

DOI: 10.12131/20250002

文章编号: 2095-0780-(2025)03-0064-08

## 养殖大黄鱼摄食颗粒饲料的声学行为特征

王晓萌<sup>1,2</sup>, 刘晃<sup>1</sup>, 张成林<sup>1</sup>, 徐金铖<sup>1</sup>

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:** 近年来, 中国在深远海大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 养殖方面取得显著成效, 不仅产量提升, 品质也明显改善。但受台风、强海流等自然灾害的影响, 投喂工作面临挑战。为促进大黄鱼深远海养殖技术的进一步发展, 以初始体质量为  $(122.62 \pm 11.08)$  g、体长为  $(17.9 \pm 1.04)$  cm 的大黄鱼为实验对象, 利用水下声音测量系统 (带宽 20 Hz~20 kHz) 记录了大黄鱼的水下声音和行为反应。结果表明: 大黄鱼的摄食声信号可分为仅吞食和吞食+咀嚼 2 种类型; 吞食和咀嚼声的频率主要集中在 6~13 kHz 范围内; 投饵前, 大黄鱼的发声信号极少, 而投饵后发声信号数量显著增加; 在 1 个摄食周期内, 单尾大黄鱼表现出 4~7 次摄食行为, 其中仅吞食行为较少; 吞食行为通常伴随 1~2 个脉冲的发声, 单脉冲持续时间较短, 双脉冲持续时间较长, 信号持续时间介于 0.05~0.25 s, 产生的平均声压级约为  $(74.51 \pm 3.91)$  dB; 咀嚼行为则以 5~7 次居多, 且咀嚼强度从  $(73.27 \pm 2.62)$  dB 逐渐减至  $(55.82 \pm 1.43)$  dB。此外, 随着摄食次数的增加, 大黄鱼的摄食持续时间显著延长, 两者呈线性正相关。

**关键词:** 大黄鱼; 摄食行为; 声信号; 深远海养殖

中图分类号: S 968.1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on large yellow croaker's pellet feed behavior using acoustic signals

WANG Xiaomeng<sup>1,2</sup>, LIU Huang<sup>1</sup>, ZHANG Chenglin<sup>1</sup>, XU Jincheng<sup>1</sup>

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:** In recent years, China has achieved remarkable achievement in deep-sea aquaculture of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*), not only in terms of production, but also in terms of quality. Nevertheless, feeding operations are affected by natural calamities such as typhoons and powerful ocean currents. Therefore, to further improve the technological development of *L. crocea* culture in deep sea, we used the fish with an initial body mass of  $(122.62 \pm 11.08)$  g and a body length of  $(17.9 \pm 1.04)$  cm as samples, then applied an underwater acoustic measurement system (Bandwidth of 20 Hz~20 kHz) to capture the underwater sound and observe the behavioral responses of the fish. The results indicate that the feeding sound of the fish could be distinctly classified into two types: pure swallowing and swallowing accompanied by chewing. Both swallowing and chewing produced sound mainly within the frequency of 6 Hz~13 kHz. Prior to feeding, the acoustic signals emitted by the fish were relatively sparse. However, when the feeding began, the number of acoustic signals increased significantly. In a single feeding cycle, an individual fish exhibited 4~7 feeding behaviors, with pure swallowing being relatively infrequent. Swallowing was usually accompanied by 1~2 pulsed acoustic signals. Single pulses had a shorter duration, while double pulses had a longer one. The duration of these signals ranged from 0.05 to 0.25 sec, and the average sound pressure level generated was approximately

收稿日期: 2025-01-03; 修回日期: 2025-01-24

基金项目: 青岛海洋科技中心山东省专项经费 (2022QNLM030001)

作者简介: 王晓萌 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为鱼类行为学。E-mail: zhuxijiangtou@163.com

通信作者: 刘晃 (1973—), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为水产养殖工程。E-mail: liuhuang@fmri.ac.cn

( $74.51\pm3.91$ ) dB. When chewing, the fish most commonly produced 5–7 chews, with the chewing intensity gradually decreasing from ( $73.27\pm2.62$ ) to ( $55.82\pm1.43$ ) dB. Furthermore, as the number of feeding behaviors increased, the foraging duration of the fish also extended significantly, displaying a linear positive correlation.

**Keywords:** *Larimichthys crocea*; Feeding behavior; Acoustic signals; Deep-sea aquaculture

随着近岸及陆基养殖空间日益受限,以及环境污染对水产品产量与质量的双重制约,渔业正逐步向深远海领域拓展,以寻求突破性发展<sup>[1-3]</sup>。在这一背景下,养殖工船作为一种新型深远海养殖装备,凭借其安全、高效与环保的特性,已成为中国海水鱼类深远海养殖的核心策略<sup>[4-6]</sup>。然而,深远海养殖的成功实施依赖于精准的饲料管理,即根据鱼类需求调整投饲量并最大限度地减少浪费。因此,识别与采食量直接相关的信号成为该领域的重点研究方向。

由于直接视觉观察难以确定捕食活动的强度,声学技术提供了一种可行的替代方案。研究表明,水生动物在摄食、咀嚼过程中均会发出特定声音,这些声音可作为摄食活动的有效指示信号。魏翀等<sup>[7]</sup>发现大黄鱼(*Larimichthys crocea*)觅食时产生单脉冲声信号,而在繁殖期则表现为多脉冲; Peixoto 等<sup>[8]</sup>指出,饲料长度的增加会导致声信号数量增多,但单个信号的声学参数不变。基于声学技术的摄食监测方法已在水产养殖中得到广泛应用。通过分析养殖生物的摄食声学信号,研究人员能够建立声学特征与饲料消耗量之间的关系,从而实现精准投喂。Zhou 等<sup>[9]</sup>利用被动声学系统实现了水产养殖系统中鱼类喂食的自动化控制; Wei 等<sup>[10]</sup>针对特定规格的凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*),分析了其摄食声信号的频域与时域特征,并建立了与饥饿程度之间的相关性模型; Mallekh 等<sup>[11]</sup>通过监测大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)的摄食声音,确定了声能和饲料消耗率之间的定量关系。

大黄鱼俗称鼓鱼或鸣鱼,是一种重要的海洋经济鱼类,因其生长速度快、环境耐受广、营养价值高以及市场接受范围广等优势,已成为中国海水养殖产量最高的鱼类<sup>[12]</sup>。2023年,中国大黄鱼产量达到32.06万吨,较2022年增长2.58万吨。作为高经济价值且需求广泛的养殖品种,大黄鱼对养殖环境的要求极为严格。在国家海洋强国战略的推动下,深远海养殖模式与养殖工船的协同应用迅速发展,为养殖大黄鱼等海洋生物创造了更为广阔且适

宜的自然生长条件<sup>[13-15]</sup>。凭借养殖工船这一先进装备,大黄鱼被引入了远海,不仅获得了更宽敞的生存空间,还通过船上搭载的水质优化系统、水流增强装置等高科技手段,实现了健康快速生长<sup>[16]</sup>。与传统的近岸网箱养殖相比,深远海养殖模式通过养殖工船的部署,有效解决了水域狭窄和养殖密度过高导致的鱼类活动受限问题,极大地提升了养殖大黄鱼的品质与风味,使其更接近野生状态,还大幅改善了鱼类的生存福利<sup>[17]</sup>。

作为石首科鱼类的代表物种,大黄鱼具有独特的发声行为,这一行为对其生存至关重要<sup>[18]</sup>。研究表明,大黄鱼的发声与其繁殖、领地划分、觅食及游动等活动密切相关。在不同的生活场景中,如觅食、繁殖、识别同类或遭遇惊吓时,大黄鱼会发出不同的声信号,这些声音不仅是种内交流的重要媒介,更在其社会行为和生态互动中发挥着不可替代的作用<sup>[19]</sup>。基于此,研究人员提出了通过监测鱼类摄食声来优化投饲策略的新思路。早在1979年,齐孟鹗等<sup>[20]</sup>就开创性地开展了大黄鱼发声的记录与分析研究,为该领域奠定了早期基础;随后,许兰英和齐孟鹗<sup>[21]</sup>进一步分析了大黄鱼的声谱特征,并探讨了其在不同海域中的声学表现,揭示了大黄鱼发声行为的多样性和地域性差异。此外,殷雷明等<sup>[22]</sup>利用先进的水下声音测量技术,对网箱养殖环境下的大黄鱼进行了系统的水下声音和行为反应记录。通过频谱分析和声压级计算,发现大黄鱼摄食发声的主要峰值集中在800 Hz附近,且摄食噪声的频谱范围较广,介于20~2 200 Hz之间。这些研究成果不仅证实了大黄鱼发声与行为反应之间的密切关联,还揭示了摄食发声在频率与强度上的独特特征。然而,现有研究主要聚焦于大黄鱼群体层面的发声现象分析,对个体摄食过程中的吞食与咀嚼行为的声学特征,仍缺乏深入探讨,这成为当前研究领域的一个重要局限。

为评估大黄鱼的摄食行为特征,本研究系统探讨了其发声机制及相关声学变量。通过揭示大黄鱼摄食声音的产生机制和声学特征,不仅深化了对大黄鱼行为习性的科学认知,还为深远海工船养殖大

黄鱼的高效自动化监测系统开发提供了理论依据，有助于提升养殖效率与产品质量。此外，研究成果还可为大黄鱼智能投饲系统的研发提供重要参考，为实现精准化、实时化的按需投喂奠定了技术基础，对推动养殖管理的智能化和精细化发展具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验对象和装置

声信号采集地点为江苏省南通市如东县渔业机械仪器研究所中试基地鱼类行为观测平台。试验所用大黄鱼均采购于宁波象山港湾水产有限公司，饲养于直径 2.00 m、高 1.15 m、水深 0.80 m 的圆形养殖池中，养殖水温为 23~28 °C，溶解氧质量浓度保持在 4.0~6.5 mg·L<sup>-1</sup>，pH 7.8~8.5，盐度为 28‰~32‰，池中配有小型循环水处理系统。试验用大黄鱼 50 尾，初始体质量 (122.62±11.08) g、体长 (17.9±1.04) cm，所有鱼均来自同一养殖群体，以确保遗传背景的一致性。

采用声像同步方法记录大黄鱼的每次摄食过程，录像设备采用大疆 Osmo Action 3 运动相机 [视场角：155°；光圈：f/2.8；电子快门速度：1/8 000 s 至帧率限制快门；普通录影：1 080 p (16 : 9)；1 920×1 080@100/120/200/240 fps；视频格式：MP4 (H.264/HEVC)]；录音设备主要为 AquaSound 水听器测量系统 (水听器型号：AQH-020；频率范围：20 Hz~20 kHz；前置放大器型号：Aquafeeler IV；增益控制：20~70 dB，日本京都大学信息学研究院；Roland QUAD-CAPTURE 外置声卡：UA-55，台湾乐兰企业股份有限公司)。本研究中，录音采样频率设定为 96 kHz，采样精度为 16 bit，采样通道为单通道，增益为 50 dB。随后将运动相机安装在养殖池上方，用于记录大黄鱼的摄食和行为活动；同时将水听器置于养殖池中，用于采集大黄鱼摄食过程中产生的声音信号。水听器通过声卡和前置放大器与计算机连接，从而实现对声音信号的实时记录和分析 (图 1)。

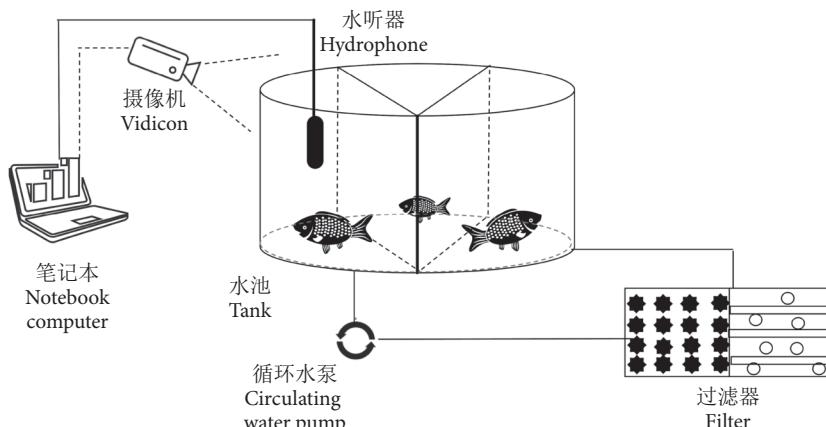


图1 音视频信息采集系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of audio and video information collection system

### 1.2 试验方法

大黄鱼每天于 9:00 和 19:00 各投喂 1 次，每次投喂量为其体质量的 3%~4%。所用饲料为宁波天邦饲料科技有限公司生产的硬颗粒浮性饲料，主要成分的质量分数为：粗蛋白 45.3%、粗脂肪 9.3%、粗灰分 12.6%、钙 2.1%、磷 1.9%，赖氨酸 3.4%，颗粒直径为 4~6 mm。饲料以进口白鱼粉、大豆类蛋白 (去皮豆粕、大豆浓缩蛋白、发酵豆粕) 等为主要蛋白源，以鱼油、豆油等为主要脂肪源，蛋白能量比为 39.2 mg·kJ<sup>-1</sup>。

在正式采集声信号之前，为了确保试验个体状

态尽可能稳定，先将大黄鱼暂养 2 周。由于在声信号采集过程中循环水系统可能会造成较大干扰，导致信号不稳定，因此在采集声信号时关闭循环处理系统，以确保背景噪声的稳定性。首先录取约 3 min 未投喂状态下试验池的声音信号，作为后期处理时的背景噪声；随后连续记录养殖池内的大黄鱼在摄食时发出的声音。每次试验约持续 1 h，采集到的音频数据以 .wav 格式保存在电脑上，视频以 .mp4 格式保存在存储卡上。在后续的处理过程中，将摄像机记录的音轨替换为水听器的音频，以实现音频和图像的同步。

### 1.3 声信号处理

首先使用 Audition 2020 音频处理软件对声音文件进行回放和辨听, 随后利用其多轨模式对声像进行同步处理, 并结合声信号的波动与视频中的行为特征, 识别并标记摄食声信号, 同时观察声信号的变化波形。在音频数据采集过程中, 存在多种状态的声信号, 可分为有效声段(大黄鱼摄食声)和无效声段。通过视频辅助, 确定摄食波形并进行标记, 将有效声段切割并保存。根据获得的摄食音频分析, 大黄鱼每次吞食声信号的持续时间为 50~200 ms, 可通过 Adobe Audition 的频谱图清晰观察到吞食信号的能量变化, 确保每次吞食信号的完整性。声信号处理方法主要参考 Qi 等<sup>[23]</sup>的研究方法。

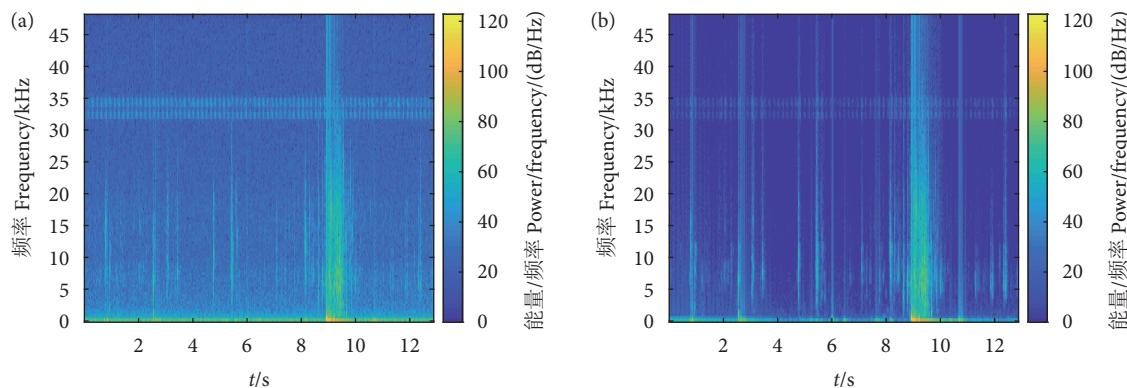


图2 降噪前后光谱图

注: a. 降噪前; b. 降噪后。

Fig. 2 Spectral graphs before and after noise reduction

Note: a. Before noise reduction; b. After noise reduction.

摄食序列时长是单条大黄鱼第  $n$  次摄食从张嘴到咀嚼停止所持续的时间 ( $n=1, 2, 3\dots$ ), 单位为 s。

### 1.4 数据处理

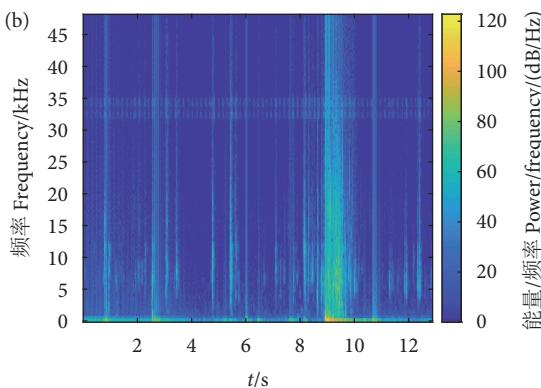
声音文件通过 Praat 软件进行回放辨听并记录音频中摄食声的声压级, 然后采用 Matlab R2019a 软件对音频进行快速傅立叶(FFT)转换并绘制频率图谱。

## 2 结果

### 2.1 大黄鱼吞食与咀嚼的声波特性分析

饲料投下后, 大黄鱼迅速从养殖池的中下层游至上层进行吞食。图 3 展示了大黄鱼吞食与咀嚼的频率及能量范围的变化。由图 3-a—3-b 可看出, 大黄鱼摄食时发出的声音频率主要集中在 6~13 kHz。通过观察大黄鱼咀嚼时的频率图(图 3-c—3-d), 可以清晰地看到其主要声能量同样集中在 6~13 kHz

所收集的声音信号包含噪音, 若直接使用会降低音频的准确性, 因此在分析前需进行降噪处理。由于大黄鱼养殖环境为车间, 背景噪声为恒定噪声, 可采用 Audition 2020 音频处理软件中的降噪功能进行处理。该功能主要通过 AI 识别音频中的噪声并建立“噪声指纹”来实现降噪。在动态识别和分析音频信号中的噪音时, 该功能还可调整降噪参数, 以最大限度地减少噪音的影响, 同时尽可能保留声音信号的品质。此外, 它能够去除多种噪声组合, 包括磁带嘶嘶声、麦克风背景噪声、电线嗡嗡声或其他波形中的恒定噪声。经过降噪处理后, 摄食声信号的信噪比可提高至 70 dB 以上, 降噪前后的结果如图 2 所示。



范围, 且峰值频率约为 7 kHz。

### 2.2 大黄鱼投饵前后发声信号变化及摄食周期内的声波特征

由图 4 可知, 投饵前大黄鱼的发声信号非常少, 而投饵后发声信号数量显著增加。1 个摄食周期中, 单尾大黄鱼表现出 4~7 次摄食行为, 其中仅吞食行为 2~4 次, 吞食+咀嚼行为 3~5 次。通过放大图 4 中的 2 个典型波形图可以观察到, 吞食时的声音通常包含 1~2 个脉冲, 持续时间在 0.05~0.25 s 之间。

### 2.3 大黄鱼吞食与咀嚼的发声次数、能量峰值及咀嚼脉冲强度变化趋势

养殖大黄鱼主要摄食行为包括吞食和咀嚼。对 1 次摄食脉冲的分析表明, 大黄鱼在每组脉冲中发出“咔嚓”声的次数为 2~15 次, 其中 5~7 次最为常见(图 5-a)。在吞食过程中, 大黄鱼的能量达

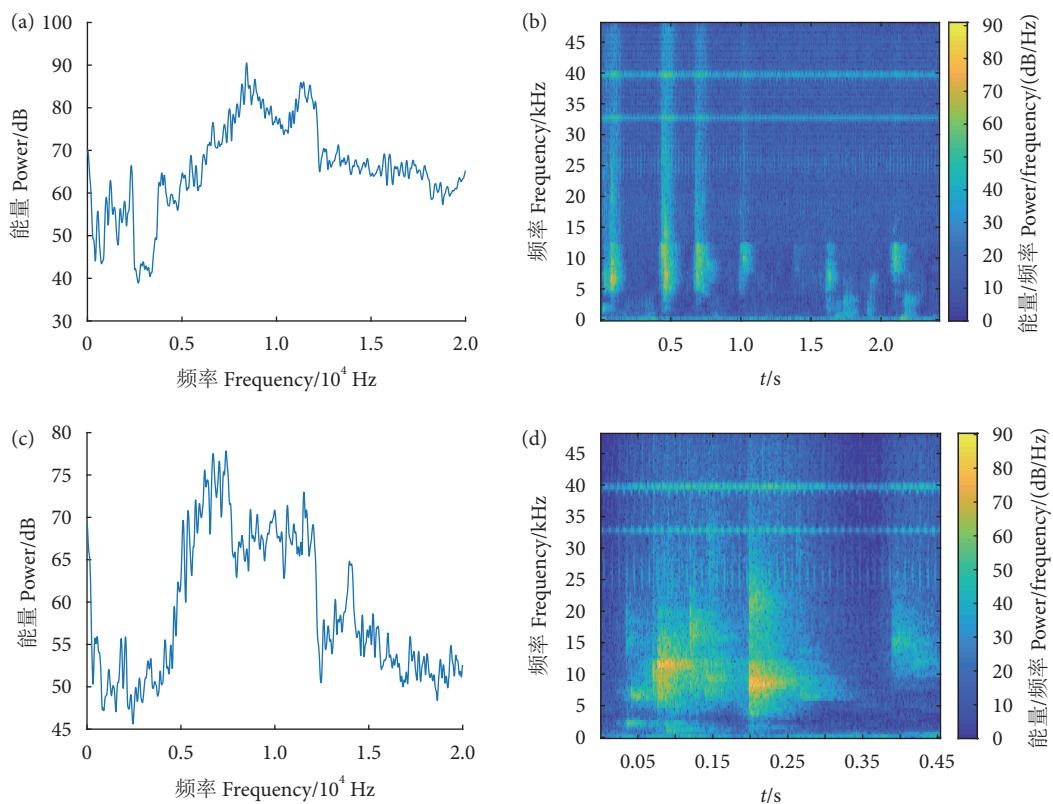


图3 大黄鱼摄食声学特征信号图

注：a. 大黄鱼吞食频率图；b. 大黄鱼吞食光谱图；c. 大黄鱼咀嚼频率图；d. 大黄鱼咀嚼光谱图。

Fig. 3 Acoustic characteristic signal graph of feeding behavior of *L. crocea*

Note: a. Frequency graph of swallowing by *L. crocea*; b. Spectrogram of swallowing by *L. crocea*; c. Frequency graph of chewing by *L. crocea*; d. Spectrogram of chewing by *L. crocea*.

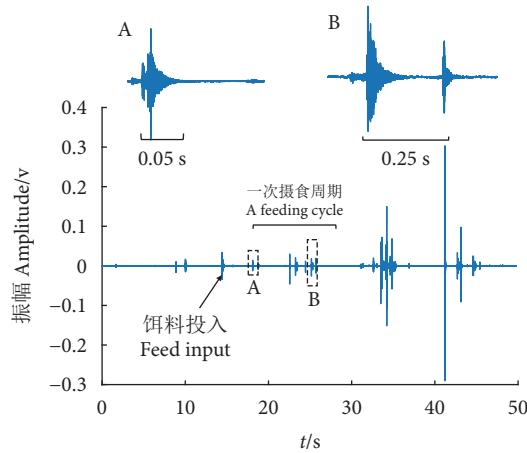


图4 大黄鱼摄食声学特征信号图

Fig. 4 Acoustic characteristic graph of *L. crocea*

到最高点，为 $(74.51\pm3.91)$  dB，而在咀嚼过程中，能量略有下降。由图5-a的波形图可以清晰地看到，咀嚼行为表现为连续的脉冲序列，每次咀嚼由单个脉冲组成，单个咀嚼脉冲的持续时间约为0.1 s。随着进食时间的推移，咀嚼振幅逐渐减小。对大量咀嚼脉冲使用 Praat 进行强度分析，结果显示平均声压级从 $(73.27\pm2.62)$  dB 逐渐降低至

$(55.82\pm1.43)$  dB。图5-b展示了大黄鱼在1次摄食行为中经历的5个咀嚼阶段的详细过程。

#### 2.4 大黄鱼摄食持续时间的特点分析

通过分析大黄鱼的摄食序列时长，并为其拟合线性回归方程，其中x轴为第n次摄食( $n=1, 2, \dots, 6$ )，y轴为摄食持续时间(图6)，可以发现大黄鱼的摄食时间呈现一定的规律性：每次摄食所花费的时间存在差异。将大黄鱼的摄食时间趋势整理成趋势图后，可以观察到随着摄食次数的增加，摄食持续时间明显延长，且呈线性正相关。通过回归分析方法推算其关联关系，拟合方程为： $y=1.659x+0.08286$ ,  $r^2=0.9285$ 。该拟合直线为线性关系，其斜率反映了摄食时长变化的速率。

### 3 讨论

目前，大黄鱼在中国主要以粗放式的近岸网箱养殖为主，这种特定的养殖条件限制了对个体摄食行为的精确观察<sup>[24]</sup>。在网箱养殖环境中，大黄鱼以高密度群体形式生活在海水中，这使得研究者通常只能观测到群体发声，而难以捕捉单尾鱼的摄食

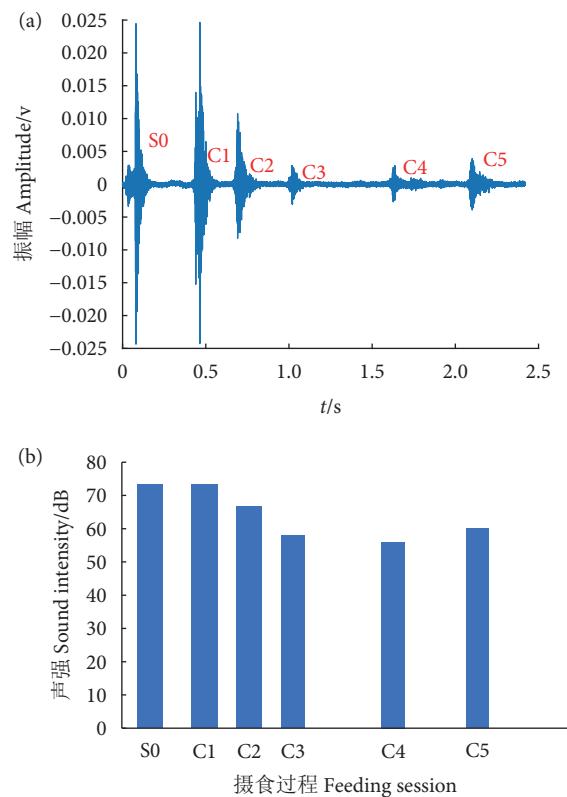


图5 大黄鱼1次完整摄食过程的声学特征信号图

注: a. 大黄鱼1次完整摄食过程的波形图, 整个脉冲串信号分为吞食(S)和咀嚼(C), 其中咀嚼的次数为5; b. 大黄鱼一次完整摄食过程的摄食能量分布图。

Fig. 5 Signal maps of acoustic characteristics of a complete feeding session of *L. crocea*

Note: a. Waveform of a complete feeding session of *L. crocea*, the whole pulse train signal is divided into swallowing (S) and chewing (C), where the number of C is 5; b. Distribution of feeding energy of a complete feeding session of *L. crocea*.

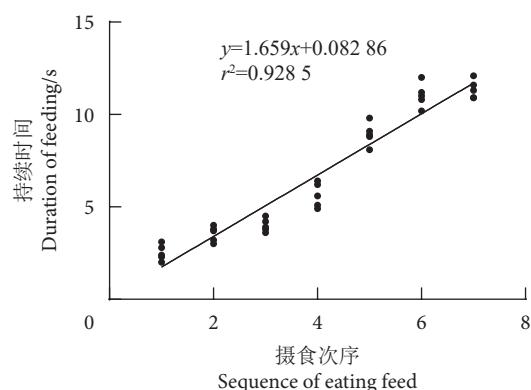


图6 大黄鱼摄食序列时长分析

Fig. 6 Analysis of feeding sequence duration of *L. crocea*

行为。群体发声的复杂性使得从中提取单尾鱼的吞食和咀嚼发声变得异常困难。然而, 鉴于大黄鱼在摄食行为上的独特性, 尤其是其在吞食和咀嚼过程中产生的声音, 对其进行深入研究具有重要意义。

在现代养殖中, 大黄鱼普遍采用饵料投喂的方

式。因其独特的口部结构(口裂宽大且倾斜, 牙齿细小尖锐且排列多行, 甚至在咽喉骨上也密布着许多小牙), 大黄鱼在摄食过程中表现出了明显的咀嚼行为<sup>[25]</sup>。基于这一特性, 本研究重点分析了大黄鱼在摄食时吞食和咀嚼过程中产生的声音, 旨在精确描述其摄食发声的独特特征。本研究发现, 大黄鱼在吞食饵料时释放的摄食信号频率主要集中于6~13 kHz。相比之下, 大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的摄食发声能量峰值则分别位于7~9 kHz和4~6 kHz, 显示出明显的频率差异。这种差异可能与不同鱼类在摄食时采用的口腔动作、吞咽速度及频率有关<sup>[26]</sup>。此外, 不同的生理构造和生活环境也可能导致鱼类摄食时产生的声音信号在频率、振幅和能量峰值上存在差异。

大黄鱼的吞食摄食信号特征, 与空化发声机制较为吻合。空化机制是鱼类进食时一个已知的早期发声现象, 其原理在于鱼嘴迅速张开形成内部低压区, 吸引食物因压力差进入, 随后因压力骤降而形成空化气泡, 并伴随声音脉冲的释放<sup>[27]</sup>。此外, 鼓声机制亦可能是吞食发声的参与者之一, 尽管鱼鳔振动产生的声波频率通常较低(约1 kHz), 但在发声肌的驱动和硬组织(如骨骼、鳞片)的摩擦作用下, 能够产生更高频、更复杂的信号。在本研究中, 可以观察到大黄鱼的仅吞食行为相对较少, 且在其吞食时发出的声音通常包含1~2个脉冲。这些脉冲可能源于大黄鱼口腔的快速闭合和打开动作, 进而产生声波信号。具体而言, 单脉冲的持续时间较短, 这通常对应于大黄鱼迅速张嘴后紧接着的闭合动作。而双脉冲的持续时间则相对较长, 通过视频记录可以确认, 双脉冲的出现往往是因为大黄鱼在第一次尝试摄食时未能成功捕获食物, 随后又进行了第二次尝试。同时, 大黄鱼在咀嚼过程中产生的声音信号能量范围与吞食时相似, 主频率峰值约为7 kHz, 这表明咀嚼也是大黄鱼摄食过程中重要的声学特征之一。当大黄鱼吞下颗粒饲料后, 开始进行咀嚼动作。咀嚼强度在开始时较高, 随后逐渐减弱, 从最高的(73.27±2.62) dB逐渐降低至(55.82±1.43) dB。这与汤涛林等<sup>[28]</sup>对罗非鱼的摄食声特征的研究结果一致。

此外, 鱼类摄食速度受多种因素影响。Lee等<sup>[29]</sup>研究揭示, 在低光照条件下, 裸盖鱼(*Anoplopoma fimbria*)幼鱼的摄食速度显著提升; Han-

deland 等<sup>[30]</sup>研究发现, 温度过高或过低均会影响大西洋鲑 (*Salmo salar* L.) 的摄食速度和生长速率; 而高养殖密度导致的拥挤胁迫也会对中华鲟 (*Acipenser sinensis* Gray) 的摄食和行为产生显著的负面影响<sup>[31]</sup>。本研究发现, 饥饿同样会对大黄鱼的摄食速率产生影响。在开始投饵时, 大黄鱼通常处于较高的饥饿状态, 因此摄食速度较快, 导致摄食持续时间较短。随着时间的推移和摄食次数的增加, 大黄鱼的饥饿感逐渐减弱, 它们开始更多地表现出咀嚼行为, 这使得摄食过程变得更为持久, 从而延长了摄食的持续时间, 并呈线性正相关。回归分析结果显示, 摄食次数 ( $x$ ) 与摄食持续时间 ( $y$ ) 的关系可通过拟合方程  $y=1.659x+0.082\ 86$  来描述, 其决定系数 ( $r^2$ ) 为 0.928 5, 表明该模型能够解释这一关系 92.85% 的变异性, 说明模型对描述摄食次数与摄食持续时间之间的关系具有较高的准确性。这与曹晓慧等<sup>[32]</sup> 和陈慧等<sup>[33]</sup> 发现的饥饿刺激会使鱼提高摄食速度、缩短摄食耗时的结果一致。

综上, 通过对大黄鱼吞食、咀嚼发声及摄食时长变化规律的深入研究, 可以发现大黄鱼在投饵后的摄食时长呈逐渐增加的趋势, 同时其咀嚼强度逐渐减弱。此外, 大黄鱼的摄食频率范围峰值趋于一致。这一发现不仅有助于精准掌握其摄食行为, 还为深远海养殖实现精细化、智能化管理奠定了重要基础。在复杂多变的深远海环境中, 精确掌握大黄鱼的摄食习性对于提高养殖成活率、优化资源配置以及降低养殖成本具有重要意义。此外, 结合深远海养殖环境特征, 相关研究可为开发智能投喂系统提供科学依据, 从而提升养殖效率与安全性。未来, 大黄鱼摄食行为的研究将继续为深远海养殖业的繁荣发展注入新动力。但本研究仍存在一些不足之处。后续可通过分析大黄鱼在不同饥饿状态下的摄食时间来验证实验结果的可靠性, 同时结合鱼类生理实验等方法进行辅助研究, 以更全面、更深入地理解大黄鱼的摄食行为及其影响因素, 从而为相关领域的研究提供更为可靠的数据和理论支持。

## 4 结论

大黄鱼在摄食过程中发出的声音主要可分为单纯吞食和吞食伴随咀嚼 2 类。在单纯吞食时, 声音的主要频率集中在 6~13 kHz。而当大黄鱼开始咀嚼食物时, 尽管声音能量的主要分布仍然保持在

6~13 kHz 范围内, 但其峰值频率更为显著地集中于约 7 kHz。投喂饵料前, 大黄鱼发出的声音信号数量相对较少; 投饵后, 声音信号数量显著增加。在 1 个完整的摄食周期内, 单尾大黄鱼通常表现出 4~7 次摄食行为。其中, 单纯吞食行为相对较少, 且每次吞食通常伴随 1~2 个脉冲声音。这些声音脉冲中, 单脉冲持续时间较短, 双脉冲持续时间较长, 整体信号持续时间介于 0.05~0.25 s, 产生的平均声压级约为  $(74.51\pm3.91)$  dB。相比之下, 大黄鱼在咀嚼食物时, 通常以 5~7 次咀嚼动作为主, 且随着咀嚼的进行, 声音强度从  $(73.27\pm2.62)$  dB 逐渐降低至  $(55.82\pm1.43)$  dB。此外, 随着摄食次数的增加, 大黄鱼的摄食持续时间显著延长, 呈线性正相关, 可通过拟合方程  $y=1.659x+0.082\ 86$  ( $r^2=0.928\ 5$ ) 来描述。

## 参考文献:

- 侯娟, 周为峰, 王鲁民, 等. 中国深远海养殖潜力的空间分析[J]. *资源科学*, 2020, 42(7): 1325-1337.
- 张琳桓, 张青亮, 孟广玮. 基于可移动式养殖工船的新型深远海养殖产业链分析[J]. *船舶工程*, 2020, 42(S2): 40-44.
- 徐皓, 刘晃, 徐琰斐. 我国深远海养殖发展现状与展望[J]. *中国水产*, 2021(6): 36-39.
- 鲍旭腾, 茅志新, 崔铭超, 等. 中国深远海养殖装备发展探讨及思考[J]. *渔业现代化*, 2022, 49(5): 8-14.
- 崔铭超, 金娇辉, 黄温赟. 养殖工船系统构建与总体技术探讨[J]. *渔业现代化*, 2019, 46(2): 61-66.
- 崔铭超, 鲍旭腾, 王庆伟. 我国深远海养殖设施装备发展研究[J]. *船舶工程*, 2021, 43(4): N21-N28.
- 魏翀, 张宇, 张赛, 等. 网箱养殖大黄鱼合成声信号特性研究[J]. *声学学报*, 2013, 38(3): 300-305.
- PEIXOTO S, SOARES R, DAVIS D A. An acoustic based approach to evaluate the effect of different diet lengths on feeding behavior of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Aquac Eng*, 2020, 91: 102114.
- ZHOU C, XU D M, LIN K, et al. Intelligent feeding control methods in aquaculture with an emphasis on fish: a review[J]. *Rev Aquac*, 2018, 10(4): 975-993.
- WEI M C, LIN Y T, CHEN K Y, et al. Study on feeding activity of *Litopenaeus vannamei* based on passive acoustic detection[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 156654-156662.
- MALLEKH R, LAGARDERE J, ENEAU J, et al. An acoustic detector of turbot feeding activity[J]. *Aquaculture*, 2003, 221(1/2/3/4): 481-489.
- 杨卫, 周丹丹. 我国大黄鱼产业的集聚水平研究[J]. *海洋开发与管理*, 2022, 39(10): 26-33.
- 黄文超, 崔铭超, 黄温赟. 10 万吨级养殖工船养殖舱水体噪声数值计算[J]. *船舶工程*, 2022, 44(S1): 256-262.

- [14] 姜旭阳, 赵晓霞, 张琳桓. 养殖工船鱼产品加工系统功能需求及发展[J]. 船舶工程, 2020, 42(S2): 86-89.
- [15] 崔铭超, 赵雨. 深远海养殖工船科技创新与高质量发展[J]. 船舶工程, 2023, 45(5): N10-N14.
- [16] 徐皓, 崔铭超, 刘晃. 中国深远海养殖的技术经济分析[J]. 船舶工程, 2024, 46(5): 28-39.
- [17] 邹国华, 宋炜, 谢正丽. 大黄鱼深远海大型围栏养殖技术[J]. 中国水产, 2021(6): 57-60.
- [18] LIU G, YE Z Y, LIU D Z, et al. Influence of stocking density on growth, digestive enzyme activities, immune responses, antioxidant of *Oreochromis niloticus* fingerlings in biofloc systems[J]. *Fish Shellfish Immunol*, 2018, 81: 416-422.
- [19] PARMENTIER E, LAGARDÈRE J P, BRAQUEGNIER J B, et al. Sound production mechanism in carapid fish: first example with a slow sonic muscle[J]. *J Exp Biol*, 2006, 209(15): 2952-2960.
- [20] 齐孟鹗, 张思照, 朱鉴平. 大黄鱼噪声谱分析[J]. 海洋湖沼通报, 1979(1): 59-64.
- [21] 许兰英, 齐孟鹗. 黄、渤海两种鱼噪声谱的水下观测[J]. *海洋科学*, 1999(4): 13-14.
- [22] 殷雷明, 黄洪亮, 张旭光, 等. 网箱养殖大黄鱼水下声音与行为反应[J]. *海洋渔业*, 2017, 39(1): 92-99.
- [23] QI R Y, LIU H, LIU S J. Effects of different culture densities on the acoustic characteristics of *micropterus salmoides* feeding[J]. *Fishes*, 2023, 8(3): 126.
- [24] 余友斌, 黄温赟, 崔铭超. 养殖密度对大黄鱼生长、血清生化、营养成分、消化酶和代谢酶活力的影响[J]. *渔业现代化*, 2023, 50(3): 64-71.
- [25] CHEN S X, SU Y Q, HONG W S. Aquaculture of the large yellow croaker[M]//GUI J F, TANG Q S, LI Z J, et al. Aquaculture in China: success stories and modern trends. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2018: 297-308.
- [26] LAGARDÈRE J, MALLEKH R, MARIANI A. Acoustic characteristics of two feeding modes used by brown trout (*Salmo trutta*), rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. *Aquaculture*, 2004, 240(1/2/3/4): 607-616.
- [27] MULLER M, OSSE J, VERHAGEN J. A quantitative hydrodynamical model of suction feeding in fish[J]. *J Theor Biol*, 1982, 95(1): 49-79.
- [28] 汤涛林, 唐荣, 刘世晶, 等. 罗非鱼声控投饵方法[J]. *渔业科学进展*, 2014, 35(3): 40-43.
- [29] LEE J S, BRITT L L, COOK M A, et al. Effect of light intensity and feed density on feeding behaviour, growth and survival of larval sablefish *Anoplopoma fimbria*[J]. *Aquac Res*, 2017, 48(8): 4438-4448.
- [30] HANDELAND S O, BERGE Å, BJÖRNSSON B T, et al. Seawater adaptation by out-of-season Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts at different temperatures[J]. *Aquaculture*, 2000, 181(3/4): 377-396.
- [31] 张建明, 郭柏福, 高勇. 中华鲟幼鱼对慢性拥挤胁迫的生长、摄食及行为反应[J]. 中国水产科学, 2013, 20(3): 592-598.
- [32] 曹晓慧, 刘晃, 戚仁宇, 等. 循环水养殖大口黑鲈摄食颗粒饲料的声学特征[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(20): 219-225.
- [33] 陈慧, 谢友佺, 林国文, 等. 鬼鮋早期发育阶段的摄食节律与饥饿致死时间[J]. *中国水产科学*, 2009, 16(3): 340-347.