

## 南美白对虾快速游动发声特征及其信息利用研究

李钊丞 项盛羽 沈梦庭 王秀秀 张日新 曹正良

### ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF FAST SWIMMING AND ITS INFORMATION UTILIZATION FOR *LITOPENAEUS VANNAMEI*

LI Zhao-Cheng, XIANG Sheng-Yu, SHEN Meng-Ting, WANG Xiu-Xiu, ZHANG Ri-Xin, CAO Zheng-Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0303>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 模拟阴天对南美白对虾养殖水体理化及其生长指标的影响

水生生物学报. 2017, 41(3): 523–529 <https://doi.org/10.7541/2017.67>

#### 不同家系凡纳滨对虾对低盐度的适应能力及其适应机理

MECHANISMS OF SALINITY ADAPTABILITY OF *LITOPENAEUS VANNAMEI* UNDER DIFFERENT SALINITY CONDITIONS

水生生物学报. 2021, 45(2): 275–283 <https://doi.org/10.7541/2021.2019.265>

#### 凡纳滨对虾血蓝蛋白酶解多肽的凝集与抑菌活性

AGGLUTINATIVE AND ANTIBACTERIAL ACTIVITY OF THE PEPTIDES HYDROLYZED FROM *LITOPENAEUS VANNAMEI* HEMOCYANIN WITH TRYPSIN

水生生物学报. 2017, 41(5): 1042–1047 <https://doi.org/10.7541/2017.130>

#### 凡纳滨对虾低温差异表达miRNA的分析鉴定及靶基因的验证

IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF DIFFERENTIALLY EXPRESSED MIRNA UNDER LOW TEMPERATURE AND VALIDATION OF TARGET GENES IN *LITOPENAEUS VANNAMEI*

水生生物学报. 2019, 43(6): 1203–1209 <https://doi.org/10.7541/2019.142>

#### 副溶血弧菌高效消毒剂的筛选及PHMG防治对虾AHPNS的应用研究

SCREEN OF DISINFECTANT AGAINST *VIBRIO PARAHAEEMOLYTICUS* AND THE APPLICABLE EVALUATION OF PHMG IN PREVENTING *LITOPENAEUS VANNAMEI* AHPNS

水生生物学报. 2020, 44(2): 252–260 <https://doi.org/10.7541/2020.030>

#### 凡纳滨对虾育苗水体中三种生物絮团的菌群多样性及Tax4Fun基因功能预测分析

IMPACTS OF *LITOPENAEUS VANNAMEI* ON MICROBIAL DIVERSITY OF THREE BIOFLOC AND PREDICTIVE ANALYSIS OF TAX4FUN GENE FUNCTION DURING HATCHERY PERIOD IN WATER

水生生物学报. 2019, 43(4): 786–796 <https://doi.org/10.7541/2019.093>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2023.2022.0303

## 南美白对虾快速游动发声特征及其信息利用研究

李钊丞 项盛羽 沈梦庭 王秀秀 张日新 曹正良

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要:** 为了掌握对虾游动发声规律及其信息的利用可能, 文章以南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*)为对象研究了不同游动行为的发声信号特征。首先, 在实验室黑暗条件下利用短时光源刺激南美白对虾, 采集两种规格(小: 4—6 cm; 大: 10—11 cm)对虾的快速游动发声信号, 并分析得出: 小规格对虾的主峰值频率约为250 Hz, 并有次主峰频率约425 Hz; 大规格对虾有约70 Hz主峰频率与约15 Hz的次主峰频率。其次, 确定了游动行为中甩尾弹射的发声信号及其特征, 其中心频率及频带范围均与快速游动发声信号的特征有明显差别。最后, 对比养殖现场环境的水下声音信息发现: 快速游动发声与背景噪声频域特征类似, 部分信号被覆盖; 对虾弹射发声信号可以清晰辨别, 虽与实验室相比该信号的能量集中频率、频率主峰及次主峰频率更低且频率范围要更小, 但其频谱及时频的信号特点与实验室信号有一定的关联性(持续时间均约为0.01s、能量的频率分布均集中于2—3 kHz)。因此, 对虾在游动中的弹射发声信号可作为养殖中监测对虾行为的生物声学信息, 有助于以声学信号监测对虾行为异常和判断生长状况的应用开发。

**关键词:** 快速游动; 发声信号; 信息利用; 南美白对虾

**中图分类号:** Q178.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3207(2023)06-0997-10



得益于技术进步、时间分辨率高、成本和投入相对较低、对环境和动物行为零影响等优点, 被动声监测正在成为研究生态系统的重要工具<sup>[1]</sup>。利用该技术对生态系统的动物活动进行研究时, 确定动物的行为与发声之间的关联是首要任务。国内学者在结合水生动物行为与声学信息的关联性研究方面已做了许多工作。例如, 王克雄等<sup>[2]</sup>曾根据鲸豚类系列研究提出: 基于被动声学的长江江豚种群数量与行为监测, 获取的水下声景信息可作为一项重要的生态考核指标, 不仅能用于定量评价长江生态环境质量和水生生物多样性及其在时间和空间上的变化, 而且可以用于考核相关保护工作的落实情况和实际的保护效果; 另外, 中国科学院声学研究所<sup>[3]</sup>与国家海洋局第三海洋研究所等<sup>[4]</sup>长期进行着生物噪声观测, 并结合实际探索在渔业与养殖中的应用可能性; 中国海洋大学王芳团队<sup>[5]</sup>、厦门大学许肖梅团队<sup>[6]</sup>也在实验室中研究有关对虾的听觉与掩蔽行为规律。这些工

作为我国生物声、人为声与环境声信息的应用提供了重要基础。

甲壳动物是最大的水生动物类群, 虽然其发声行为及信号特征研究取得了显著进展, 但尚处于起步阶段。Staaterman<sup>[7]</sup>提出了甲壳动物被动声学监测是一个新研究前沿。Coquereau等<sup>[8]</sup>对东北大西洋沿岸栖息地获取的34种甲壳类动物, 在实验室中采集了爬行、进食、下颌骨摩擦、游泳及其他行为产生的声音, 分析比较了11种甲壳类动物的发声信号及行为特征。可见甲壳动物行为多样、能够产生多种声音, 通过对其行为与发声特点间的关联性研究, 将有助于利用声音信息判断其行为的技术应用。水生动物的游动行为一般可以用游动速度表征, 有游动最慢的耐久游速、游动至疲劳的持久游速以及在应激状态下的暴发游速<sup>[9]</sup>。甲壳类动物游动行为的快速变化必然影响其发声。因此, 可以依据快速游动发声信号判断其生长状态<sup>[10]</sup>。另外, 水生动物的健康状况不佳或对环境不适应时, 都会

收稿日期: 2022-07-25; 修订日期: 2022-11-15

基金项目: 上海市科技兴农项目南美白对虾声谱智能投饵装备研制(智慧农业)(201902080010F01117)资助 [Supported by the Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program of China (2019-02-08-00-10-F01117)]

作者简介: 李钊丞(1999—), 男, 学士; 主要研究方向为海洋声学与生物学。E-mail: 1147945963@qq.com

通信作者: 曹正良(1972—), 男, 博士; 主要研究方向为海洋声学与生物学。E-mail: zlcao@shou.edu.cn

通过一系列行为表现出来,如:摄食减少甚至停止、游泳活动增多或降低等。例如,南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*)长时间处于应激状态时,会导致其摄食频次下降、免疫力降低、容易暴发白斑病毒病等一些疾病;其次是在遭到水质突变或高温期受惊后容易死亡<sup>[11]</sup>。故基于确定生物的快速游动发声规律研究也有助于其生存或生态环境的评估。

在南美白对虾的池塘养殖中,由于对虾栖息于水体底部而且一般养殖水环境中的能见度较差,以光学观测方法无法实现对其生长情况的监测。另外,传统的观察饵料台可以判断对虾摄食饵料情况,但人工判断饵料状况对于实时高效监测自然生物状况还有很大差距。南美白对虾在摄食过程中其上下颌的咬合会发出声音,近几年来由美国、巴西、秘鲁组成的研究团队<sup>[12-18]</sup>利用被动声学方法在实验室中系统研究了该类发声信号与摄食行为的关系,但就南美白对虾的游动行为发声鲜有研究。Wei等<sup>[19]</sup>在实验室研究中发现南美白对虾进行快速游动时会发出声音,但未能对该现象与行为结合做进一步确定研究。对虾游动中行为的突变(如:快速游动与甩尾弹射)都会产生声音。

由于南美白对虾的运动能力受到大小、水温、盐度、溶解氧和饥饿的影响<sup>[20, 21]</sup>并且在复杂的养殖现场环境中很难判断对虾准确的水下运动行为,因此必须先在实验室环境下开展行为生态学研究。根据一些学者<sup>[22, 23]</sup>的研究,一定强度的光对南美白对虾有刺激作用,这为利用可控光源进行对虾快速游动控制、并在实验中明确应激行为的声音信号提供了方案。本研究首先在实验室水箱中利用可控光源作为刺激对虾应激的装置,通过水听器采集对虾快速游动时的发声信息,结合水下摄像机录制的对虾行为以确定其发声信号。然后,获取对比了池塘养殖现场环境的对虾弹射发声信号,为对虾游动发声信号等水下声音信息在养殖生产中的应用提供基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料及布设

实验中所用样本选自浙江省舟山市嵊泗县上海海洋大学大洋山海洋生态工作站育苗基地的南美白对虾养殖池。由于动物声音信号的产生取决于其在运动过程中的能量转化形式及其运动方式,考虑到不同规格的对虾所产生的能量及其行为可能有所区别。因此,本研究选取10尾生长期为3个

月,体长介于10—11 cm的大规格南美白对虾,10尾生长期为1个半月,体长介于4—6 cm的小规格南美白对虾进行实验。发声行为实验用2个同等型号且经做遮光处理后的玻璃水箱(44 cm×28 cm×30 cm),箱底铺设隔振泡沫垫、箱顶附有挡光盖,水温维持在28℃,实验室保持遮光环境,使水箱内部保持完全黑暗。如图1所示,各箱内部固定2只功率为10 W的水下可控光源、1个水下摄像机、一只水听器置于箱中水下20 cm,与双通道SM4(Song Meter 4)采集仪相连进行水下声音记录。

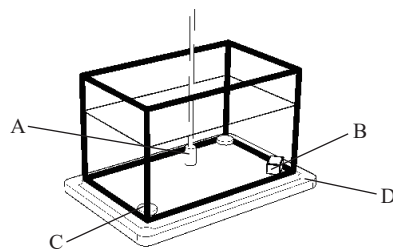


图1 装置布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of device layout

A. 水听器; B. 水下摄像机; C. 可控光源; D. 泡沫垫

A. hydrophone; B. underwater camera; C. a controllable light source; D. foam pad

### 1.2 实验方法

实验开始前,将可控光源及水下摄像机(放入水中前开启)提前布设至所需位置;每次实验将所需南美白对虾单只放入对应编号的水箱中。每次实验时在两个同等型号的水箱中各放入相同规格的对虾一只,且两者间隔30 cm有泡沫垫隔声,相互之间无声传播干扰,可作为内部水体与空气中环境噪声的对照水箱。由于对虾从养殖水池转移到实验水箱的过程中会产生应激反应,所以放入水箱后需使其在完全黑暗的环境中适应40—60min以恢复正常状态。然后,依次按照组数顺序将双通道的SM4的两只水听器探头分别放入两只对照水箱中,布设完成后开启声音采集仪,随后将可控光源开启;水听器记录灯光开启后10min的音频(以计时器确定时间);记录完成后关闭水听器及可控光源,将实验用虾单独放入另一养殖缸(φ3.4 m×1.2 m)中,便于后续采样重测。实验声学数据存储为wav格式,视频存储为Mp4格式。

### 1.3 数据处理方法

将对虾在快速游动作为标定时间内的声音片段进行时频分析,对其时间序列信号采用傅里叶变换,通过信号中不同频率成分的分析可以掌握信号特征<sup>[24]</sup>。下式为数学中定义的离散时间傅里叶变换对<sup>[25]</sup>:



$$\begin{cases} x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \\ X(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j\omega n} \end{cases}$$

本研究中信号处理中的采样频率为96000 Hz、增益为20 dB, 进行时频分析时所采用的时窗按信号波形总时间之1/50分时窗, 并利用MATLAB中的spectrogram函数进行时频图的绘制。利用该函数进行数据处理时, 参数选取时间段重叠75%; 窗口选用Hamming窗。Hamming窗的表达式为:

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

式中,  $w(n)$ 为第 $n$ 个Hamming窗,  $n$ 为序数,  $N$ 为数据点个数。

## 2 结果

### 2.1 两种规格对虾快速游动行为

通过影像观察, 两种规格对虾受到光刺激后的运动模式基本一致, 主要依赖腹肢的前后摆动, 产生推力, 使其运动。通常对虾在受到突发刺激后, 由于恐惧, 其行为一般以快速逃逸游动为主, 少数情况下对虾会在几秒钟后开始快速游动, 从而产生短时声音信号。从实验中多次的行为观察发现, 对虾在黑暗条件下受到突变强光刺激都会产生明显的逃逸行为, 包括快速游动和甩尾弹射两种类型。在突发快速游动时, 对虾游泳姿态呈现头部低于灯光位置, 虾背朝上弓起的特点。另外, 由于箱底与壁为玻璃, 对虾快速游动逃逸过程中也会与其产生碰撞或摩擦, 试图借力提高逃离危险环境的速度。

当对虾出现逃逸快速游动行为时, 其头部均向下并接近水箱底部。这可能是由于对虾头部低于水下可控光源的高度有助于避免对虾眼球直接受到光刺激而产生的畏光躲避行为。将游动片段的影像进行逐帧观测发现, 对虾受到突变光刺激后, 其腹肢出现了肉眼难以看清的快速运动。在游动过程中, 其头部保持朝上姿势。通过快速游动的过程分解如图2, 在对虾快速运动时, 其第一腹肢至二腹肢与第三腹肢至第五腹肢并不保持同步, 这是由于其第一至第二腹肢运动明显快于第三至第四腹肢运动而导致的。即便是第三至第五腹肢也存在运动速度上的差异, 根据观察越往后的腹肢运动速度越缓慢。

观察到对虾的快速游动行为后, 通过校准对虾

行为影像及其行为发声信号的时间坐标, 从而获得对应的行为发声信号波形。如图3为图2中的对虾在实验过程中所产生的发声信号, 将其时间进行校准后, 依据图2中的对虾产生该行为的时间以确定图3中对应的发声信号, 如图3中小黑框所标注。通过影像行为确定与发声信号时间对应, 对采集记录的声学信息即声音信号进行快速游动发声事件的截取。分析发声信号的时间与频率特征并进行比较, 可以得出对虾快速游动行为的发声规律。

### 2.2 快速游动行为发声信号对比

本文的数据处理通过对比对照组的影像资料及其发声信号后, 进行声学信号特征的提取。其声

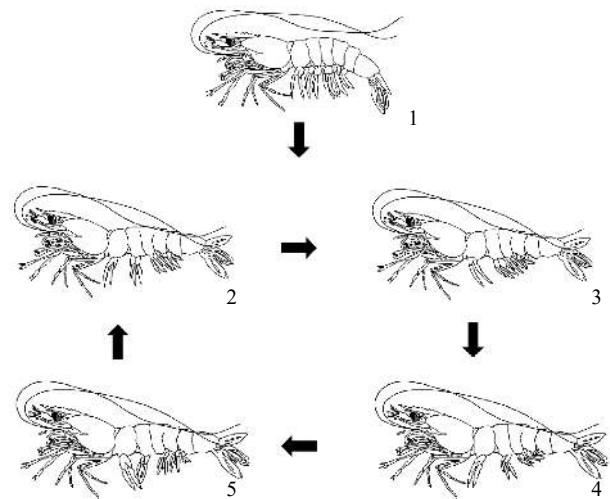


图2 对虾游动行为

Fig. 2 Swimming behavior of *L. vannamei*

1. 对虾未受到刺激时的正常状态; 2—5. 对虾受到刺激后腹肢的摆动顺序

1. the state when it is not stimulated; 2—5. the swing sequence of pleopods

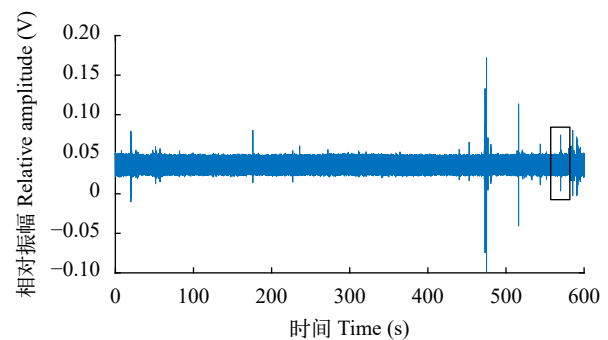


图3 对虾发声信号的波形图

Fig. 3 Oscillogram of the acoustic signal related to swimming behavior of *L. vannamei*

黑色方形框为图2中的对虾在实验过程中快速游动所产生的发声信号

The acoustic signal in the black box is generated by *L. vannamei* during swimming in Fig. 2

学信号提取的依据为: 对照组对虾产生不同的行为或保持静止时, 对照组在相同的时间内出现同样特征的发声信号即为环境噪声或外界干扰信号。将前述干扰信号排除后, 剩余声学信号即为对虾行为发声的特征信号。在实验过程中, 对虾进行正常游动时, 由于其腹肢运动频率明显低于异常状态时的运动频率且正常游动时产生的声音信号十分微弱, 该声音信号的强度及频率基本与环境噪声融为一体。因此, 在对虾正常游动且不接触任何固体介质时, 其产生的正常游动声音可以忽略。

**小规格对虾快速游动行为发声** 以影像中所出现的快速游动作为标定时间, 将对应时间内的声音片段进行截取并导入MATLAB中, 绘制得到对虾快速游动发声信号的波形图(图4)。在波形图中, 所确定的5个信号波形变化规律较为相似, 故此可判断出对虾快速游动发声具有一致性。5个信号波形的幅度随时间越来越小, 可以判别出对虾快速游动中发声持续时间在0.03—0.04s。

利用spectrogram函数及时窗移动叠加, 可以得出图4中各个信号的时频分布特征, 即图5。由该图可以看出, 小规格虾的发声能量主要集中于频率100 Hz以下及250 Hz附近。为进一步确定其发声频率, 将该尾虾的5个不同时刻发声信号幅度以最大值归一, 从而得出该尾对虾快速游动发声信号的能量集中频率范围。重复前述步骤, 最后依据10尾虾的有效数据进行确定。

根据图5可得, 小虾快速游动发声频率主峰在

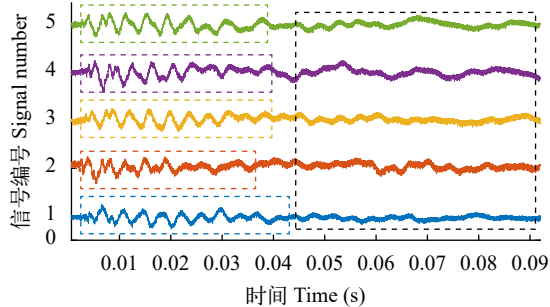


图4 小规格对虾快速游动发声信号的波形图

Fig. 4 Oscillogram of acoustic signal related to fast swimming behavior of the small *L. vannamei*

图中彩色方框表明信号波形的幅度随时间越来越小, 其反映出对虾快速游动中发声持续时间在0.03—0.04s, 黑色方框表明波形幅度趋于平缓, 此时对虾未产生明显发声信号

In the figure, the color box represents that the amplitude of the signal waveform is getting smaller and smaller with time, which reflects that the duration of the sound produced by the fast swimming of shrimp is between 0.03—0.04s, and the black box represents that the amplitude of the waveform tends to be flat, in which the shrimp does not produce obvious sound signals

250 Hz附近, 有三组信号的频率次峰出现在60 Hz附近。由于图4波形中显示对虾的每段游动发声持续时间在0.03—0.04s, 图5中满足该条件的能量集中范围在250 Hz附近, 结合图6中频率主峰在250 Hz附近, 所以小规格虾的快速游动发声信号能量稳定集中在250 Hz频率附近。

**大规格对虾快速游动行为发声** 根据图7可知, 大规格虾所产生的快速游动行为的波形在时间

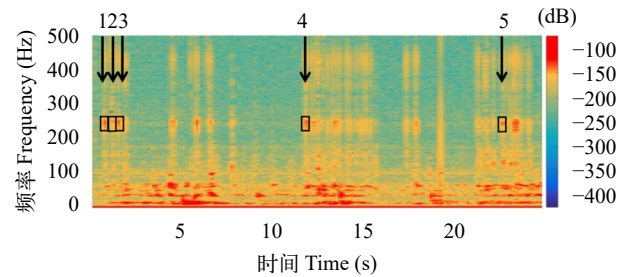


图5 小规格对虾快速游动发声信号的时频图

Fig. 5 Time-frequency diagram of the acoustic signal related to fast swimming behavior of the small *L. vannamei*

图中箭头上数字1—5代表了图4中对应波形, 方框内的红色色块代表相应波形经过傅里叶变换后所呈现的信号特征

Numbers above the arrows represent the corresponding waveform in Fig. 4, respectively, and the red color blocked in the boxes represents the signal characteristics of the corresponding waveform after Fourier transform

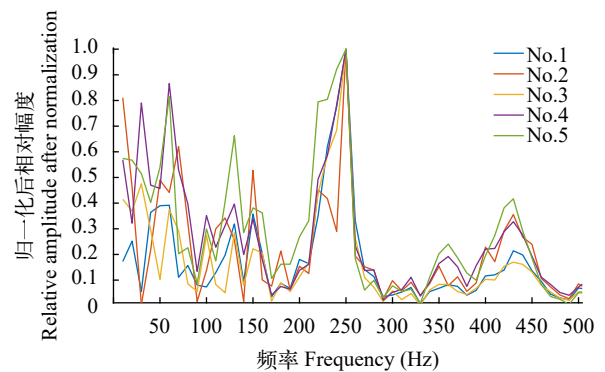


图6 小型对虾快速游动发声信号的频谱图

Fig. 6 Frequency spectra of the acoustic signal related to fast swimming behavior of the small *L. vannamei*

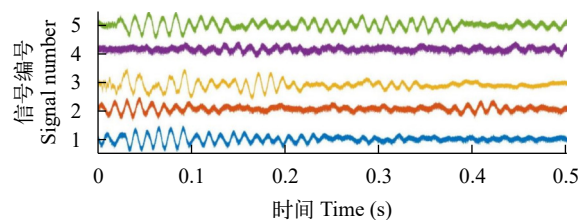


图7 大规格对虾快速游动发声的波形图

Fig. 7 Oscillogram of the acoustic signal related to fast swimming behavior of the large *L. vannamei*

上存在不规律性。其波形具体表现为: 信号编号1中出现约0.05s较为集中且起伏较大的波形, 其后波形的起伏逐渐降低; 信号2中波形起伏趋于一致的时间较短; 信号3中波形时而起伏较大时而较小; 信号4中波形起伏较小; 信号5中波形起伏较大且持续时间较长。

利用傅里叶变换及时间窗叠加得出对虾的时间、频率及能量的分布图。根据图8可知, 图A与图B中发声能量均集中于20及70 Hz附近。即便对虾从第一段时间内的快速游动停止后再次游动, 其发声能量集中范围依旧是稳定的。但个别情况下对虾快速游动的发声能量集中于50—70 Hz。为进一步探明对虾快速游动的发声频率, 将相对幅度最大值归一化进行频谱分析。

进行频谱分析后可知, 对虾快速游动发声的频率主峰为65—70 Hz, 其次峰由于信号的不同出现在20或60 Hz附近。

虽然波形图中对虾的每段游动发声持续时间有所不同, 但最多不超过0.4s, 图8中满足该条件的能量集中在70 Hz附近, 结合图9中频率主峰在70 Hz

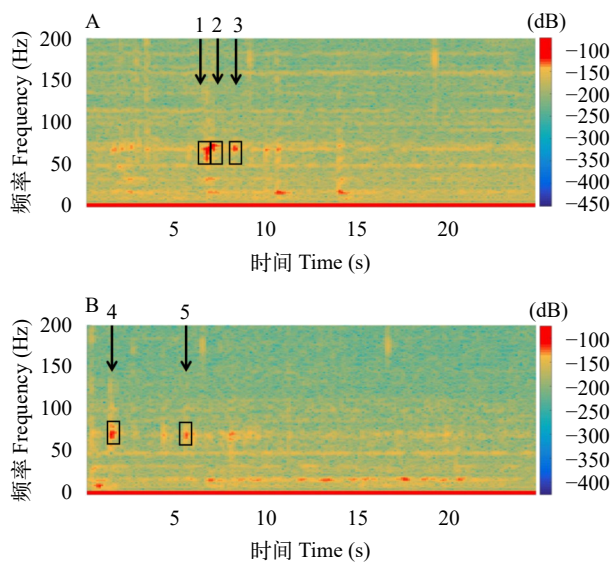


图8 大规格对虾快速游动发声信号的时频图

Fig. 8 Time-frequency diagram of acoustic signal related to fast swimming behavior of the large *L. vannamei*

图中箭头上方数字1—5代表了图8中对应波形, 方框内的红色色块代表相应波形经过傅里叶变换后所呈现的信号特征图A. 在图7信号编号1—3发声时频图; 图B. 对虾截取声学片段编号4—5快速游动发声时频图

Numbers above the arrow in the figure represent the corresponding waveform in Fig. 10, and the red color blocked in the boxes represents the signal characteristics of the corresponding waveform after Fourier transform Fig. A. The time-frequency diagram of signal number 1—3 in Fig. 7; Fig. B. The time-frequency diagram of signal number 4—5 in Fig. 7

附近, 证明能量最大处集中于70 Hz附近。因此大规格虾的快速游动发声频率为70 Hz。

**两类发声信号的频谱特征** 将所得声音信息的频谱进行平均并做光滑处理后, 得到图10及图11所示的小规格虾与大规格虾的快速游动发声信号频谱。对小规格虾多组信号的频谱进行均值处理后, 其仅突显频率为250 Hz的主峰, 虽然425 Hz附近出现了次峰, 但由于该频率与100 Hz以下的相对幅度基本接近, 故不考虑其为声音信号特征。

对大规格虾多组信号的频谱进行均值处理后, 仅突显频率为70 Hz的主峰, 虽然15 Hz附近出现了次峰, 但与70 Hz的相对幅度相差过大, 故不考虑该

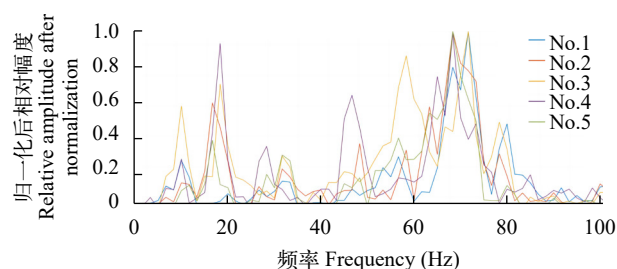


图9 大规格对虾快速游动发声的频谱图

Fig. 9 Frequency spectra of the acoustic signal related to fast swimming behavior of the large *L. vannamei*

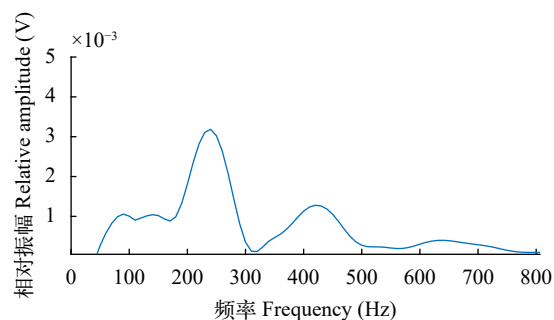


图10 小规格对虾快速游动发声信号平均频谱

Fig. 10 Average frequency spectrum of the acoustic signal related to fast swimming behavior of the small *L. vannamei*

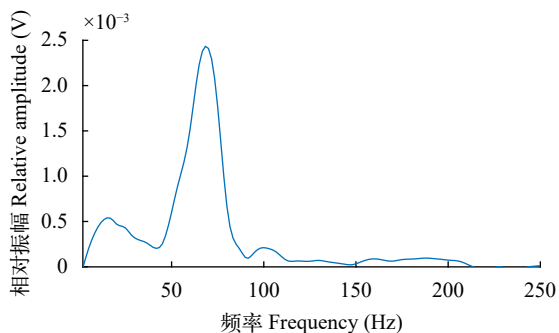


图11 大规格对虾游动发声信号平均频谱

Fig. 11 Average frequency spectrum of the acoustic signal related to fast swimming behavior of the large *L. vannamei*



次峰为声音信号特征。

根据上述分析可知小规格虾快速游动的声学特征为250 Hz左右,大规格虾快速游动声学特征参数为70 Hz左右,由此可以判断出随着对虾体型的变化其游动发声也会出现改变。根据本研究中所呈现的趋势为体型较大的对虾游动所产生的声音频率要低于体型较小的对虾。

### 2.3 对虾游动行为中的高频发声信号

**对虾贴底摩擦滑动发声** 本研究对音频进行分析时同样获取了部分高频信号(图12)。根据影像资料显示,对虾产生高频信号时,其肢体均与水箱有运动摩擦;而无高频信号的部分,其肢体与水箱无运动摩擦。对比图4及图12,对虾的不同游动行为产生出不同的声音信号,其中对虾在水中游动时信号频率要明显低于对虾贴底摩擦游动时的信号频率。

由于南美白对虾在水箱中游动时,受限于水箱大小,其肢体与箱体接触产生摩擦,故而出现高频声音信号。图13是图12中游动摩擦行为发声信号的时频图,与图5比较可以看出,南美白对虾贴底游动发声频率要明显高于南美白对虾悬于水中快速游动。由于南美白对虾贴底游动时其步足与前肢

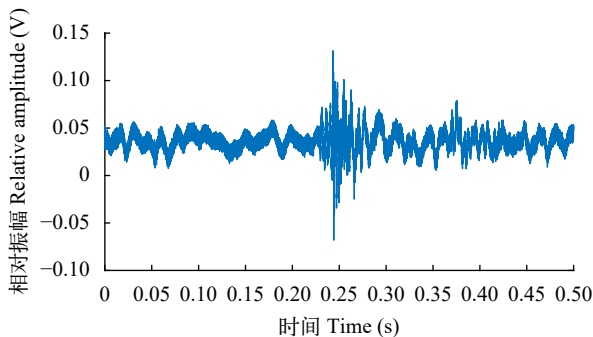


图12 小规格对虾贴底游动发声信号的波形图

Fig. 12 Oscillogram of the acoustic signal related to swimming close to the bottom of the small *L. vannamei*

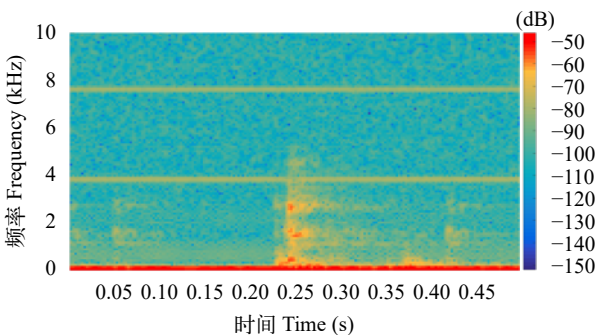


图13 小规格南美白对虾游动摩擦行为发声信号时频图

Fig. 13 Time-frequency diagram of acoustic signal related to friction in swimming of the small *L. vannamei*

会与水箱底部有不同程度的接触,故会出现多个能量集中频率且频率值相对较高。

**对虾甩尾弹射发声及信号特征** 对虾在出现弹射行为前,其腹肢会出现异常快速的摆动,当摆动速度达到某一阈值时,对虾产生弹射。对虾弹射时的运动轨迹为“倒反S”型。对虾弹射速度极快,即使将视频慢放100倍也只能观察到其游动轨迹。对虾弹射完成后其依然以极高的速度进行游动,随后保持一定时间的静止。

在突然受到光刺激后,部分对虾会出现甩尾弹射现象。图14展示了本实验中获取的大规格对虾甩尾弹射时的发声波形,根据该图可知对虾在产生应激弹射时其波形中出现相对振幅低于0.3的毛刺信号,且该信号的振荡频率较高。由于对虾在进行应激弹射时其运动速度极快,故其发声信号振荡频率较高的原因可能为对虾快速弹射划过水流及其在弹射过程中的腹部各壳节之间的摩擦而导致。

根据对该波形进一步分析得出其频谱图(图15),由该图可知,大规格对虾在应激弹射时其中心频率为3 kHz左右。虽然对虾贴底游动发声也可达3 kHz,但对上述波形进行傅里叶变换后得出的时频图(图16)

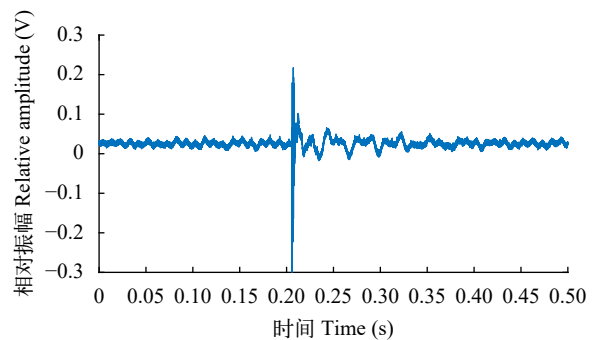


图14 大规格对虾弹射发声信号的波形图

Fig. 14 Oscillogram of the acoustic signal related to tail-flip in the large *L. vannamei*

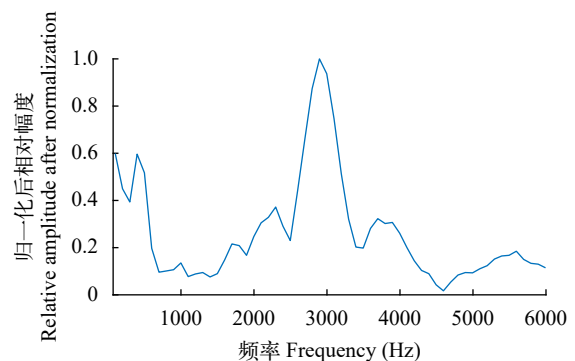


图15 对虾弹射发声信号的频谱图

Fig. 15 Spectrum of the acoustic signal related to tail-flip of the large *L. vannamei*

可知, 对虾产生应激弹射时其发声频带范围要大于对虾贴底游动发声情况, 且前者的能量比后者更集中。小规格对虾应激弹射的发声特征与大型对虾类似, 但其频率高于大规格对虾, 约为4 kHz。因此对虾应激弹射发声易与其快速游动发声进行区分。

由于对虾在水中产生声音的强弱取决于其与水听器的距离, 本文中的声压级参数为相对量值, 故不对其进行具体分析。

**虾塘实测对虾游动发声信息** 根据上述实验室研究发现, 对虾在水中游动时其发声频率取决于腹肢摆动频率(小虾1s内腹肢摆动25—33次, 大虾1s内腹肢摆动约20次), 小规格虾的游动发声频率明显高于大规格对虾。据此可以进一步考察养殖虾塘中对虾的游动发声情况, 图17是同样听声装置在现场虾塘采集的夜间声音时频结果, 时频图显示虾塘背景噪声能量最大处主要分布于10 Hz附近, 多数能量在100 Hz有密集分布, 偶见分布于500 Hz。宏观来看, 虾塘中噪声的相对声压级大于实验室中对虾游动行为发声的相对声压级。

依据上文所得结果, 对虾塘中长时间录制的音频进行分析得到类似于实验室中对虾甩尾弹射的

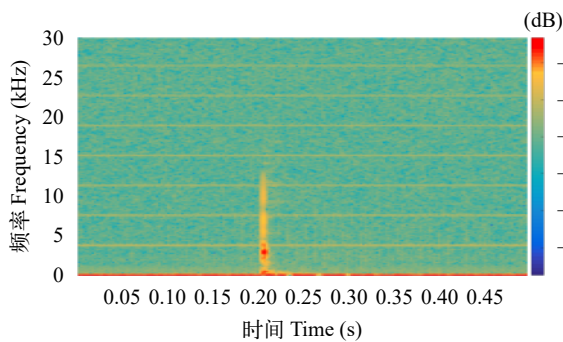


图16 对虾弹射发声信号的时频图

Fig. 16 Time-frequency diagram of acoustic signal related to tail-flip of the large *L. vannamei*

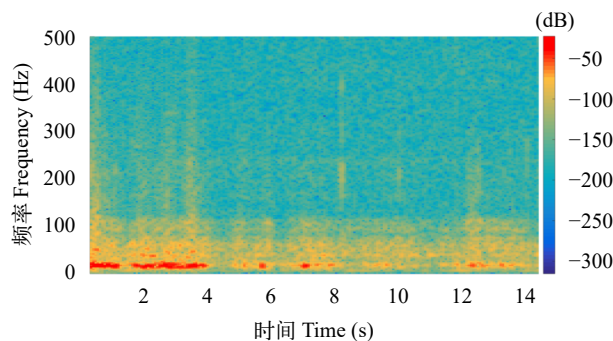


图17 虾塘实测环境背景噪声信号的时频图

Fig. 17 Time-frequency diagram of environmental background noise in the pond

声音信号, 该段音频信号产生类似实验室中对虾甩尾弹射时所发出“啪”的声音, 但其波形时间特征及声谱能量集中频率特征参数与上文中所提参数有所偏差(图18和图19)。虾塘中对虾甩尾弹射的能量为0.5—6 kHz; 能量集中在1—4 kHz; 能量最大集中频率约为2 kHz。通过对虾塘频谱进行分析可知: 其弹射频率主峰约1.8 kHz并有次主峰约250 Hz, 而实验室中所获数据为: 其弹射频率主峰约为3 kHz并有次主峰约450 Hz。虽然实验室所得发声信号与虾塘信号在声学参数上有具体差别, 但两者之间仍具有一定程度的相似性: 两者在波形图中均为毛刺信号, 其波形密集程度远高于周围波形; 两者在时频图中均为窄带宽能量信号, 其信号持续时间约为0.015s; 两者在频谱图中, 其频率主峰均为高频、次主峰均为低频。

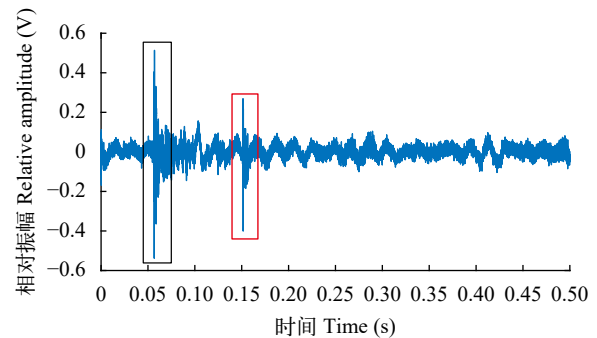


图18 虾塘实测对虾弹射发声信号的波形图

Fig. 18 Oscillogram of acoustic signal related to tail-flip of *L. vannamei* in the pond

图中黑色方框与红色方框中的波形为虾塘中的对虾弹射信号  
The waveforms in the black and red boxes in the figure are tail-flip signals of *L. vannamei* in the pond

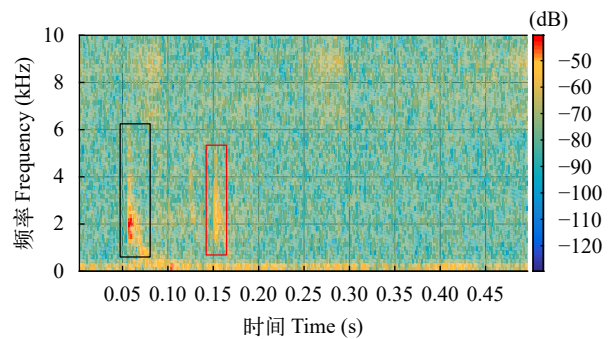


图19 虾塘实测对虾弹射发声信号的时频图

Fig. 19 Time-frequency diagram of the acoustic signal related to tail-flip of *L. vannamei* in the pond

图中黑色方框与红色方框中的光谱为虾塘中的对虾弹射信号, 其与图19中所框起来的波形相互对应

The spectra in the black box and red box in the figure is tail-flip signal of the *L. vannamei* in the pond, which corresponds to the waveform framed in Fig. 19



### 3 讨论

本研究在实验室中设计可控光源诱发对虾产生应激反应,基于水下对虾行为影像确定了南美白对虾快速游动的应激行为模式,利用被动声学系统获得了对虾应激行为发声信号特征。实验结果表明:对虾在实验水箱中受到可控光刺激后,产生三种游动行为模式:快速游动、贴底摩擦滑动及甩尾弹射;这三种游动模式的发声信号能量分别位于:低频、中高频及中高频范围;并且大、小规格南美白对虾的发声信号特征明显不同。

由于快速游动发声信号频段远低于贴底摩擦滑动及甩尾弹射的发声,所以可以根据声音信息将快速游动行为与后两者进行区分。虽然,贴底摩擦滑动与甩尾弹射均为中高频,但是两者的能量集中频率、发声频率范围及信号特征时间有明显差别,具体差别为:前者的能量集中频率出现多点分布状态其能量集中频率为2和3 kHz,频带为1—5 kHz,且最小发声持续时间约为0.5s;后者的发声频率信号较为稳定,其能量集中频率为4 kHz,频带为2—12 kHz,且最小发声持续时间约为0.01s。该差别的原因:由于对虾前后腹肢运动速度的不一致性,所以在快速摆动时其腹肢之间会发生碰撞。对虾在贴底摩擦滑动时,由于其腹肢及步足对箱底有不同程度的摩擦,且同时产生不同方向与大小的摩擦力,故引起水体产生多种振动、形成更长时间的多频段发声信号。对虾在水中甩尾弹射时,对虾的肌肉及壳体向其运动相反方向挤压水体,使其产生运动推力的同时使水体振动产生声音,故其能量短时爆发较为集中。由于对虾甩尾弹射时的运动速度极快,其身体各部分均划过水流,因此产生较宽的频带范围。

将南美白对虾养殖虾塘的数据与实验室对比发现:虾塘中由于多种因素叠加的环境噪声与南美白对虾快速游动发声频率均为低频,且虾塘中难以排除其他因素所产生的低频噪声,因此在实际环境中对虾快速游动的发声信号很难直接确定。另外,实验室内对虾贴底摩擦的发声信号在实际养殖中不存在。而对虾弹射发声信号频率远高于虾塘环境噪声,能够通过对比确定,虾塘的弹射发声的持续时间均约为0.01s、能量分布均集中于2—3 kHz,与实验室所得信号特征基本一致、有一定的关联性:两者均为毛刺信号、窄带宽能量信号,其频率主峰均为高频、次主峰均为低频。两者相似原因可能为:由于对虾产生甩尾弹射行为的运动模式一致,即虾体肌肉收缩后舒张扰动周围水流产生低频

振动,再反复挤压水流后形成高频振动。由于该过程持续时间极短,因此其发声信号也为短时间信号。虾塘甩尾弹射声音信号与实验室的区别为:前者的能量集中频率、频率主峰及次主峰频率更低且前者的频率范围要更小。产生这种偏差原因可能为:虾塘中的对虾为群体,在产生甩尾弹射时其发声特征与单尾虾有所差别;虾塘中的对虾规格并非完全一致,这种差别可能导致所产生的弹射声音信号的区别。通过对虾塘声音信息进行分析时发现存在其他生物产生的声音,例如蝉有规律地发出高频信号,其能量集中的频率范围远高于对虾弹射情况,只有两个发声事件同时出现时能量频率分布稍有交叠,但并不影响对虾尾弹弹射发声行为的判断。而且,对虾弹射发声与对虾摄食发声存在明显的区别且易于区分。张丽珍等<sup>[24]</sup>对南美白对虾进食前后发声信号特点分析得出:投饵前频率范围主要在2—10 kHz,投饵后频率范围有所扩大,约在5—15 kHz。曹正良等<sup>[26]</sup>对南美白对虾摄食不同颗粒饵料发声进行研究时发现,对虾(体长9—10 cm)摄食不同粒径颗粒饲料的声音信号特征相似,频率介于5—45 kHz,其中摄食0.4和0.8 mm粒径的声音信号谱峰中心频率约17 kHz,1.2 mm粒径的平均约10 kHz;摄食沙蚕声音信号频率介于5—20 kHz,谱峰中心频率约7 kHz。所以,对虾摄食的发声频率所在范围及中心频率均与对虾弹射发声信号有明显差别。因此,南美白对虾弹射发声是养殖中可辨别并可加以利用的水下生物声学信息。

我国水产养殖向着智能化与生态化的方向发展,基于以摄食发声的声学方法正在应用于对虾的投饵反馈等应用<sup>[27, 28]</sup>。由于饵料中营养成分的不同会影响不同规格南美白对虾的生长<sup>[29—31]</sup>,所以对于不同规格的南美白对虾进行饲养时,通常设计营养成分有所区别的投喂饵料策略。本文确定的养殖虾塘对虾快速游动尤其甩尾弹射的发声信号特征,可作为养殖中监测对虾行为的一个判据,通过将该行为发声与摄食发声信息结合将有助于设计智能投饵机及精细化对虾养殖的自动化控制。未来可以进一步研究不同规格、群体密度、健康状况及不同养殖环境下对虾甩尾弹射发声的异同,结合摄食发声为虾塘中实际利用提供生物声学规律,从而为对虾健康行为监测及疾病预测的信息利用开发奠定基础。

### 参考文献:

- [1] Giuseppa B. Passive acoustics to study marine and freshwater ecosystems [J]. *Journal of Marine Science and En-*

- gineering*, 2022, **10**(7): 994.
- [2] Wang K X, Wang Z T, Mei Z G, *et al.* Ecological assessment indicator of the Yangtze River: passive acoustic monitoring based population size of the Yangtze finless porpoise [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(6): 1390-1395. [王克雄, 王志陶, 梅志刚, 等. 长江生态考核指标: 基于被动声学监测的长江江豚数量 [J]. 水生生物学报, 2021, **45**(6): 1390-1395.]
  - [3] Yuan Z Q, Yan S F, Song H C, *et al.* Source level estimation of snapping shrimp sounds in shallow water environment [J]. *Acta Acustica*, 2020, **45**(4): 535-544. [袁竹清, 鄢社锋, Song H C, 等. 浅海鼓虾噪声声源级测量方法 [J]. 声学学报, 2020, **45**(4): 535-544.]
  - [4] Zhang M Q, Shi X Q, Huang X D, *et al.* Marine animal noise obsrved in Zhoushan Islands waters [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1987, **6**(2): 127-131. [张民强, 施性乞, 黄晓丹, 等. 舟山海域海洋生物的噪声 [J]. 台湾海峡, 1987, **6**(2): 127-131.]
  - [5] Zhu Y J. The basic research of effects of music sound wave on the growth and physiology of *Litopenaeus vannamei* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [朱玉杰. 音乐声波对凡纳滨对虾生长及生理特征影响的初步研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
  - [6] Zhou W, Xu X, Tu X, *et al.* Preliminary exploration for effects of sound stimulus on the movement behavior of *Litopenaeus vannamei* [C]. 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA). Harbin, China. IEEE, 2016: 1-6.
  - [7] Staaterman E. Passive Acoustic Monitoring in Benthic Marine Crustaceans: A New Research Frontier [M]. Modern Acoustics and Signal Processing. New York, NY: Springer New York, 2016: 325-333.
  - [8] Coquereau L, Grall J, Clavier J, *et al.* Acoustic behaviours of large crustaceans in NE Atlantic coastal habitats [J]. *Aquatic Biology*, 2016(25): 151-163.
  - [9] Beamish F W H. Swimming capacity [J]. *Fish Physiology*, 1978(7): 101-187.
  - [10] Zhang D. Applications of aquatic animal behavior in aquaculture [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, **37**(10): 1591-1600. [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.]
  - [11] Yan B L. Discussion on the development of *Litopenaeus vannamei* culture [J]. *Journal of Aquaculture*, 2003(3): 2. [阎斌伦. 发展凡纳(滨)对虾养殖几个问题的讨论 [J]. 水产养殖, 2003(3): 2.]
  - [12] 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.
  - [13] 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.
  - [14] 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.
  - [15] Berk I M, Evans W E, Benson R H, *et al.* The use of passive sonar to detect sound production and calculate population densities of penaeid shrimp in the Gulf of Mexico [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, **99**(4): 2533-2574.
  - [16] Berk I M. Sound production by white shrimp (*Penaeus setiferus*) analysis of another crustacean-like sound from the Gulf of Mexico, and applications for passive sonar in the shrimping industry [J]. *Journal of Shellfish Research*, 1998, **17**(5): 1497-1500.
  - [17] 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.
  - [18] 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.
  - [19] Wei M, Lin Y, Chen K, *et al.* Study on feeding activity of *Litopenaeus vannamei* based on passive acoustic detection [J]. *IEEE Access*, 1566: 156654-156662.
  - [20] Yu X, Zhang X, Duan Y, *et al.* Effects of temperature, salinity, body length, and starvation on the critical swimming speed of whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2010, **157**(4): 392-397.
  - [21] Zhang P, Zhang X, Li J, *et al.* The effects of body weight, temperature, salinity, pH, light intensity and feeding condition on lethal DO levels of whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) [J]. *Aquaculture*, 2006, **256**(1/2/3/4): 579-587.
  - [22] Guo B, Wang F, Dong S, *et al.* The effect of rhythmic light color fluctuation on the molting and growth of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Aquaculture*, 2011, **314**(1/2/3/4): 210-214.
  - [23] Sanudin N, Tuzan A D, Yong A S K. Feeding activity and growth performance of shrimp post larvae *Litopenaeus vannamei* under light and dark condition [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2014, **6**(11): 103-109.
  - [24] Zhang L Z, Lu T C, Yang J Q, *et al.* Analysis on sound characteristics of *Penaeus vannamei* before and after feeding [J]. *Technical Acoustics*, 2020, **39**(4): 413-418. [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.]
  - [25] Merchant N D, Fristrup K M, Johnson M P, *et al.* Measuring acoustic habitats [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2015, **6**(3): 257-265.
  - [26] Cao Z L, Shen M T, Li Z C, *et al.* Characteristics of feeding acoustic signals of *Litopenaeus vannamei* fed with pellets of different sizes [J]. *South China Fisheries Sci-*

- ence, 2022, 18(6): 26-34. [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.]
- [27] Tang R, Chen J, Liu S J, *et al.* Progress of research on feedback technology of feeding in aquaculture based on acoustic methods [J]. *Fishery Modernization*, 2019, 46(3): 15-21. [唐荣, 陈军, 刘世晶, 等. 基于声学方法的水产养殖投喂反馈技术研究进展 [J]. 渔业现代化, 2019, 46(3): 15-21.]
- [28] Qu R, Liu H, Zhuang B L, *et al.* Research progress of feeding acoustics in aquaculture [J]. *Fishery Modernization*, 2020, 47(4): 1-6. [曲蕊, 刘晃, 庄保陆, 等. 水产养殖中摄食声学研究进展 [J]. 渔业现代化, 2020, 47(4): 1-6.]
- [29] Lin H, Chen Y, Niu J, *et al.* Dietary methionine requirements of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*, of three different sizes [J]. *Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2015(67): 1-10.
- [30] Chen Y F, Li Z J, Niu J, *et al.* Effects of dietary protein level on protein apparent digestibility and digestive enzyme activities of *Litopenaeus vannamei* at different sizes [J]. *South China Fisheries Science*, 2012, 8(5): 66-71. [陈义方, 李卓佳, 牛津, 等. 饲料蛋白水平对不同规格凡纳滨对虾蛋白质表观消化率和消化酶活性的影响 [J]. 南方水产科学, 2012, 8(5): 66-71.]
- [31] Wen G L, Li Z J, Lin H Z, *et al.* Effect of salinity and scale on nutrient contents of muscle of *Litopenaeus vannamei* [J]. *South China Fisheries Science*, 2007, 3(3): 31-34. [文国樑, 李卓佳, 林黑着, 等. 规格与盐度对凡纳滨对虾肌肉营养成分的影响 [J]. 南方水产, 2007, 3(3): 31-34.]

## ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF FAST SWIMMING AND ITS INFORMATION UTILIZATION FOR *LITOPENAEUS VANNAMEI*

LI Zhao-Cheng, XIANG Sheng-Yu, SHEN Meng-Ting, WANG Xiu-Xiu, ZHANG Ri-Xin and CAO Zheng-Liang

(College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** White-leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) as an important aquatic economic species in the world, behavioral acoustics research will help to improve the level of aquaculture. In the present study, two sizes of the white-leg shrimp (4—6 cm TL and 10—11 cm TL) from the nursery of Shanghai Ocean University were investigated. The experiment was conducted in 2 glass tanks (4 cm×28 cm×30 cm) which were shaded. In addition, there were two controllable underwater lights of 10W in each tank. One underwater camera and one hydrophone were fixed in each tank. The hydrophone was 20 cm away from the top and connected to an SM4 recorder. Prior to the experiment, the controlled underwater light and the underwater camera (turned on before placing the water) are placed in the desired location. For each measurement, individual white-leg shrimp was used and acclimated for 40—60min under the dark prior to measuring. Sounds were recorded for 10 minutes after the lights were switched on (a timer controlled the time). Meanwhile, the behaviors of the white-leg shrimp were captured by the underwater camera. The results showed that the main peak frequency of the acoustic signals was about 250 Hz, and the secondary peak appeared near 425 Hz produced by the small white-leg shrimp during fast swimming. The primary peak frequency of acoustic signals was 70 Hz, and the secondary peak was 15 Hz produced by the large shrimp. Further, the center frequency and frequency range of the acoustic signals of the tail flick was significantly different from that of the fasting swimming. We also collected a signal of tail flick from the white leg shrimp in the shrimp pond. The energy range of the signal was 0.5—6 kHz. The energy frequency range was 1—4 kHz, and the maximum concentrated energy frequency was about 2 kHz. Different from the laboratory's results, the main peak frequency of the signal was about 1.8 kHz, and there was a main secondary peak of about 250 Hz. In comparison to the laboratory data, the pond background noise and the sound produced by the white-leg shrimp during fast swimming were low-frequency signals. The frequency of the signal by tail-flick of the white-leg shrimp was higher than the background noise. The signal duration in the pond and laboratory was about 0.01s, and the frequency distribution of the energy was concentrated at 2—3 kHz. In summary, we studied the fast swimming sound production by two size white-leg shrimp. In the future, the tail flick sounds produced by shrimps of different conditions need further study, which is essential to utilizing sound information for monitoring shrimp health.

**Key words:** Fast swimming; Acoustic signal; Information utilization; *Litopenaeus vannamei*