

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2024.05.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



刘慧仪,田昌凤,刘晃,等.基于被动声学的对虾摄食行为研究进展[J].渔业现代化,2024,51(5):1-8.

基于被动声学的对虾摄食行为研究进展

刘慧仪^{1,2},田昌凤¹,刘晃¹,车轩¹,王晓萌^{1,2}

(1 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所,上海 200092;

2 上海海洋大学水产与生命学院,上海 201306)

摘要:被动声学监测(Passive acoustic monitoring,PAM)技术可在对水生生物不造成干扰或损害的情况下获取水生生物的声音信息,并利用这些信息进行各种生态研究和养殖活动管理。随着对虾养殖技术的不断提高和进步,对虾的养殖密度持续增加,但是饲料利用率低、水质恶化等问题严重制约对虾养殖的快速发展。利用被动声学监测技术可实现智能化的自动投饲,提高饲料利用率和缓解水质恶化。文章主要阐述了对虾的摄食过程及其影响因素,总结了近年来被动声学监测技术在对虾摄食声信号的研究进展和应用情况,分析了被动声学监测技术的优缺点,并针对存在的问题提出未来的发展趋势,以期自动投饲系统走向智能化提供参考。

关键词:被动声学监测技术;对虾;摄食;发声信号

中图分类号:S 966.12;S 968.22

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2024)05-0001-008

被动声学监测(Passive acoustic monitoring,PAM)技术通过在所在的环境中安装声音传感器(水听器),收集环境中动物的声音信号并进行记录。该技术主要研究环境中声音相互作用,广泛应用于海洋哺乳动物的远程观测^[1-3]。PAM 技术通过利用水下目标的辐射噪声,然后对目标进行探测、识别、定位以及跟踪,采集的信号主要包含了探测目标的特征,这些特征表达目标的运动等行为。近几年在虾塘中使用 PAM 技术来控制饲料的投喂,可以检测对虾在摄食饲料时产生的声音信号特征。因对虾对饲料的摄取速度很慢,主要是通过观察饲料托盘上的残饲量来估算对虾的摄食情况,而虾塘水体环境浑浊复杂以及对虾的底栖性质,养殖人员很难通过直接观察或者观看录像去准确判断对虾的摄食情况以及生长时的状态,经常出现过度喂食或投饲不足的现象。目前有各种技术用于监测水生动物的活动,但这些技术在现场观察对虾的摄食行为可能会面临相当大的挑战。PAM 技术可以利用水听器在复杂的虾

塘环境中获取对虾摄食饲料中的声音信号,再通过特定的算法计算出对虾的饲料需求量,从而提高饲料的利用率^[4-7]。PAM 技术目前已经作为研究甲壳动物行为的主要技术之一,研究人员会使用 PAM 技术对不同类型甲壳动物发出的声音进行研究并分辨该声音的特征^[8-10]。

对虾养殖业是一个快速增长的行业,对虾肉质鲜美、营养丰富,成为重要的水产养殖品种之一,为水产品市场提供了大量优质蛋白。2022 年对虾养殖产量为 574.23 万 t^[11],是一种具有较高经济价值的养殖种类。对虾在养殖中进行投喂管理是一个复杂的工序,科学投放饲料会受到很多因素的影响,如水质环境、对虾的活动范围、天气等^[12-13]。投饲不当会导致出现饲料利用率低下、水质恶化等问题。PAM 技术可以应用于广泛饲养环境条件来评估对虾的摄食行为,有学者使用 PAM 技术来了解对虾摄食行为,帮助养殖户们解决饲料利用率低、水质恶化等问题,实现更好的饲料利用率和可持续性的发展^[13]。

收稿日期:2024-03-20

基金项目:中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2024GH03)

作者简介:刘慧仪(1998—),女,硕士研究生,研究方向:鱼类行为研究。E-mail:1131928223@qq.com

通信作者:田昌凤(1985—),女,副研究员,研究方向:渔业装备与工程。E-mail:tianchangfeng@fmiri.ac.cn

本研究梳理了对虾摄食的过程及影响对虾摄食行为的因素,详细阐述了 PAM 技术在监测对虾摄食发声信号的研究进展及应用情况,总结了该技术发展面临的挑战,同时提出了未来的发展趋势,以期为 PAM 技术在对虾养殖中的应用和推广提供参考。

1 对虾摄食及影响因素

1.1 摄食过程

对虾是底栖杂食性动物,对虾的摄食行为是通过食欲、激发、寻找、吞咽、饱食以及饥饿一系列的连锁反应完成的^[14-16]。对虾消化系统的储存能力非常有限,需要不断摄食少量的饲料。对虾的摄食行为受到嗅觉和味觉的影响,嗅觉感受器是第一触角,味觉感受器是口器处的附肢和步足。对虾主要是依靠化学信息来定位虾塘底部的食物,在寻找食物时,会使用前 3 对的步足去搜索食物,发现食物之后,立即使用步足将食物抱住,然后送至口器中。对虾可以直接吞食小颗粒的食物,通过第 3 颚足抱持大颗粒的食物,然后进行撕扯和切割后进行摄入^[15]。

1.2 影响摄食的因素

(1) 饲料。饲料的种类和品质会影响对虾的摄食、生长及饲料系数^[17-18]。不恰当地采用植物蛋白替代动物蛋白,氨基酸的组成结构不合理,钙质含量不高以及微量元素未添加的饲料都会导致对虾吸收的营养不够全面,可能会出现厌食的现象^[19-20]。还有在养殖过程中突然变更饲料的品种或者颗粒大小,对虾在味觉上会产生短暂的不适应和拒绝摄食的现象。

(2) 水质环境。虾塘底质恶化会影响对虾的摄食、生长以及饲料系数。氨氮、亚硝酸盐、pH、重金属以及硫化氢等指标都会影响到对虾的摄食^[21]。当溶氧不足,或者氨氮、亚硝酸盐以及硫化氢等有毒有害物质严重超标时,均会使对虾产生应激反应,引起对虾摄食量下降。水体环境温度的变化也直接影响对虾的摄食情况。温度、气压、晴雨天以及风向的变化都会导致对虾产生应激反应,从而影响摄食^[22]。

(3) 其他因素。高密度养殖会增加对虾生存空间和生物饲料的竞争,引起水质恶化和应激等现象出现,从而导致对虾的摄食行为减少、饲料利

用率降低等^[23]。除此之外,在虾苗投放时,虾苗在虾塘分布中会比较均匀,随着对虾不断增长以及污染物不断积累,会导致虾塘中央的对虾较少,分布到四周的对虾较多,在应激状态、患病等情况下,对虾摄食也会减少^[24]。

2 对虾摄食声特征

2.1 摄食声特点

水生动物发出声音是水生物行为或者活动的一种信息反馈和表现。很多的甲壳动物可以通过利用不同的机理发出与特定情况相应的声音^[25-28]。Lillis 等^[29]研究发现当领地受到入侵时甲壳类动物通过快速闭合特殊的爪子发出声音。Hamilton 等^[30]在同样类似的环境中发现龙虾通过位于触角基部的搅动系统发出啞啞声。甲壳动物不仅在领地行为、性行为和社会行为中发出声音,在其他的活动中也会发出声音^[31-33]。与对虾行为相关的 PAM 技术检测报告显示,最初是在墨西哥湾捕鱼区的白滨对虾(*Litopenaeus setiferus*)种群产生的声音,被描述为“煎炸”声^[34]。斑节对虾(*Penaeus monodon*)^[4]和凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[35]的视频与水听器同步记录并分析证实,当下颚相互碰撞和刮擦时会发出“咔咔”声,主要是与下颚的钙化作用密切相关,可更加有效地撕碎食物。

(1) 声音频率。Hunt 等^[36]发现,凡纳滨对虾生长过程中产生的脉冲信号频率主要是在 2~8 kHz,该频率与进食存在一定的相关性,其发声波形是存在一定规律的。张丽珍等^[27]研究了凡纳滨对虾进食前后发声信号特点以及规律,发现进食前后的发声信号有着明显的区别,投饲后摄食频率范围约在(5~15) kHz 之间。

(2) 持续时间。对虾摄食的声音会呈现出短促的脉冲特征,不同体长的凡纳滨对虾摄食颗粒饲料时,单个声音脉冲持续时间各有不同,反映了虾类摄食行为的随机性。Peixoto 等^[37]研究发现,两次试验声音持续时间结果一致,均为 2.7 ms 左右;但 Silva 等^[35]研究发现不同规格的凡纳滨对虾在人工饲养过程中的声音持续时间为 4.7 ms 左右。两者间存在明显的差异性,可能对虾的试验环境、饲料类型和对虾的规格等因素而造成。

2.2 影响因素

2.2.1 饲料特性的影响

不同质地和规格的饲料会导致对虾摄食时产生的声音强度有一定差异性,随着饲料的硬度增大,对虾通过增加咬合的次数来分解饲料,摄食产生的声音强度也随之增加。不同质地和规格的饲料会影响下颚在切割饲料颗粒时施加的咬合力,从而影响进食过程中产生的声学信号特征^[38]。饲料的硬度和水分会影响摄食声信号特征,与膨化饲料相比,颗粒饲料的稳定性和物理耐久性较低。Soares 等^[38]研究发现不同体长凡纳滨对虾摄食颗粒饲料和膨化饲料时,体长较大的凡纳滨对虾在摄食频率和摄食声音强度上均高于体长较小的凡纳滨对虾。Peixoto 等^[39]也对凡纳滨对虾摄食颗粒饲料和膨化饲料进行研究,结果显示摄食膨化饲料的声音强度高于颗粒饲料,然而在峰值频率上,摄食颗粒饲料高于膨化饲料。Peixoto 等^[37]发现,颗粒饲料的长度与对虾的摄食次数有关,影响到单颗饲料的发声次数,而且饲料消耗和每个粒径的颗粒饲料所产生的声能间有着显著的相关性。然而,国外在养殖凡纳滨对虾中使用的颗粒饲料不完全适用于中国情况。曹正良等^[40]研究发现,凡纳滨对虾摄食沙蚕与不同粒径颗粒饲料时,声学信号特征有明显差异,在摄食不同粒径的颗粒饲料时产生的频率是相似的。王秀秀^[41]研究发现凡纳滨对虾摄食4种不同质地的饲料(颗粒饲料、沙蚕、鱿鱼以及虾壳)时,发声信号特征不同,频率范围相近,但峰值频率与主峰频率存在着明显的差异。

目前国内外的研究人员利用 PAM 技术对对虾摄食不同性质的饲料进行研究,确定了对虾摄食不同性质的饲料时发声信号的特征具有差异性,并有效评估了对虾的摄食行为及其摄食频率。这些研究有助于为对虾养殖投喂饲料提供参考依据,可使用 PAM 技术来预测饲料的消耗量,从而提高饲料利用率,这也为 PAM 技术在对虾摄食行为的研究奠定了基础。从国内外研究情况来看,大多数集中在不同粒径的颗粒饲料,在实际养殖中不同生长阶段的凡纳滨对虾摄食的颗粒饲料会有所不同,因此,未来的研究应聚焦于深入探索对虾在摄取不同类型饲料时的差异是如何反映在声音信号特征的变化上的。

2.2.2 养殖密度的影响

养殖密度是影响摄食活动声学参数的重要因素之一,高密度的放养会导致对虾在摄食时相互干扰,摄食声音会变得杂乱。Reis 等^[34]研究表明,在不同的养殖环境、饲养条件以及放养密度不同的情况下都可以采集到对虾的摄食发声信号。Costa 等^[42]研究发现,处于不同放养密度的凡纳滨对虾的行为会表现出明显的差异性,随着放养密度的逐渐增加,池塘中的凡纳滨对虾的生长环境随之发生变化,导致生长和存活率下降,这些都与生存空间和竞争有一定的关联性。Bardera 等^[43]研究并分析在不同密度下凡纳滨对虾的摄食行为,发现凡纳滨对虾在高密度的情况下摄食得更多,并且高密度养殖中的优势和劣势个体的摄食行为表现出明显的差异性。Hamilton 等^[44]研究不同规格以及放养密度的凡纳滨对虾在摄食声学的信号特征分析得到,随着对虾规格和放养密度的增加,对虾在摄食活动中发声的次数显现显著渐进增加。

对虾在摄食时的发声次数随着放养密度的增加而显著增加,且这种增加趋势在最低密度到最高密度之间表现出明显的渐进性。目前对于对虾摄食发声研究均在实验室中进行的,而在不同虾塘中放养密度会有所不同。因此,在未来的研究中可以进一步确定不同放养密度的对虾在摄食时的声音能量和摄食量的变化情况,以及对不同养殖环境的放养密度的摄食发声进行研究。另外, PAM 技术还没有被广泛地应用于研究放养密度对对虾摄食行为的影响,通过使用 PAM 技术可以更好地了解在不同的放养密度下的对虾摄食声音,从而有助于估计在浑浊的虾塘中对虾的种群密度。

2.2.3 对虾规格的影响

不同体长的对虾大颚咀嚼的咬合力会有所不同,大颚会随着对虾的生长不断地发育成熟,从而使得对虾在摄食饲料时声音信号存在显著差异。Hamilton 等^[44]研究不同规格以及放养密度的凡纳滨对虾在摄食声学的信号特征,摄食时凡纳滨对虾的摄食次数会随着对虾的规格的增大而增加,且规格较大的,总体的“咔哒”声也有所增加。还有其他研究表明,对虾的规格大小对摄食活动的声学参数产生一定的影响,例如:在摄食发声

中,虾苗(0.04 g)与幼虾或者成虾(1~12 g)对比发现,虾苗显示出更高的频率峰值和频带更低的能量^[45]。Silva 等^[35]通过对 3 种不同体长的凡纳滨对虾进行研究发现,不同体长的凡纳滨对虾在声学的信号特征上没有明显的差异性,但在摄食行为上,体长较大的凡纳滨对虾的摄食速度会比体长较小的摄食速度要快得多,且摄食的次数稳定。曹正良等^[46]研究发现不同体长(2~3、4~5、6~7、8~9、9~10 cm)凡纳滨对虾摄食颗粒饲料和虾壳的发声信号特征有着明显的差异性,较大体长的对虾摄食频率和摄食强度均高于较小体长的对虾,主要表现为声学信号的频率和强度更高。

在不同体长的对虾摄食颗粒饲料时,峰值频率随着体长的增加而降低。规格较小的对虾发声信号频率高而振幅小,规格较大的对虾信号频率低而振幅大。研究人员可根据对虾摄食的发声信号来判断对虾的规格。然而,目前对于不同规格的对虾在摄食声学方面的研究不足以概括出对虾整个生长阶段。因此,在未来的研究中,声音信号与对虾大小之间的关系仍然有待验证,需进行对照试验,才能更好地表达从幼虾到成虾阶段的摄食发声次数和摄食行为的声学特征。另外,还应关注对虾在应激和蜕壳情况下的声音信号特征。及时调整饲料投喂策略以适应不同生长阶段的对虾,实现实时评估对虾的健康状况,及时发现问题解决问题。

3 PAM 技术应用情况

PAM 技术在自动投喂系统中的应用主要体现在监测和分析水生生物的声音,了解水生生物的摄食行为,并根据所提供数据调整投喂时间和投喂量。澳大利亚的被动声学投喂系统(AQ1 Systems)是近期开发并应用在对虾养殖中的基于声学传感器的饲料控制系统,该系统是使用 PAM 技术进行控制投喂次数和投喂量^[34]。Bador 等^[47]使用声学控制系统在不同池塘以及不同对虾物种进行了试验,通过实时监测对虾摄食行为来动态调整投喂策略,与传统的定时投喂方法进行对比,使用声学控制系统的池塘表现出更高的饲料转化率,显著提高了对虾的生长率,所有物种的平均产量提高了 25%~30%。Napaumpaipom

等^[48]研究比较了 3 种不同的饲养管理技术(人工投喂、自动定时投喂器和 AQ1 系统)在凡纳滨对虾集约化养殖中的应用效果,使用 AQ1 系统的饲料转化率降低,对虾的存活率和产量更高,水质也得到了改善。除了投喂方法,自动投喂系统还可以增加每日投喂频率和每日饲料的输入量。Ullman 等^[49-50]对比不同的投喂策略在凡纳滨对虾池塘养殖中的应用效果,结果显示,使用 AQ1 系统可以优化投喂策略,在更短的培养周期内实现高的经济效益,与其他投喂策略相比,在养殖中使用 AQ1 系统的投喂量可达 $160 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,投喂量再次显著增加。AQ1 系统比其他投喂技术更具有明显的优势,生长情况、饲料转化率、产量以及经济效益均优于人工投喂。Reis 等^[51]通过改进自动定时投喂器和 AQ1 系统来提高对虾的生长性能和产量,设置 4 种投喂策略,3 种固定投喂处理使用自动定时投喂器,一种按需处理使用 AQ1 系统,使用 AQ1 系统可以显著提高对虾的生长性能和产量,在饲料管理中使用 AQ1 系统是实现精准投喂、提高养殖效率的重要途径;同时,该研究也为未来饲料自动化技术的改进和发展提供了有价值的参考。

声学投喂系统研究虽然已经取得了一定的成果,但还存在一些局限性。AQ1 系统会受到外部噪声的影响,增加了声学信号的提取和分析的难度。该系统成本较高,设备的安装和维护较为复杂,增加了长期维护的成本。除此之外,不同水产生物的声学信号差异显著,会导致该系统难以精准地监测对虾的摄食行为。随着 PAM 技术的不断发展和完善,使用该技术的研究可能会进一步深入对虾养殖中,从而进一步提高对虾的生长和饲养系统效率,相信该技术将在未来的对虾养殖研究中发挥更加重要的作用。

4 讨论和展望

4.1 PAM 技术优势与局限性分析

PAM 技术在对虾养殖中具有明显的优势^[34]。该技术能够实时精准地监测对虾的摄食行为,提供实时数据,能够准确地掌握对虾摄食需求,根据对虾的实际需求进行精准投喂,可以防止过度投喂或投喂不足。这种精准投喂方式可以显著提高饲料的利用率,降低饲料浪费,从而降低养

殖成本。另外,PAM 技术监测到的对虾摄食行为数据可以指导养殖户调整饲料配方和投喂策略,从而优化对虾的生长环境,降低水质污染。除此之外,通过结合 PAM 技术的自动投饲系统可以实现对虾养殖的全方位监测和管理,提高养殖中的自动化和智能化水平,促进可持续发展^[45]。

PAM 技术实现难度高,设备成本高,引入该技术需要养殖场的管理人员具备一定的声学知识和操作技能。对于许多小型养殖场来说引入该技术面临着一定的门槛。另外,养殖环境复杂,存在各种自然和人为的噪声,会干扰对虾摄食以及行为监测。水质变化也可能影响对虾声音的传播和采集^[34]。还有处于不同生长阶段的对虾在摄食行为上可能存在差异。因此 PAM 技术的识别能力还不能满足在不同情况下的监测需求。截至目前,PAM 技术在试验环境下取得了显著成果,但在实际养殖中的应用和推广仍然面临诸多挑战,许多养殖户对 PAM 技术的认知度不够,持怀疑态度。在实际应用中,需要充分发挥 PAM 技术的优势并克服其局限,不断去推广和普及。

4.2 PAM 技术发展趋势

PAM 技术在对虾的研究应用中不断发展,该技术的应用大大提高了饲料的管理和利用效率^[52]。在过去的 20 年里,水产养殖在智能投饲技术的研究取得了一定的成果,成为了研究的主要趋势之一^[51-53]。PAM 技术可监测对虾的摄食行为,可与自动投饲系统相结合,实现按需投喂,避免过度投喂,并提高饲料利用率。PAM 技术不仅可用于饲料管理,还能通过监测对虾的声学活动,以确定对虾的健康状况和行为异常。PAM 技术随着无线通信技术和人工智能的进步,正朝着智能化和高效化的方向发展^[34]。实时监测与预警系统的发展是该技术在对虾养殖中的应用中一个重要的趋势,实时传输和分析声学数据,能够进一步精准地掌握对虾的养殖状况。PAM 技术与人工智能相结合,研究人员可以开发更精准模型来进行信号处理与分析,可更高效地提取有效信息。PAM 技术的相关设备将逐渐实现小型化和便携化,这将使得 PAM 技术更加易于在养殖环境中进行部署和使用,降低养殖成本。数据共享与开放平台是推动 PAM 技术发展的重要方向,建立开放性的数据平台,研究人员可以更方便地访

问和利用全球范围内的声学数据资源。这些趋势不仅推动了 PAM 技术在对虾研究中的应用,还为对虾养殖提供了重要的技术支持。随着技术的进一步发展和完善,PAM 技术将推动对虾养殖行业的科技进步和可持续发展^[45]。

4.3 展望

PAM 技术在对虾养殖中发展中发挥重要作用。目前国内关于对虾摄食声学研究处于起步阶段,需要进一步了解和认识对虾的摄食行为及其他行为的声音信息。将 PAM 技术作为监测对虾摄食活动的替代方法,从而实现实时按需投喂,自动投饲系统由机械化转变为智能化。但这项技术在实际生产的应用上还存在着一些挑战,需要进一步地深入研究。如在对虾摄食不同类型的饲料是否会存在差异性,不同放养密度的对虾在摄食时的声音强度和摄食量的变化情况,以及不同养殖环境的放养密度的摄食发声机理等。针对不同生长阶段的对虾摄食声音信号的特征进行研究,在水产养殖中应用摄食声音来实现自动投喂,减少过度投喂对环境的影响,从而促进对虾养殖业可持续发展。□

参考文献

- [1] 覃远玉,赵龙辉,汪继超.被动声学监测技术在国家公园生物多样性保护中的作用及发展趋势[J].国家公园(中英文),2023,1(4):264-271.
- [2] JÉRÔME S,SANDRINE P,OLIVIER H,et al. Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal[J]. PLoS ONE,2008,3(12):e4065.
- [3] AU W W L,HASTINGS M C. Principles of Marine Bioacoustics [M]. New York:Springer,2008.
- [4] SMITH D V,TABRETT S. The use of passive acoustics to measure feed consumption by *Penaeus monodon* (giant tiger prawn) in cultured systems [J]. Aquacultural Engineering, 2013,57:38-47.
- [5] TABBARA M,STREBEL L,PEIXOTO S,et al. Use of passive acoustic monitoring to evaluate the effects of a feed effector on feeding behavior, growth performance, and salinity stress tolerance of *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquaculture, 2024, 582:740499.
- [6] 唐荣,陈军,刘世晶,等.基于声学方法的水产养殖投饲反馈技术研究进展[J].渔业现代化,2019,46(3):15-21.
- [7] SMITH D V,SHAHRIAR M S. A context aware sound classifier applied to prawn feed monitoring and energy disaggregation[J]. Knowledge-Based Systems,2013,52:21-31.
- [8] FILICIOTTO F,VAZZANA M,CELI M,et al. Underwater noise from boats: Measurement of its influence on the behaviour and

- biochemistry of the common prawn (*Palaemon serratus*, Pennant 1777) [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2016, 478: 24–33.
- [9] PATEK S N, CALDWELL R L. The stomatopod rumble: Low frequency sound production in *Hemisquilla californiensis* [J]. Marine Behaviour and Physiology, 2006, 39(2): 99–111.
- [10] RADFORD C, SLATER M. Soundscapes in aquaculture systems [J]. Aquaculture Environment Interactions, 2019, 11: 53–62.
- [11] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2023 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2023: 21–36.
- [12] ARANEDA M, PÉREZ P E, GASCA LEYVA E. White shrimp *Penaeus vannamei* culture in freshwater at three densities: Condition state based on length and weight [J]. Aquaculture, 2008, 283(1/4): 13–18.
- [13] CASILLAS HERNÁNDEZ R, MAGALLÓN BARAJAS F, PORTILLO CLARCK G, et al. Nutrient mass balances in semi-intensive shrimp ponds from Sonora, Mexico using two feeding strategies: Trays and mechanical dispersal [J]. Aquaculture, 2006, 258(1/4): 289–298.
- [14] 张沛东. 对虾行为生理生态学的实验研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [15] 刘腾. 虾蟹类摄食行为的研究 [J]. 农村经济与科技, 2021, 32(4): 26–27.
- [16] 林继辉, 李松青, 林小涛, 等. 凡纳滨对虾摄食与生长的实验研究 [J]. 海洋科学, 2004(8): 43–46.
- [17] 王志武. 养殖南美白对虾如何进行科学投料 [J]. 中国水产, 2006(8): 62–63.
- [18] 肖善势, 何琳, 徐永健, 等. 不同饵料种类、投喂方式及环境条件对凡纳滨对虾相对摄食量的影响 [J]. 海洋科学, 2016, 40(5): 36–42.
- [19] MOSS D R, MOSS S M. Effects of gender and size on feed acquisition in the pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2006, 37(2): 161–167.
- [20] SMITH D M, BURFORD M A, TABRETT S J, et al. The effect of feeding frequency on water quality and growth of the black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) [J]. Aquaculture, 2002, 207(1): 125–136.
- [21] 孙长涛. 南美白对虾池塘健康养殖技术 [J]. 渔业致富指南, 2020(24): 55–58.
- [22] BETT C, VINATEA L. Combined effect of body weight, temperature and salinity on shrimp *Litopenaeus vannamei* oxygen consumption rate [J]. Brazilian Journal of Oceanography, 2009, 57(4): 305–314.
- [23] 陈晓琰, 宁丽军, 黄文, 等. 不同养殖密度对南美白对虾摄食、消化酶活和饲料营养物质利用效率的影响 [J]. 广东饲料, 2023, 32(9): 19–23.
- [24] 严天鹏. 南美白对虾发生应激反应的原因及处理方法 [J]. 科学养鱼, 2009(4): 38.
- [25] RADFORD C A, JEFFS A G, TINDLE C T, et al. Temporal patterns in ambient noise of biological origin from a shallow water temperate reef [J]. Oecologia, 2008, 156(4): 921–929.
- [26] LILLIS A, EGGLESTON D B, BOHNENSTIEHL D R. Estuarine soundscapes: distinct acoustic characteristics of oyster reefs compared to soft-bottom habitats [J]. Marine Ecology Progress Series, 2014, 505: 1–17.
- [27] 张丽珍, 陆天辰, 杨加庆, 等. 南美白对虾进食前后发声信号特点分析 [J]. 声学技术, 2020, 39(4): 413–418.
- [28] 李钊丞, 项盛羽, 沈梦庭, 等. 南美白对虾快速游动发声特征及其信息利用研究 [J]. 水生生物学报, 2023, 47(6): 997–1006.
- [29] LILLIS A, PERELMAN J N, PANYI A. Sound production patterns of big-clawed snapping shrimp (*Alpheus* spp.) are influenced by time-of-day and social context [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(5): 3311.
- [30] HAMILTON S, SILVA J F, PEREIRA-NEVE A, et al. Sound production mechanism in the Brazilian spiny lobsters (Family Palinuridae) [J]. Zoomorphology, 2019, 138(4): 475–482.
- [31] BOHNENSTIEHL D R, LILLIS A, EGGLESTON D B. The curious acoustic behavior of estuarine snapping shrimp: temporal patterns of snapping shrimp sound in sub-tidal oyster reef habitat [J]. PLoS ONE, 2016, 11(1): e0143691.
- [32] POPPER A N, SALMON M, HORCH K W. Acoustic detection and communication by decapod crustaceans [J]. Journal of comparative physiology A, Sensory, neural, and behavioral physiology, 2001, 187(2): 83–89.
- [33] 张东. 水生动物行为研究及其在水产养殖中的应用简述 [J]. 水产学报, 2013, 37(10): 1591–1600.
- [34] REIS J, PEIXOTO S, SOARES R, et al. Passive acoustic monitoring as a tool to assess feed response and growth of shrimp in ponds and research systems [J]. Aquaculture, 2022, 546: 737326.
- [35] SILVA J F, HAMILTON S, ROCHA J V, et al. Acoustic characterization of feeding activity of *Litopenaeus vannamei* in captivity [J]. Aquaculture, 2019, 501: 76–81.
- [36] HUNT M J, WINSOR H, ALEXANDER C G. Feeding by penaeid prawns: the role of the anterior mouthparts [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1992, 160(1): 33–46.
- [37] PEIXOTO S, SOARES R, ALLEN DAVIS D. An acoustic based approach to evaluate the effect of different diet lengths on feeding behavior of *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquacultural Engineering, 2020, 91: 102114.
- [38] SOARES R, PEIXOTO S, GALKANDA-ARACHCHIGE H S C, et al. Growth performance and acoustic feeding behavior of two size classes of *Litopenaeus vannamei* fed pelleted and extruded diets [J]. Aquaculture International, 2021, 29(1): 1–17.
- [39] PEIXOTO S, SOARES R, SILVA J F, et al. Acoustic activity of *Litopenaeus vannamei* fed pelleted and extruded diets [J].

- Aquaculture, 2020, 525.
- [40] 曹正良, 沈梦庭, 李钊丞, 等. 摄食不同粒径颗粒饲料的凡纳滨对虾发声信号特征[J]. 南方水产科学, 2022, 18(6): 26–34.
- [41] 王秀秀. 南美白对虾摄食发声信号的变化规律与特征研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- [42] COSTA F P, GOMES F B F S B, PEREIRA A N D D S, et al. Influence of stocking density on the behaviour of juvenile *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) [J]. Aquaculture Research, 2016, 47(3): 912–924.
- [43] BARDERA G, OWEN A G, FACANHA F N, et al. The influence of density and dominance on Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) feeding behaviour [J]. Aquaculture, 2021, 531: 735949.
- [44] HAMILTON S, COSTA F F, SILVA J F, et al. The loud crowd: Interactions between stocking density and acoustic feeding activity of different size classes of *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquaculture, 2023, 563: 738904.
- [45] JEANBENOÎT D D T, JONAS K, A. G. O M, et al. Monitoring methods of feeding behaviour to answer key questions in penaeid shrimp feeding [J]. Reviews in Aquaculture, 2021, 13(4): 1828–1843.
- [46] 曹正良, 王秀秀, 李钊丞, 等. 不同体长南美白对虾摄食发声信号的变化规律[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(4): 637–644.
- [47] BADOR R, BLYTH P, DODD R. Acoustic control improves feeding productivity at shrimp farms [J]. Global aquaculture advocate, 2013(12): 77–78.
- [48] NAPAUMPAIPOM T, CHUCHIRD N, TAPARHUDEE W. Study on the efficiency of three different feeding techniques in the culture of pacific white shrimp [J]. Fish Environ, 2013, 37(2): 8–16.
- [49] ULLMAN C, RHODES M A, DAVIS D A. Feed management and the use of automatic feeders in the pond production of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquaculture, 2019, 498: 44–49.
- [50] ULLMAN C, RHODES M, HANSON T, et al. Effects of Four Different Feeding Techniques on the Pond Culture of Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2019, 50(1): 54–64.
- [51] REIS J, NOVRIADI R, SWANEPOEL A, et al. Optimizing feed automation: improving timer-feeders and on demand systems in semi-intensive pond culture of shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquaculture, 2020, 519: 734759.
- [52] SAMUEL W, KHANH N, LEILA S, et al. Utilising feed effectors and automated feeders for semi-intensive pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production [J]. Aquaculture, Fish and Fisheries, 2022, 2(6): 540–551.
- [53] GIBB R, BROWNING E, GLOVER-KAPFER P, et al. Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2019, 10(2): 169–185.

Progress in the study of the feeding behaviour of the shrimp based on passive acoustics

LIU Huiyi^{1,2}, TIAN Changfeng¹, LIU Huang¹, CHE Xuan¹, WANG Xiaomeng^{1,2}

(1 *Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;*

2 *College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

Abstract: Passive acoustic monitoring (PAM) technology enables the acquisition of acoustic information from aquatic organisms without causing disturbance or harm, facilitating various ecological studies and aiding in the management of aquaculture activities. As shrimp aquaculture technology advances, the industry's scale and density are increasing. However, challenges such as low feed utilization and water quality deterioration have severely constrained the rapid development of the industry. PAM technology can be used to study sound in the environment by using it to understand shrimp feeding behaviour, guide feeding decisions, and implement intelligent automated feeding systems, thereby improving feed utilization and mitigating water quality deterioration problems. This article primarily discusses how shrimp feed, the factors affecting their feeding, and the acoustic characteristics of the feeding process, and reviews the latest research progress and application of PAM technology in detecting acoustic signals of shrimp feeding, as well as the challenges faced by the technology in its development. The advantages and limitations of PAM technology in shrimp aquaculture are analyzed, and the future development direction is proposed to address the problems of this technology. To provide a reference for the automatic feeding system to move towards intelligence, to promote the sustainable development of shrimp aquaculture.

Key words: passive acoustic monitoring; shrimp; feeding; vocal signals