引用格式: 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. [ZHANG Lizhen, LU Tianchen, YANG Jiaqing, et al. Analysis on sound characteristics of Penaeus vannamei before and after feeding[J]. Technical Acoustics, **39**(4): 413-418.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.04.005

南美白对虾进食前后发声信号特点分析

张丽珍[1], 陆天辰[1], 杨加庆[1], 胡庆松[1], 曹正良[2]
(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 为了探索南美白对虾进食前后发声信号特点和规律, 首先进行了养殖虾塘环境下的实验, 利用水听器与采集器采集信号; 然后利用 Matlab 软件对信号进行频谱分析和时频分析, 得到南美白对虾的发声信号规律。实验证明, 在淡水养殖环境下, 南美白对虾产生的声信号具有一定的规律, 一般情况单个脉冲信号时长为 0.005 s, 主峰频率在 2～10 kHz 之间, 投饵后主峰频率有所扩大, 约在 5～15 kHz 之间。投饵后南美白对虾随着咀嚼活动的展开产生的信号增多, 并且时频域特征明显与投饵前不同。该实验结果为利用南美白对虾产生的信号来控制投饵机实现按需投饵提供了可能。

关键词: 养殖塘; 南美白对虾; 发声信号; 频谱分析
中图分类号: TB561 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3630(2020)-04-0413-06

Analysis on sound characteristics of Penaeus vannamei before and after feeding

ZHANG Lizhen[1], LU Tianchen[1], YANG Jiaqing[1], HU Qingsong[1], CAO Zhengliang[2]
(1. *College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*;
2. *College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*)

Abstract: In order to explore the vocal characteristics and regularity of Penaeus vannamei feeding, the experiment is carried out under the environment of cultured shrimp pond, and the hydrophone and collector are used for acquiring signal. The spectrum analysis and time-frequency analysis of the signal are performed by Matlab software to obtain the regularity of Penaeus vannamei vocalization. Experiments show that in the freshwater aquaculture environment, the acoustic signals produced by Penaeus vannamei have certain regularity. The duration of a single pulse signal is 0.005 s and the frequency of the main peak is between 2～10 kHz. After feeding bait, the main peak frequency is expanded to about 5～15 kHz and the signals produced by the Penaeus vannamei increase with the spread of chewing activity, which makes the time-frequency domain characteristics of the signal significantly different before and after feeding. The result of this experiment shows the possibility of using the signal generated by Penaeus vannamei to control the feeding machine for on-demand feeding.

Key words: farming pond; Penaeus vannamei; sound generation; spectrum analysis

0 引 言

虾类是我国的主要水产品之一, 20 世纪 80 年代对虾养殖业开始迅速发展[1-2], 并由个人养殖模式发展为工厂化养殖模式。为了适应当前养殖虾塘向节能、环保、精准、高效的生产方式发展的需求, 自动投饵设备已经逐步成为节省劳力以降低成本、精准投喂并节约饲料、保护水质促进虾类健康生长的关键环节。一般较好的方法是通过掌握对虾的摄食行为进而实现投饵自动化控制。

收稿日期: 2019-05-23; **修回日期:** 2019-07-17
基金项目: 上海市科技兴农项目(2019-02-08-00-10-F01117)、上海市虾类产业技术体系建设(沪农科产字(2014)第 5 号)资助项目。
作者简介: 张丽珍(1967－), 女, 江苏无锡人, 博士, 教授, 研究方向为渔业机械系统。
通讯作者: 曹正良, E-mail: zlcao@shou.edu.cn

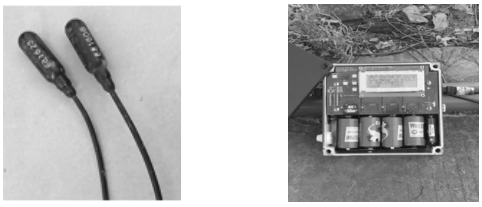
据研究表明, 虾的声音信号可由口器产生[3], 文献[4]中发现南美白对虾产生的宽带脉冲信号(频率为 2～8 kHz)主要与进食有关, 并且虾的发声波形具有一定的规律。但国内大多数圈养南美白对虾都通过驯化来适应内陆淡水, 其进食生理状态以及环境等都可能导致发声信号的特点有很大变化。因此本文借助 Matlab 软件, 搭建对虾声音信号提取与识别系统, 能够对淡水养殖环境下南美白对虾进食前后的发声信号进行时、频域分析, 目的是为对虾的自动化投饵机设计和病害预测评估等提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

养殖虾塘水下声音采集所用的装置是 SM2 型声音记录仪, 包括两只 HTI 圆柱型水听器和带有数

据储存 SD 卡的数据采集器，如图 1(a)和 1(b)所示。水听器具有较宽的带宽，数据采集器可设置数据采集时间及采样频率等，这里根据水听器前置放大滤波(频带响应范围约在 30 kHz 以下)，采样频率人工设置为 96 000 Hz，储存格式为 WAV，声音分析软件为 Matlab 软件。



(a) 水听器 (b) 数据采集器

图 1 数据采集装置

Fig.1 Data acquisition device

1.2 实验环境

为了对南美白对虾在淡水养殖下的信号进行采集并且避免采集信号的偶然性，分别在 3 处不同的池塘中进行对虾信号的采集，3 个采集池塘分别依次记为 A、B、C 环境。水产养殖基地的养殖虾塘均为 6 亩(1 亩≈666.67 m^2)左右的室外大塘，南美白对虾亩产 400～500 斤(1 斤=0.5 kg)，所养殖的南美白对虾均被淡水驯化过。实验中将两只水听器悬吊于废旧的小船两侧，两个水听器入水约为 40 cm(水深约 80 cm)、水平距离约为 1 m，传感器与岸边的距离约为 3 m；数据采集器放置在岸边，由电缆与水听器连接。实验布局如图 2 所示。



图 2 实验布局图

Fig.2 Experimental layout

在南美白对虾的成虾阶段进行数据采集，从投饵前 1 h 开始记录，直到投饵结束后 1 h 停止记录。根据虾通过外骨骼摩擦产生的“噼啪”声，选取录音文件中的有效信号，进行分析比较。

1.2 信号处理方法

通常对时间序列信号通常采用傅里叶变换，通过信号中不同频率成分的分析可以掌握信号特征。式(1)是数学中定义的离散时间傅里叶变换对[5]：

$$\begin{cases} x(n)=\dfrac{1}{2\pi}\int_{2\pi} X(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega})\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega n}\mathrm{d}\omega \\ X(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega})=\sum\limits_{m=-\infty}^{+\infty} x(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega n} \end{cases} \tag{1}$$

在 Matlab 软件中，可以利用式(2)进行快速傅里叶变换计算[6]：

$$Y=\mathrm{fft}(x,n) \tag{1}$$

根据式(2)的短时傅里叶变换以及时窗移动叠加，可以计算信号的时频分布特征，即信号的声谱图。也可以利用 SM2 型声音记录仪所提供的分析软件进行处理。

2 分析对比

国外学者已发现南美白对虾产生的宽带脉冲信号相似且与进食有关。根据国外学者的研究，南美白对虾产生的信号类似于“噼啪”声，信号频率在 4～12 kHz 之间。但由于 Berk 等[7]采集的信号来自盐水环境下生长的南美白对虾，目前暂无研究表明淡水驯化是否对南美白对虾发出的脉冲信号产生影响，所以该实验的首要任务是证明南美白对虾在国内淡水驯化后所产生的信号依旧有一定的规律。

为了对上述假设进行验证，在 A、B、C 三处环境下进行了投饵前后的声音数据的采集。池塘养殖环境下采集到的有效数据主要由虾活动产生的声音以及环境噪声组成，噪声主要来自增氧泵，对虾发声采样时需关闭增氧泵，减少噪声来源。在获取实验数据后，首先对数据进行预处理，通过 Matlab 软件对南美白对虾的发声信号进行时频分析和特征提取。

2.1 投饵前后南美白对虾信号频谱分析

A、B、C 三处环境中采集到的投饵前后数据通过 Matlab 软件转换得到声强幅值图，在投饵前后的频谱分析中，A、B、C 三处环境下，首先通过 Matlab 软件截取每个虾塘投饵前后共 6 min 的数据，其次在 6 min 的数据里，按投饵机开启与关闭的时间，分别截取数据段时长为投饵机打开前 2 min，及投饵机投饵完成关闭后 2 min，2 段共 4 min 数据进行比较。图 3～5 分别展现了 A、B、C 三处各目标虾塘投饵前 2 min 以及投饵机关闭后 2 min 的采集数据。

在实验中，自动投饵是人为的确定信息，可以作为参考。已有研究[8]对声音信号的分析与比较得出：被动听声可以获取南美白对虾的摄食发声，并与其它噪声特征有明显差别、能够区分。这里对三个虾塘情况给予具体分析。由单个对虾产生的“毛刺”信号时域波形与国外学者所获取的“噼啪”信号相似，具有一定的周期规律。

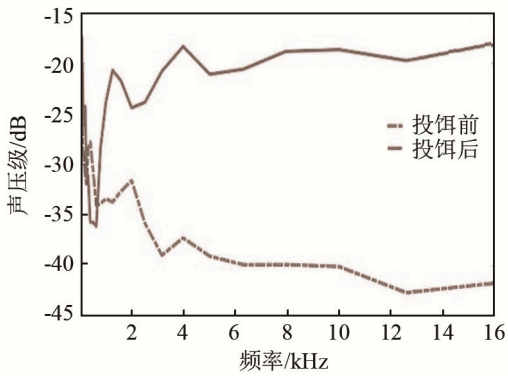


图 3　A 环境下南美白对虾进食前后声频谱图

Fig.3　Sound spectrums of Penaeus vannamei before and after feeding in A environment

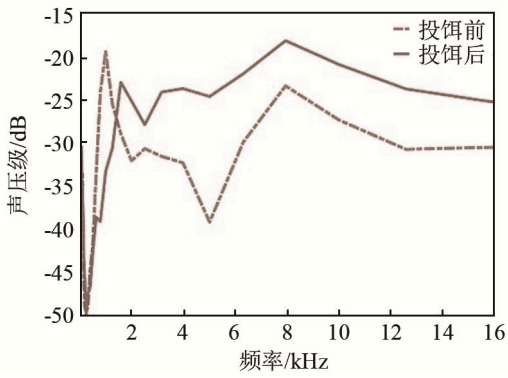


图 4　B 环境下南美白对虾进食前后声频谱图

Fig.4　Sound spectrums of Penaeus vannamei before and after feeding in B environment environment

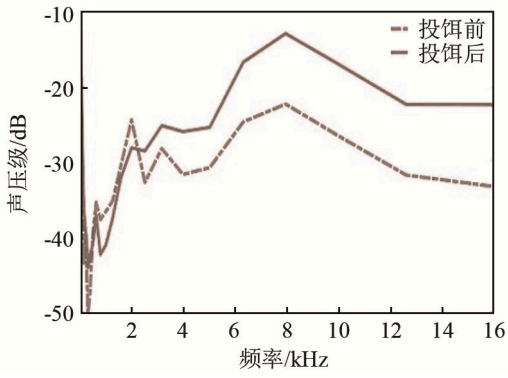


图 5　C 环境下南美白对虾进食前后声频谱图

Fig.5　Sound spectrums of Penaeus vannamei before and after feeding in C environment

如图 3 所示，A 环境下投饵前数据整体声压较小，相对声压级在–30～ –40 dB 之间，图 3 中 2 kHz 前高于投饵前 1 kHz 处较高，出现峰值；投饵后，在主峰值频率 2 kHz 以上强度有较大增加，声强幅度提高约至–25～ –20 dB，在 1 kHz 以下，强度降低，低于投饵前。

B 环境下投饵前后声强幅值曲线如图 4 所示。投饵前 1.5 kHz 与 8 kHz 处出现两处较明显的峰值，5 kHz 处声压幅值较低；投饵后 2 kHz 以下强度降低，低于投饵前，同时 2 kHz 以上强度升高，8 kHz 处出现峰值。

从图 5 中可以看出，C 环境下投饵前 2 kHz 频率处声压级幅值较高，投饵后在频率 2～6 kHz 范围内，声压级开始上升，同时 8 kHz 处开始下降频率声强幅值下降，同 A、B 两处虾塘相似。

通过 A、B、C 三个实验塘投饵前后各个频率声音强度幅值对比可以发现，投饵后频率 2～8 kHz 处声压级幅值明显提高，此处频率与南美白对虾发声信号的频率吻合。由此可见，南美白对虾在进食过程中产生的信号较多。

2.2　投饵前后 1 min 内南美白对虾发声时频谱分析

为了分析虾群在进食前后产生信号强度幅值变化的原因，利用 Matlab 软件中的快速傅里叶变换对 B、C 环境下采集的声音信号进行处理，生成信号时频声谱图。B 环境下投饵前 1 min 的波形与频谱图分别如图 6、图 7 所示，投饵后 1 min 的波形与频谱图分别如图 8、图 9 所示。

从图 6、8 中可以看出，在投饵前毛刺信号较少，整体强度弱。在投饵开始后毛刺信号开始增多，信号强度增加。对比频谱图发现，在投饵开始后至投饵结束前，4～12 kHz 频率处信号增多、增强，此频率区域与南美白对虾产生的信号频率重叠，在

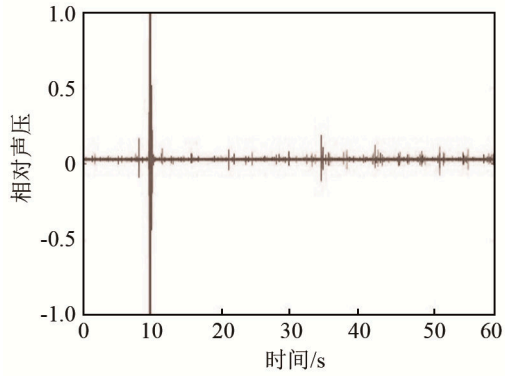


图 6　B 环境下投饵前 1 min 内的波形图

Fig.6　Sound waveform in 1 min before Penaeus vannamei feeding in B environment

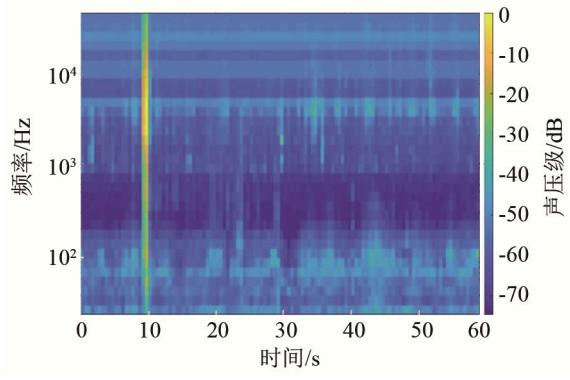


图 7　B 环境下投饵前 1 min 内的声谱图

Fig.7　Spectrogram in 1 min before Penaeus vannamei feeding in B environment

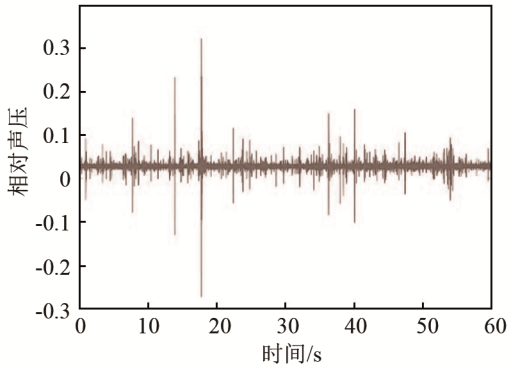


图 8 B 环境下投饵后 1 min 内的波形图

Fig.8 Sound waveform in 1 min after Penaeus vannamei feeding in B environment

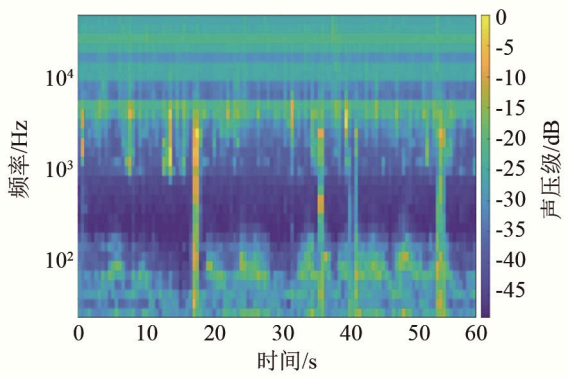


图 9 B 环境下投饵后 1 min 内的声谱图

Fig.9 Spectrogram in 1 min after Penaeus vannamei feeding in B environment

排除低频的投饵机噪声后，判断处于 4～12 kHz 频段范围的毛刺信号为南美白对虾产生的信号。

C 环境下采集到的南美白对虾进食前后 1 min 波形与频谱图如图 10～13 所示。

同 B 环境下图像显示结果相似，波形图显示投饵前毛刺信号较少，投饵后毛刺信号增多，并且从频谱图上来看，频率 8 kHz 处的声压级增大，排除人为干扰和自然噪声，判断此区域处于 8～12 kHz 频率范围的毛刺信号为南美白对虾产生的信号。由此判断 B、C 两虾塘在投饵后虾群进食活动所产生的

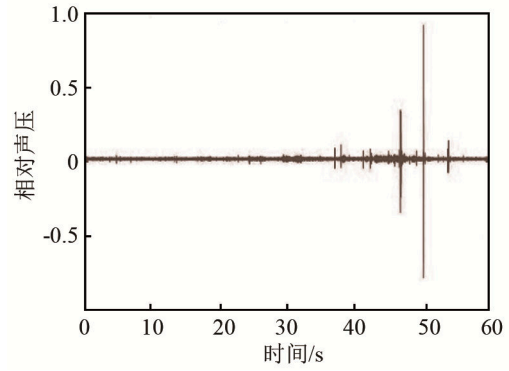


图 10 C 环境下投饵前 1 min 内的波形图

Fig.10 Sound waveform in 1 min before Penaeus vannamei feeding in C environment

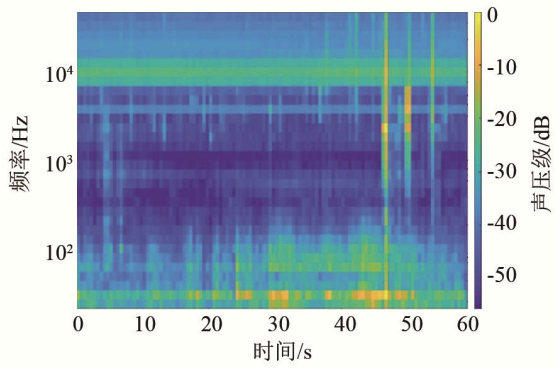


图 11 C 环境下投饵前 1 min 内的声谱图

Fig.11 Spectrogram in 1 min before Penaeus vannamei feeding in C environment

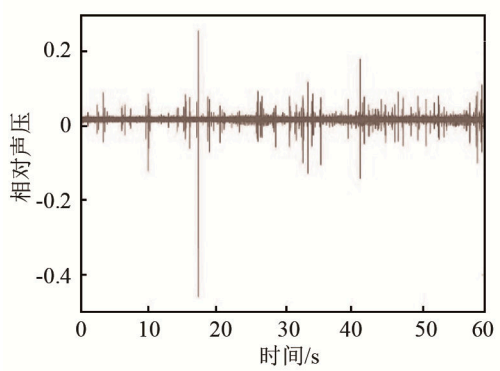


图 12 C 环境下投饵后 1 min 内的波形图

Fig.12 Sound waveform in 1 min after Penaeus vannamei feeding in C environment

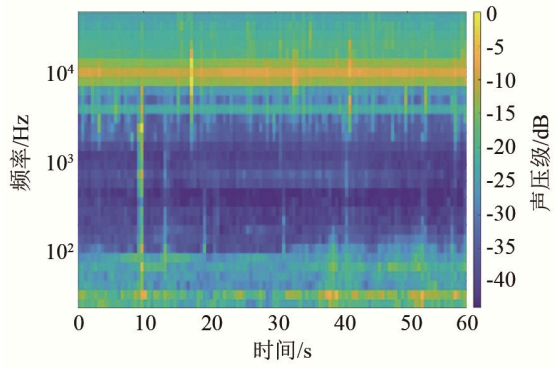


图 13 C 环境下投饵后 1 min 内的声谱图

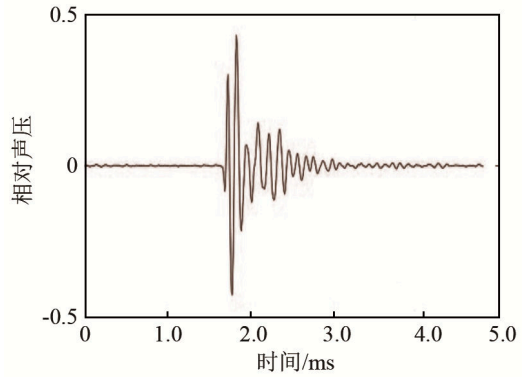
Fig.13 Spectrogram in 1 min after Penaeus vannamei feeding in C environment

信号次数大幅度增加，信号频率在 8～12 kHz 之间。

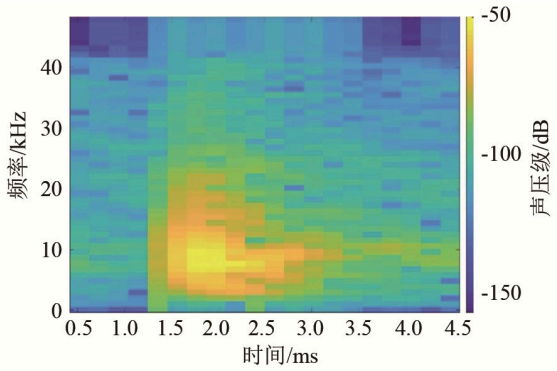
2.2 投饵前后南美白对虾单个发声信号波形、频谱分析

在分析了进食前后南美白对虾发声信号的变化外，还对 C 环境下投饵前、中、后三个阶段单独的南美白对虾发声信号进行时频域分析。对投饵前后波形图中出现的毛刺信号进行分析对比，如图 14～16 所示。

通过对进食前后的单个发声波形对比，进食前的发声波形更规则平稳，进食后虾的发声信号开始



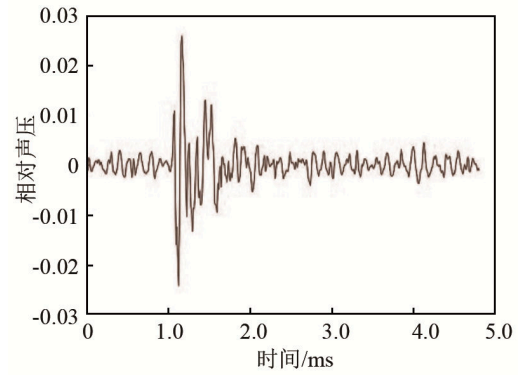
(a) 进食前发声波形图



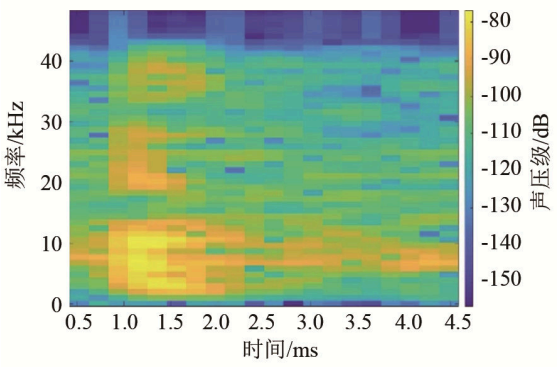
(b) 进食前发声声谱图

图 14　南美白进食前对虾发声波形、声谱图

Fig.14　Sound waveform and spectrogram of Penaeus vannamei before eating



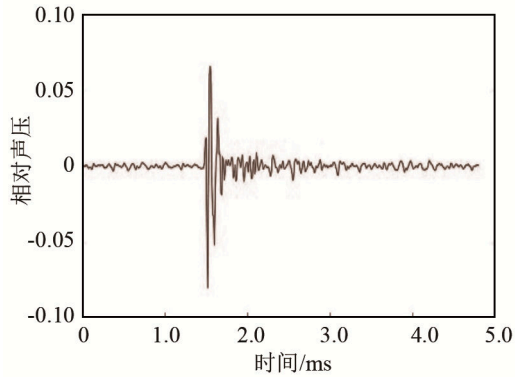
(a) 进食时发声波形图



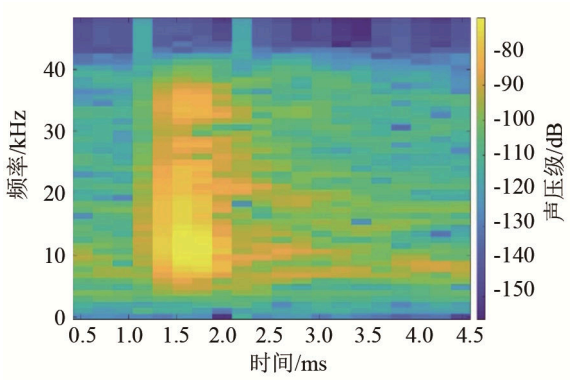
(b) 进食时发声声谱图

图 15　南美白对虾进食时发声波形、声谱图

Fig.15　Sound waveform and spectrogram of Penaeus vannamei when eating



(a) 进食后发声波形图



(b) 进食后发声声谱图

图 16　南美白对虾进食后发声波形、声谱图

Fig.16　Sound waveform and spectrogram of Penaeus vannamei after eating

发生波动，有略微失真，但信号时长均在 5.0 ms 之内。投饵前后信号频率域并没有明显改变。通过 B、C 两处实验水域的信号对比初步判断，淡水驯化后的南美白对虾在投饵前后产生的信号不同，并且虾群在投饵后产生信号的频率增大。

2.3　投饵前后南美白对虾发声主峰频率统计分析

在得到南美白对虾进食前、后发声信号波形与声谱图后，对三处虾塘总计 3 813 个南美白对虾发声信号单独进行傅里叶变换，得到了频谱图并提取主峰频率，发声信号频谱图与主峰频率如图 17 所示。

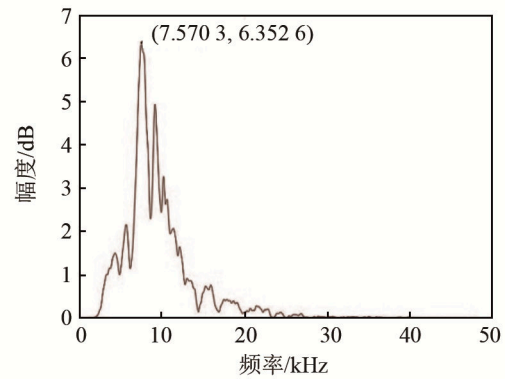


图 17　南美白对虾发声信号频谱图

Fig.17　Spectrum of Penaeus vannamei vocal signal

对 A 虾塘 3813 个发声信号主峰频率统计如表 1、图 18 所示。

表 1 A 塘南美白对虾进食前后发声的主峰频率统计

Table 1 Statistics of main peak frequency of the Penaeus vannamei vocal signal in A Pond before and after eating

时间段	主峰频率/kHz	
	平均值	标准差
投饵前	4.123	2.863
投饵后	10.031	5.461

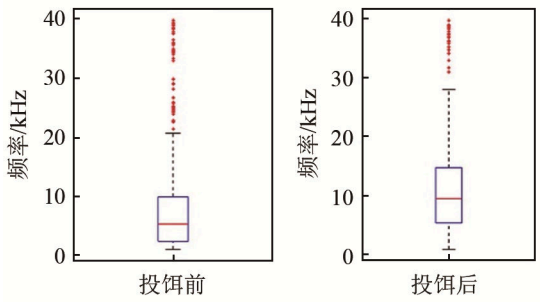


图 18 南美白对虾进食前后发声信号的主峰频率变化

Fig.18 Main peak frequency change of Penaeus vannamei vocal signal before and after eating

由图 18 可以看出，南美白对虾发声信号在投饵前频率范围主要在 2～10 kHz，同时投饵后频率范围主要在 5～15 kHz 之间。频率区间同上文得到结论一致，所以判断南美白对虾在进食的发声信号主峰频率与投饵前有明显区别。

3 结 论

此次实验基本确定了南美白对虾在盐水水域与淡水水域具有同样的发声特征。同时淡水驯化后圈养的南美白虾产生的信号在投饵前后有一定的区别。首先，投饵后南美白对虾进食活动加剧，发声信号次数明显增多，在停止投饵后一段时间后逐渐减少。通过对发声信号主峰频率的统计分析表明：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 之间，即南美白对虾发声信号主峰频率在进食前及其后有明显区别。南美白对虾投饵前、后产生信号的差异性这一特点为通过声音信号来控制投饵系统提供了可能。

实验时虾塘中水的能见度很低，无法观察或记录对虾的行为，进一步的工作需要利用实验室声学听测系统，并与水生动物行为学结合研究。同时，确定南美白对虾的饱食信号与进食信号的差异性也是下一步即将进行的工作。

参 考 文 献

[1] 王志宏, 翟凤英, 王惠君, 等. 家庭收入水平对我国城乡居民食物消费的影响[J]. 中国食物与营养, 2015, **21**(3): 46-49.
WANG Zhihong, ZHAI Fengying, WANG Huijun, et al. Influence of household income level on food consumption in Chinese population[J]. Food and Nutrition in China, 2015, **21**(3): 46-49.

[2] 孙瑞杰, 李双建. 世界海洋渔业发展趋势研究及对我国的启示[J]. 海洋开发与管理, 2014, **31**(5): 85-89.

[3] 牟钰清, 林亚男, 张树永. 枪虾攻击过程的物理化学原理辨析[J]. 化学通报, 2016, **79**(7): 672-675.
MU Yuqing, LIN Yanan, ZHANG Shuyong. Analysis of the physical chemistry principles of the strike process of snapping shrimp[J]. Chemistry Bulletin, 2016, **79**(7): 672-675.

[4] HUNT M J, WINSOR H, ALEXANDER C G. Feeding by penaeid prawns: the role of the anterior mouthparts[J]. Journal of Experimental Marine Biology&Ecology, 1992, **160**(1): 33-46.

[5] 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.

[6] OPPENHEIM A V, WILLSKY A S, HAMID NAWEB S. 信号与系统(原名：Signals and Systems)[M]. 2 版. 刘树棠, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 254-257.

[7] 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]. J. Acoust. Soc. Am., 1996, **99**(4): 2533-2574.

[8] 曹正良. 南美白对虾养殖虾塘中水下声景的应用研究初探[C]//中国声学学会水声学分会 2019 年学术会议论文集, 2019.