J F, 1982. Odors influencing foraging behavior of the California spiny lobster, *Panulirus interruptus*, and other decapod crustacea[J]. *Marine and freshwater Behaviour and Physiology*, (9):35-58.
- Zimmer-Faust R K, Tyre J E, Michel W C, et al, 1984. Chemical mediation of appetitive feeding in a marine decapod crustacean: the importance of suppression and synergism [J]. *Biological Bulletin*, 167:339-353.

(责任编辑 万月华)

Ability of Red Swamp Crayfish (*Procambarus clarkii*) to Perceive Formulated Feed

FENG Yu-ming^{1,2,3}, WANG Jian-zhi^{1,2}, WU Li⁴, GONG Kun^{1,2}, LI Wei^{1,2,3}, YUAN Jing^{1,2}, ZHANG Tang-lin^{1,2,3}

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China;

2. Research Center for Integrated Rice Field Aquaculture Engineering of Hubei Province,
Wuhan 430072, P. R. China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China;

4. Hefei Normal University, Hefei 230601, P. R. China)

Abstract: So far, no research has been reported on the distance over which red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) can perceive food, important for scientific feeding and improving the efficiency of food utilization. In this study, the ability to perceive formulated feed by red swamp crayfish was investigated using a test facility designed to simulate the paddy field aquaculture environment. The aim was to provide a scientific basis for determining the number and spatial arrangement of feeding points and increase the efficiency of feed utilization in crayfish culture. From August to October 2020, the test was carried out at a red swamp crayfish aquaculture center in Daye City, Hubei Province. Red swamp crayfish with body length (10.5 ± 2.78) cm and body weight (52.2 ± 3.12) g were selected and acclimated a week before testing at a water temperature of 25–30°C, pH 8.1–8.5 and dissolved oxygen 5.2–7.5 mg/L. Two paddy fields of 20 m×1 m were set as the food perceiving area and the control area (no formulated feeds), with 6 feeding points at distances of 3, 6, 9, 12, 15 and 18 m from the test crayfish release area, and each trial began with 60 crayfish. The number of crayfish arriving at the feeding points was counted at 3, 6, 9 and 12 h for each trial to determine the maximum spacing, and the shortest and longest times to perceive food. The number of crayfish at feeding points at distances of 3, 6, 9 and 12 m were, respectively, (50.5 ± 3.5), (47.3 ± 2.1), (43.2 ± 2.3) and (37.1 ± 1.7) individuals and were 10.5, 5.0, 3.5 and 2.5 times the number in the control group. At distances of 15 m and 18 m, the differences in crayfish numbers between control and treatment groups were not significant. Thus, the maximum distance that red swamp crayfish can perceive food is estimated to be 12 m. No significant difference was found in the number females and males captured at a food spacing distance of 3 m or 6 m ($\chi^2 > 1.19$, $df=1$, $P > 0.270$), suggesting that there is not a significant difference in food perception between females and males. The time for perceiving and foraging food was positively related to food distance. At distances of 3 m, 6 m, 9 m and 12 m, the shortest times for perceiving and foraging food were, respectively, (1.8 ± 0.5) min, (5.0 ± 1.1) min, (11.4 ± 1.7) min and (25.2 ± 2.4) min, and the longest times were (3.4 ± 0.9) h, (7.3 ± 0.6) h, (9.0 ± 0.8) h and (10.0 ± 1.3) h. At 3 m and 12 m, the percentages of crayfish reaching the food source within 3 h were (68.3 ± 1.6)% and (36.3 ± 1.9)%. Our results indicate that *P. clarkii* can perceive food within 12 m, and the shorter the distance to food, the shorter the time for perceiving and foraging the food.

Key words: *Procambarus clarkii*; perceiving food ability; foraging behavior; food spacing distance