

DOI: 10.12131/20240084

文章编号: 2095-0780-(2024)06-0095-09

基于基尔霍夫近似模型的南海大黄鱼声学目标强度研究

王文卓¹, 张纯², 薄萍¹, 王浩然¹, 贾烁², 王娜娜¹

1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000

2. 中国科学院声学研究所南海研究站, 海南 海口 570100

摘要: 渔业声学是评估鱼类丰度和分布的重要方法, 而大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 的声学评估常受限于目标强度 (Target strength, TS) 数据不足。基于此, 利用基尔霍夫近似模型 (Kirchhoff approximation model) 对南海地区养殖大黄鱼的目标强度进行了测定和计算, 并探究了其姿态倾角、体长 (L) 及声波频率等因素与目标强度的关系, 旨在补充大黄鱼的目标强度数据, 为南海渔业资源的声学评估提供科学参考。结果表明, 在 38、70、120 和 200 kHz 频率下, 大黄鱼的目标强度与体长间的拟合关系分别为 $TS=20\lg L-74.12$ 、 $TS=20\lg L-74.34$ 、 $TS=20\lg L-71.98$ 和 $TS=20\lg L-70.01$ 。在相同频率下, 大黄鱼的目标强度随体长的增加而增大, 并且在姿态倾角介于 $-20^\circ\sim-10^\circ$ 和 $10^\circ\sim20^\circ$ 时表现出较高的目标强度, 这与其体鳔夹角、运动姿态和生活习性相符。当频率超过 70 kHz 时, 大黄鱼的目标强度随频率的上升而增加, 但非线性关系。

关键词: 大黄鱼; 目标强度; 基尔霍夫近似模型; 渔业声学; 南海渔业资源

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Research on acoustic target strength of *Larimichthys crocea* in South China Sea based on Kirchhoff Approximation Model

WANG Wenzhuo¹, ZHANG Chun², BO Ping¹, WANG Haoran¹, JIA Shuo², WANG Nana¹

1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

2. Hainan Acoustics Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Haikou 570100, China

Abstract: Fisheries acoustics is as an important method for assessing fish abundance and distribution, but the acoustic assessment of *Larimichthys crocea* is often limited by insufficient Target strength (TS) data. Thus, we employed the Kirchhoff Approximation Model to measure and calculate the TS of cultured *L. crocea* in the South China Sea, and analyzed the relationship between its attitude inclination, body length (L), acoustic frequency and the target intensity, so as to supplement the target intensity data of *L. crocea*, and provide scientific references for the acoustic assessment of fishery resources in the South China Sea. The results show that at the frequencies of 38, 70, 120 and 200 kHz, the relationship between TS and body length can be approximated by $TS=20\lg L-74.12$, $TS=20\lg L-74.34$, $TS=20\lg L-71.98$, and $TS=20\lg L-70.01$, respectively. At the same frequencies, the TS of *L. crocea* increased with increasing body length, with higher values at angles of $-20^\circ\sim-10^\circ$ and $10^\circ\sim20^\circ$, aligning with their swim bladder orientation, movement posture and behavioral patterns. Moreover, when the frequency was over 70 kHz, the TS of *L. crocea* increased with increasing frequency but without a direct linear relationship.

Keywords: *Larimichthys crocea*; Target strength; Kirchhoff Approximation Model; Fishery acoustics; Fishery resources of South China Sea

收稿日期: 2024-04-24; 修回日期: 2024-07-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (11774376); 中国科学院声学研究所自主部署前沿探索项目 (QYYD202007)

作者简介: 王文卓 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业声学与清洁能源技术。E-mail: [sdjohnny@163.com](mailto:sjohnny@163.com)

通信作者: 王娜娜 (1977—), 女, 副教授, 博士, 研究方向为信号与信息处理及新能源利用技术。E-mail: wnn@sdut.edu.cn

南海是中国面积最大的海域,其地理范围从热带延伸至亚热带,拥有多样化的生态系统类型^[1],孕育了丰富的渔业资源^[2]。据估计,南海有3700多种鱼类,约占全球海洋鱼类种类数的22%,其渔场面积约占全国渔场总面积的65%,达182万km²,不仅是我国最富饶的渔业资源地区,对沿岸国家和地区的经济也至关重要^[3-4]。

大黄鱼(*Larimichthys crocea*)隶属于鲈形目、石首鱼科、黄鱼属^[5],具有单鳔室结构,头部有2枚洁白坚硬的耳石,因而别称“石首鱼”。作为中国养殖产量最高的海水鱼类^[6],大黄鱼具有很高的食用和经济价值。受过度捕捞和气候变化等因素影响,野生大黄鱼资源大幅减少甚至濒临灭绝;而大规模的海水养殖大黄鱼,由于缺乏对种群密度的准确估算,导致养殖成本上升。因此,采取科学的管理策略和高效的开发方法变得至关重要^[7]。近年来,随着声学探测技术和信息技术的快速发展,基于水声学的评估方法因其环境友好性、高效性和广泛适用性而备受认可^[8-12]。

目标强度(Target strength, TS)是衡量水生生物对声波反射能力的重要参数之一,直接影响鱼类资源评估的准确性^[13]。目标强度的测量方法主要分为直接测量法和模型法^[14]。直接测量法要求目标处于自然状态,离散分布且单一,能充分反映种群的特征,但由于成本较高和技术限制,该方法并不适用于所有鱼类^[15]。相比之下,模型法通过分析目标的声波散射特征来预测和计算鱼类的目标强度,具有较高的灵活性和广泛的场地适用性。常见的模型包括球体模型、椭球体模型、基尔霍夫近似模型、畸变波玻恩近似模型和有限元模型等^[16]。上述方法有助于深入探讨鱼体声散射的机理及特性,促进鱼类种类识别的研究,已成为目前国内外研究目标强度的主要方法之一。鱼体作为声学特性复杂的散射体,其声散射特征受多种因素影响,包括外形特征、解剖结构、鱼鳔尺寸及各组织器官的状态等^[17]。研究表明,鱼鳔在声散射过程中起关键作用,其对单体鱼声散射信号能量的贡献超过90%^[18]。因此,准确模拟鱼鳔形态对建立有效的声散射模型至关重要。在此背景下,学者们对鱼体声散射模型的建立和改进开展了广泛研究。李佩杰^[19]采用椭圆柱体模型估算了昆明灯鱼(*Ceratoscopelus warmingii*)的目标强度,为中国南海中层鱼类资源

的声学评估提供了关键参数。吴晔天等^[20]利用基尔霍夫近似模型计算了千岛湖鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)的目标强度,探究了两鳔室鱼类的声散射特征。薛铭华^[21]应用基尔霍夫模型分析了西北太平洋重要渔获物鲈鱼(*Scomber japonicus*)的体长与目标强度之间的关系,并利用这些数据评估了西北太平洋区域的渔业资源。此外,李斌^[22]通过基尔霍夫近似模型计算了不同体长的多鳞鱚(*Sillago sihama*)和红牙鲷(*Otolithes ruber*)的目标强度,孙杨等^[23]则使用该模型估算了高白鲑(*Coregonus peled*)的目标强度。上述研究为我国开展渔业资源评估工作提供了重要的技术参数支撑。

我国在目标强度测量研究上起步较晚,许多鱼类的数据库信息尚不完善,无法对南海重要经济鱼类进行准确评估。本研究采用基尔霍夫近似模型的仿真方法,针对南海地区重要的经济鱼类——大黄鱼进行了目标强度的计算,并探究了其姿态倾角、体长(L)及声波频率等因素与目标强度的关系,旨在补充大黄鱼的目标强度数据,为南海渔业资源的声学评估工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 基尔霍夫近似模型

基尔霍夫近似模型是声学散射领域中被广泛应用的数学模型,主要用于计算和预测物体在声波作用下的散射特性。该模型基于基尔霍夫的散射理论,适用于相对于入射声波波长较大且表面较光滑的物体。相比于球体和椭球体模型不适用于复杂建模、有限元模型的高计算要求以及畸变波玻恩近似模型更适用于浮游生物的特点,基尔霍夫近似模型在复杂海洋生态环境中的鱼类目标检测和分析中更具有优势。该模型能够根据物体的形状、大小、密度以及声波的入射角度等参数,精确计算散射场,从而提供对复杂目标散射特性的准确描述。

具体建模的过程^[24]如下:将鱼体及鱼鳔分别细分为等距离截面,并将这些横截面近似为一系列圆柱体;根据图1进行坐标变换,计算每个圆柱体的散射强度,分别标记为鱼体散射强度(L_b)和鱼鳔散射强度(L_s);两者相加获得目标鱼类的总体散射强度(L_f),从而利用散射强度计算目标强度(图1)。

根据鱼类目标强度基尔霍夫近似模型计算公

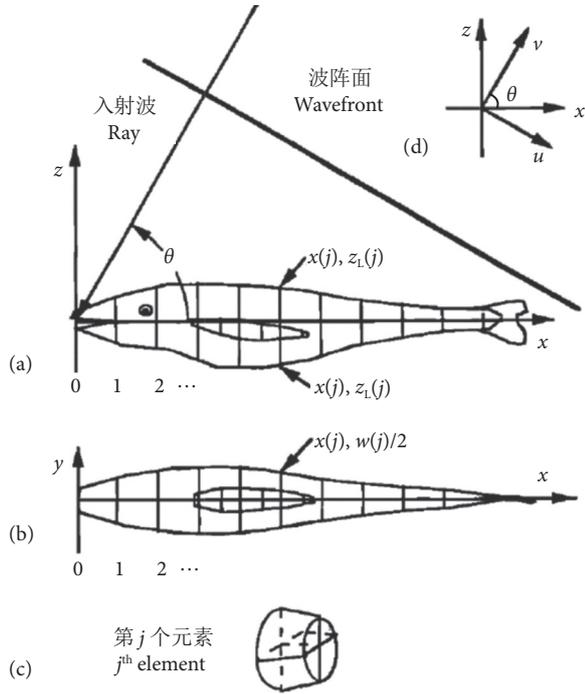


图1 基尔霍夫近似模型坐标系结构示意图^[25]

注: a. 侧向等距离切片; b. 腹背向等距离切片; c. 第 j 个体积单元; d. 坐标 (x, z) 向坐标 (u, v) 转化。

Fig. 1 Geometric construction of acoustic fish models

Note: a. Lateral isometric slice; b. Abdominal and dorsal isometric section; c. j th element; d. Rotation of (x, z) to (u, v) coordinats.

式^[26], 鱼鳔的散射强度为:

$$L_s \approx -i \frac{R_{bs}(1-R_{wb}^2)}{2\sqrt{\pi}} \sum_0^{N_s-1} A_{sb} [(k_b a_j + 1) \cos \chi]^{\frac{1}{2}} e^{-i(2k_b v_j + \varphi_p)} \Delta u_j \quad (1)$$

式中: R_{bs} 为鱼体与鱼鳔界面反射系数; R_{wb} 为水体与鱼体界面反射系数; N_s 为鱼鳔切片数; k_b 为鱼体内声波波数; a_j 为等效圆柱半径; χ 为水平轴与鱼体轴间夹角; A_{sb} 和 φ_p 分别为较小有效圆柱半径的经验振幅和经验相位; Δu_j 为切片长随 χ 进行坐标旋转后在横轴上的投影。

鱼体的散射强度为:

$$L_b \approx -i \frac{R_{wb}}{2\sqrt{\pi}} \sum_0^{N_b-1} (k a_j)^{\frac{1}{2}} [e^{-i2k v_{Uj}} - T_{wb} T_{bw} e^{-i2k v_{Lj} + i2k_b (v_{Uj} - v_{Lj}) + i\phi_b}] \Delta u_j \quad (2)$$

式中: N_b 为鱼体切片数; k 为水环境中声波波数, v_{Uj} 、 v_{Lj} 分别为鱼体切片对应的等效圆柱体上、下表面坐标; T_{wb} 为平面波由水体入射到鱼体界面处的声波传输系数; T_{bw} 为平面波由鱼体入射到水体的声波传输系数; φ_b 为经验校正相位。

对于有鳔鱼而言, 总散射强度为:

$$L_f = L_s + L_b \quad (3)$$

单体鱼后向散射截面 (σ_{bs}) 为:

$$\sigma_{bs} = L_f^2 \quad (4)$$

从而得到其目标强度 (TS) 为:

$$TS = 10 \lg \sigma_{bs} \quad (5)$$

为了正确模拟大黄鱼的游泳姿态, 本研究选取了鱼体姿态倾角在 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 的范围内进行分析^[27], 其中 0° 代表声波沿鱼体背部垂直入射的方向。鱼体头部向下倾斜的角度定义为负值, 而头部向上倾斜的角度则为正值。为了准确描述姿态倾角的分布, 研究采用了正态分布 $N[-5^\circ, 10^\circ]$ (平均值, 标准差)^[28] 作为姿态倾角的概率密度函数。所有样品的平均目标强度 (\overline{TS}) 为:

$$\overline{TS} = 10 \lg \bar{\sigma} \quad (6)$$

式中; $\bar{\sigma}$ 为通过对所有个体鱼倾角加权平均散射截面求均值值得, 到的样本平均后向声散射截面。

为了根据目标强度的分布估计鱼类种群的大小结构, 实现对鱼群的精确计数, 并更有效地关联目标强度与鱼类的生物学特性, 本研究采用了目标强度-体长关系的经验公式进行深入研究^[29]:

$$TS = 20 \lg L + b_{20} \quad (7)$$

式中: L 为鱼的体长 (cm); b_{20} 为回归系数。

1.2 样品鱼

本研究选取从海南省海口市海鲜市场购买的 10 尾大黄鱼为样品, 所有样品均来自当地近海养殖场。样品在捕获后立即进行冷冻保存, 为确保其新鲜度和实验的准确性, 所有样品均于购买后 2 h 内进行形态学测量和 X 射线成像, 以尽可能地保持其原始状态 (图 2)。



图2 部分大黄鱼样品

Fig. 2 Some samples of *L. crocea*

1.3 样品鱼生物学参数测量和声学参数分析

首先对所有样品鱼进行编号记录, 并依次测量

其全长 (cm)、体长 (cm) 和体质量 (g)。而后, 利用海南宠颐生动物医院世贸分院的 X 光摄像系统对所有鱼样进行 X 光成像。通过 Adobe Illustrator 2020 图像处理软件测量 X 光影像中的关键形态学参数。对部分样品鱼进行解剖处理, 验证其鱼鳔的大小与位置, 以便与形态学测量结果进行比对。

根据基尔霍夫近似模型的理论要求, 对目标鱼种的 X 光影像进行了详细的切片分析。使用图像

处理软件将这些影像分割成等间距的横截面片段, 并准确记录鱼鳔与鱼体的边界坐标点和长度信息 (图 3)。随后将数据导入 Matlab 2022 软件, 计算单体鱼的目标强度。本研究中使用 Matlab 2022 构建的数学模型基于公式 (1)–(7), 并将形态学参数代入模型进行模拟计算。其中, 典型海洋环境参数和声学参数详见表 1^[26]。

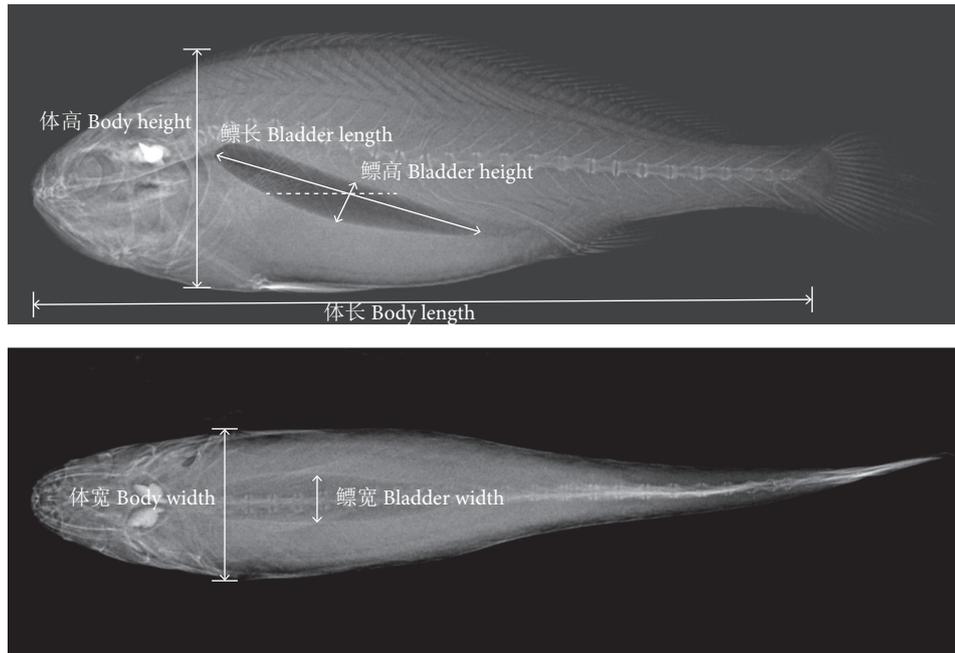


图3 大黄鱼形态学参数测量

Fig. 3 Measurement of morphological parameters of *L. crocea*

表1 环境参数与海水鱼类声学参数

Table 1 Environmental parameters and acoustic parameters of marine fish

介质 Medium	密度 Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	声速 Sound speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
海水 Seawater	1 030	1 490
鱼体 Fish body	1 070	1 570
鱼鳔 Swim bladder	1.24	345

表2 样品鱼形态学信息

Table 2 Morphological information of sample fish

编号 No.	全长 Total length/cm	体长 Body length/cm	体质量 Body mass/g
1	28.20	25.11	290
2	28.40	25.23	300
3	25.30	22.43	232
4	27.20	24.17	270
5	28.10	24.02	296
6	29.00	25.46	308
7	30.50	27.20	320
8	31.20	26.33	326
9	38.00	35.72	448
10	35.80	32.65	450

2 结果与分析

2.1 形态参数

样品鱼的全长、体长和体质量信息如表 2 所示。在实际测量条件下, 大黄鱼的体长介于 22.43~35.72 cm, 平均体长为 26.83 cm, 体质量介于 232~450 g, 平均体质量为 324 g。

通过 X 光成像技术测定鱼体鳔室的关键参数, 包括鳔长、鳔宽、鳔高及体鳔夹角等 (表 3), 并通过对部分样品鱼的解剖, 进一步验证了鱼鳔的

位置与大小。其中, 样品的平均鳔长为 9.34 cm, 平均鳔宽为 1.56 cm, 平均鳔高为 1.57 cm。之后对鱼体和鱼鳔进行了侧向及腹背向的等间距切片处理, 获取鱼体及鱼鳔的上下边界坐标和宽度等信息, 具体处理效果见图 4。

表3 样品鱼的形态学参数
Table 3 Morphological parameters of sample fish

编号 No.	体长 Body length/cm	体宽 Body width/cm	体高 Body height/cm	鳔长 Bladder length/cm	鳔宽 Bladder width/cm	鳔高 Bladder height/cm	体鳔夹角 Tilt angle/(°)
1	25.11	4.67	7.36	9.54	1.56	1.31	14.89
2	25.23	4.54	7.19	8.26	1.39	1.22	14.72
3	22.43	3.90	6.72	8.20	1.41	1.11	14.10
4	24.17	4.54	7.39	8.15	1.42	1.34	16.01
5	24.02	4.55	7.45	8.89	1.60	1.65	12.60
6	25.46	4.37	7.24	8.71	1.33	1.50	17.85
7	27.20	4.25	7.07	9.66	1.55	1.52	16.11
8	26.33	4.65	7.56	8.95	1.36	1.89	17.55
9	35.72	5.87	10.13	12.16	1.89	2.09	17.44
10	32.65	6.14	9.97	10.88	2.10	2.06	13.88
平均值 Mean	26.83	4.75	7.81	9.34	1.56	1.57	15.52

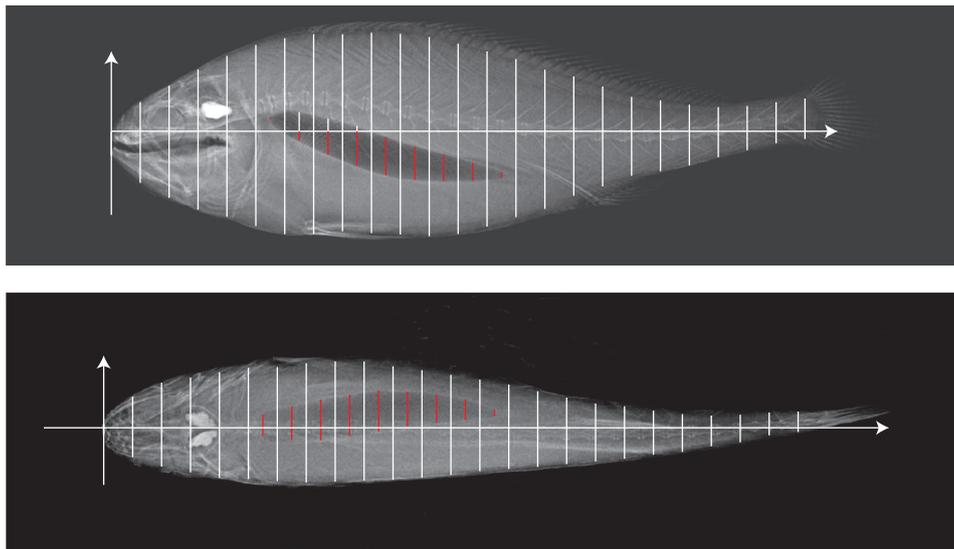


图4 大黄鱼样本背向、侧向 X 光影像及基尔霍夫近似模型切片处理示意图

Fig. 4 Back and side X-ray images of *L. crocea* samples and schematic diagram of Kirchhoff Approximation Model slice processing

形态学分析显示, 大黄鱼拥有较大的鳔室结构, 鳔的前端呈圆形, 后端较为尖细, 且鳔腹分支的前后 2 小支等长且平行^[30]。这表明大黄鱼具有在水层间频繁移动的能力, 能够依靠鱼鳔调节浮力以适应环境变化, 这与其昼间上浮、傍晚下沉的生活习性相吻合。鉴于样本数量的限制, 未来的研究应增加对照实验, 以进一步验证这些发现的普遍性。

2.2 不同频率下目标强度随姿态倾角的变化关系

本研究通过对 10 尾样品鱼的 X 光影像进行分析, 测定了鱼体及鱼鳔内部结构的参数坐标。这些数据为利用基尔霍夫近似模型计算不同频率及鱼体

姿态倾角对目标强度的影响奠定了基础。图 5 展示了 2 种不同体长的大黄鱼样品在 38、70、120 和 200 kHz 4 种常见测量频率下, 目标强度随姿态倾角的变化情况。

结合图 5 和其他样品的结果, 本研究发现鱼鳔的目标强度与鱼体的目标强度基本重合, 验证了鱼鳔是主要的声散射源^[31]。在中低频率下, 大黄鱼在姿态倾角介于 $-20^{\circ}\sim-10^{\circ}$ 和 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时显示出较高的目标强度。这一现象与其体鳔的角度密切相关, 当声波垂直射入鱼鳔时, 其目标强度显著增加, 鱼鳔对整体目标强度的影响具有决定性作用。

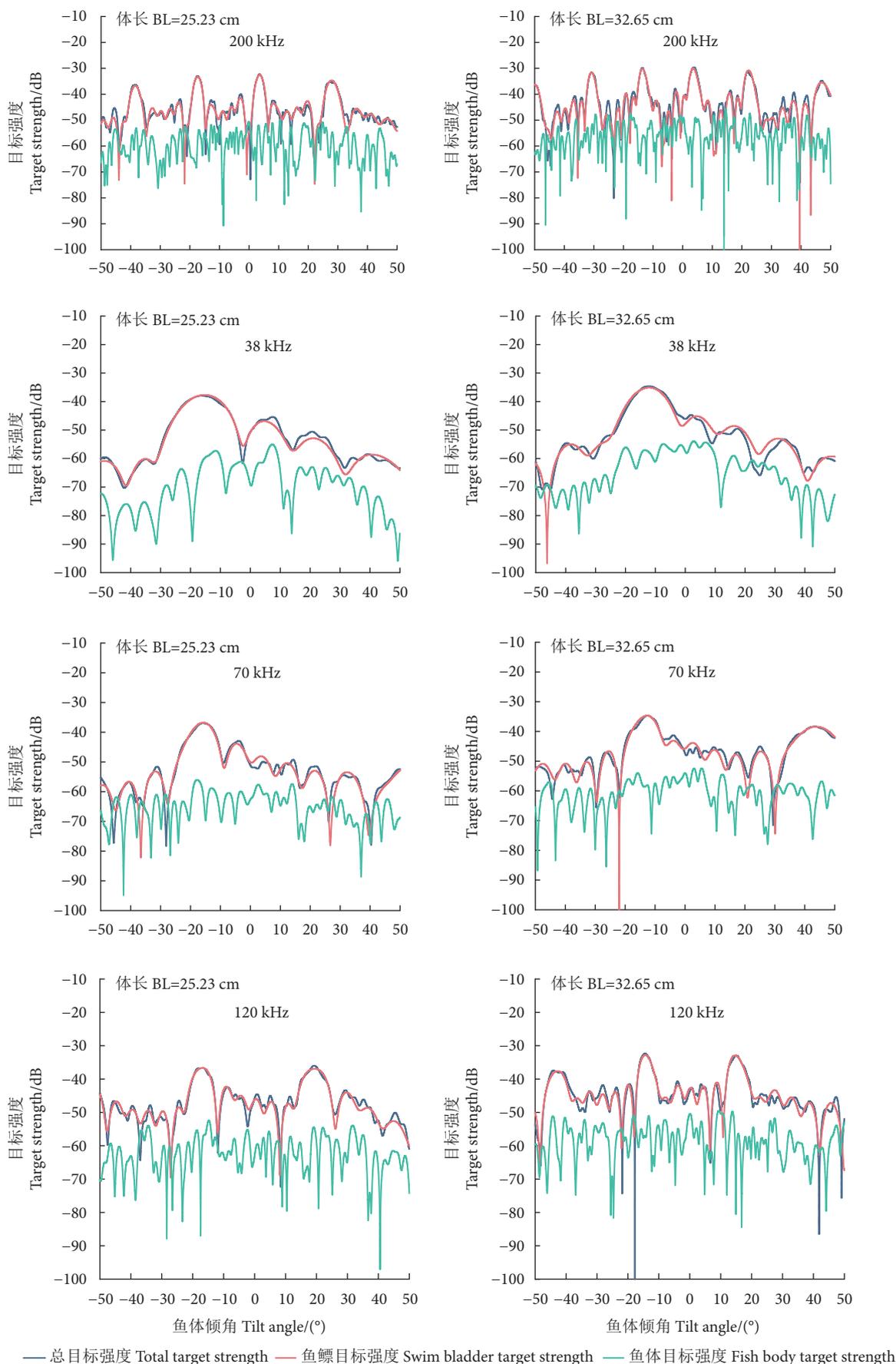


图5 不同频率2个样品的目标强度随姿态倾角变化

Fig. 5 Change of target intensity with attitude inclination of two samples at different frequencies

在 200 kHz 的高频率条件下, 目标强度表现出更加频繁的波动现象, 出现多个波峰。这可能是由于高频声波对大黄鱼表面细微的结构和姿态倾角变化更为敏感, 显示出目标强度与姿态倾角间更为复杂的关系^[32]。因此, 针对高频环境下的数据分析, 需要采取更为精细、严谨的方法, 以揭示二者间的内在联系。

2.3 目标强度随频率的变化关系

为进一步探究不同频率对目标强度的影响, 在姿态倾角概率密度函数为 $N[-5^\circ, 10^\circ]$ 下对大黄鱼的目标强度进行了研究。样品鱼在 0~200 kHz 频率内的宽频目标强度谱图如图 6 所示。

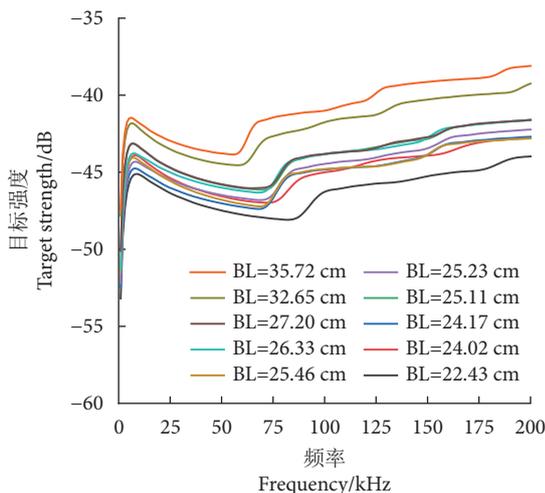


图6 角度分布为 $N[-5^\circ, 10^\circ]$ 时 10 尾大黄鱼在 0~200 kHz 频率带内的宽频目标强度谱图

Fig. 6 Broadband TS spectrum of 10 individuals of *L. crocea* estimated by using pitch angle distribution $N[-5^\circ, 10^\circ]$ within frequency range of 0~200 kHz

由图 6 可见, 在鱼体姿态倾角概率密度函数为 $N[-5^\circ, 10^\circ]$ 条件下, 当频率低于 70 kHz 时, 大黄鱼的目标强度表现出不规则的波动变化; 当频率高于 70 kHz 时, 目标强度随频率的增加逐渐增大, 但二者间未呈现明确的线性相关关系。这一现象主要是由于目标强度与频率之间复杂的相互作用, 以及受多种因素的影响, 包括鱼体的大小、形态、组织结构以及鱼体与其周围介质间的声学阻抗差异等^[33]。因此, 在实地目标强度测量中, 应根据具体情况调整入射声波的频率, 以适应实际工作条件, 确保研究结果的准确性和适用性。

2.4 不同频率下目标强度随体长的变化关系

本研究依据基尔霍夫近似模型以及鱼体姿态倾角概率密度函数, 计算了大黄鱼在不同频率条件下

的平均目标强度。通过分析平均目标强度与体长间的关系, 进一步确定了在各频率下经验公式中的 b_{20} (表 4)。

据计算, 大黄鱼在 38、70、120 和 200 kHz 频率下的目标强度-体长公式分别为: $TS=20\lg L-74.12$ 、 $TS=20\lg L-74.34$ 、 $TS=20\lg L-71.98$ 和 $TS=20\lg L-70.01$ 。图 7 为 4 个频率下大黄鱼目标强度-体长的拟合曲线。与其他传统有鳔鱼的 b_{20} 相比, 所得大黄鱼的 b_{20} 略小, 推测可能与所选样品的体长组成有关。

根据表 4 和图 7, 在相同频率条件下大黄鱼的目标强度随着体长的增加而增大, 这主要是因为鱼体表面积和体积的增大, 导致声波能量的散射增加。在 38 和 70 kHz 频率下, 相同体长样品鱼的目标强度变化不大, 这可能是因为鱼体和鱼鳔的形状、密度等因素对散射强度的影响远远超过了波长变化的影响, 因此不足以显著改变散射特性。

为了进一步探究大黄鱼在不同频率下目标强度值的分布情况, 图 8 展示了 10 尾样品鱼在姿态倾角概率密度函数为 $N[-5^\circ, 10^\circ]$ 时, 不同频率下目标强度的差值关系。差值范围使用 $\Delta TS = TS_{\max} - TS_{\min}$ 表示。

根据表 4 和图 8, 在 38、70、120 和 200 kHz 下样品的最大和最小目标强度差值分别为 3.22、6.54、5.26 和 5.97 dB。最大平均目标强度值出现在样品 9 (体长为 35.72 cm, -37.95 dB); 最小平均目标强度值出现在样品 3 (体长为 22.43 cm, -47.97 dB)。在相同频率下, 各样品鱼的目标强度差值变化不大, 表明目标强度的变化受其他因素影响。

2.5 其他因素对目标强度的影响

根据上述分析, 可以看出鱼体的目标强度明显受鳔室尺寸的影响。对比分析鱼鳔、鱼体及整体目标强度曲线, 发现鱼鳔目标强度与整体目标强度曲线基本吻合, 这进一步证实了鱼鳔在有鳔鱼类声散射过程中的主要作用^[34], 这一发现对于深入理解有鳔鱼类的声学特性至关重要。

此外, 鱼体的目标强度不仅与其形态结构、组织声学性能和姿态方位相关, 还受到探测设备使用的声波频率和周边水域环境等多重因素的影响^[35]。因此, 为了更深入地理解鱼类的目标强度特性, 未来研究需综合考虑鱼类在实际环境中的行为表现及多样的生态习性, 这将为科学研究和资源管理提供

表4 姿态倾角概率密度函数为正态分布 ($-5^\circ, 10^\circ$) 时不同频率下大黄鱼的平均目标强度
Table 4 Average target strength of *L. crocea* at different frequencies at a normal attitude in clination probability density function ($-5^\circ, 10^\circ$)

编号 No.	体长 Body length/cm	目标强度均值 Average target strength/dB				回归系数 b_{20}			
		38 kHz	70 kHz	120 kHz	200 kHz	38 kHz	70 kHz	120 kHz	200 kHz
1	25.11	-45.74	-46.08	-43.31	-41.47	-73.74	-74.08	-71.31	-69.47
2	25.23	-46.15	-46.77	-44.04	-42.14	-74.19	-74.81	-72.08	-70.18
3	22.43	-46.82	-47.97	-45.58	-43.92	-73.84	-74.99	-72.60	-70.94
4	24.17	-46.56	-47.15	-44.59	-42.56	-74.23	-74.82	-72.26	-70.23
5	24.02	-46.23	-47.09	-44.17	-42.65	-73.84	-74.70	-71.78	-70.26
6	25.46	-46.39	-47.09	-44.63	-42.66	-74.51	-75.21	-72.75	-70.78
7	27.20	-45.24	-45.94	-43.58	-41.45	-73.93	-74.63	-72.27	-70.14
8	26.33	-45.60	-46.05	-43.50	-41.39	-74.01	-74.46	-71.91	-69.80
9	35.72	-43.60	-41.43	-40.32	-37.95	-74.66	-72.49	-71.38	-69.00
10	32.65	-43.96	-42.96	-41.22	-39.04	-74.24	-73.24	-71.50	-69.32
平均值 Mean	26.83	-45.55	-45.77	-43.35	-41.45	-74.12	-74.34	-71.98	-70.01

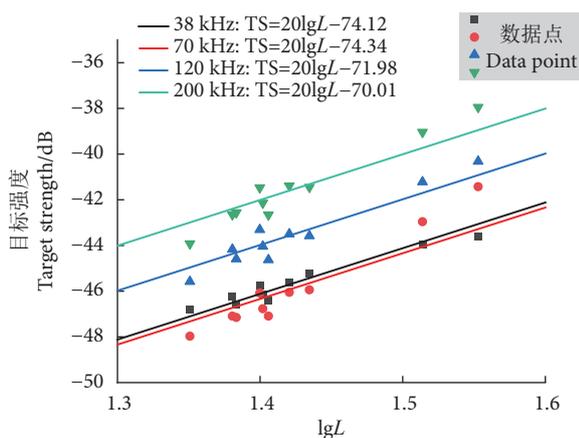


图7 目标强度-体长拟合公式及散点图

Fig. 7 Target strength-body length fitting formula and scatter plot

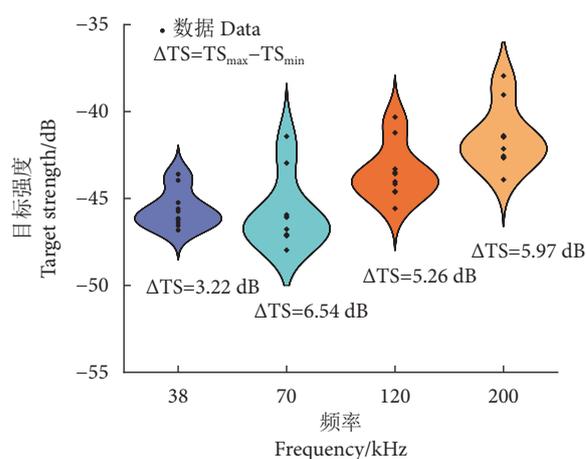


图8 不同频率下目标强度的差值

Fig. 8 Difference in intensity of target at different frequencies

更加坚实的理论和实践基础。

3 结论与展望

南海是我国重要的渔业生产与养殖区域。近年来,随着对养殖大黄鱼的科学管理与精确评估需求的日益增长,声学评估方法成为实现这一需求的有效途径。本研究应用基尔霍夫近似模型,建立了大黄鱼在 38、70、120 和 200 kHz 4 种不同频率下的目标强度与体长之间的关系公式,分别为: $TS=20\lg L-74.12$ 、 $TS=20\lg L-74.34$ 、 $TS=20\lg L-71.98$ 和 $TS=20\lg L-70.01$,并探究了鱼类的姿态倾角、体长和频率等因素对目标强度的影响。

建议未来的研究采用实际测量的大黄鱼倾角分布进行多样本估算,以提高目标强度估计的准确

性。同时,持续优化声学评估方法,探索更多的影响因素,以进一步提升评估的科学性和精确度。本研究结果可为南海重要鱼类资源的声学评估提供关键的基础参数,也为精准评估和有效管理大黄鱼资源奠定了基础,并为鱼类资源评估及渔业资源的可持续利用提供了科学参考。

参考文献:

- [1] 马彩华,游奎,李凤岐,等.南海鱼类生物多样性与区系分布[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2006(4):665-670.
- [2] 栗丽,许友伟,张魁,等.南海区拖网渔业发展趋势及其对渔业资源的影响[J].南方水产科学,2023,19(4):41-48.
- [3] 田思泉,柳晓雪,花传祥,等.南海渔业资源状况及其管理挑战[J/OL].上海海洋大学学报.<http://kns.cnki.net/kcms/detail/>

- 31.2024.S.20240307.1752.012.html.
- [4] 赵欣. 南海渔业资源开发利用的时空特征及其治理[J]. *世界地理研究*, 2022, 31(4): 762-772.
- [5] 陈大刚, 张美昭. 中国海洋鱼类[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2015: 1231.
- [6] 杨卫, 王春苗. 我国大黄鱼养殖产业发展研究[J]. *海洋开发与管理*, 2020, 37(5): 72-75.
- [7] 金显仕, 田洪林, 单秀娟. 我国近海渔业资源研究历程及展望[J]. *水产学报*, 2023, 47(11): 122-131.
- [8] 张丽媛, 杨剑虹, 熊清海, 等. 基于水声学的阳宗海鱼类行为特征及其资源评估[J]. *南方水产科学*, 2024, 20(1): 110-119.
- [9] 李哲, 朱文斌, 陈峰, 等. 近年我国渔业资源声学评估研究进展[J]. *浙江海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(1): 80-85, 92.
- [10] 武智, 李跃飞, 朱书礼, 等. 基于渔业声学调查的珠江东塔产卵场鱼类栖息地适宜性研究[J]. *南方水产科学*, 2023, 19(3): 11-18.
- [11] WOLFENKOEHLER W, LONG J M, GARY R, et al. Viability of side-scan sonar to enumerate Paddlefish, a large pelagic freshwater fish, in rivers and reservoirs[J]. *Fish Res*, 2023, 261: 106639.
- [12] BECKER A, LOWRY M B, FOWLER A M, et al. 2023 Hydroacoustic surveys reveal the distribution of mid-water fish around two artificial reef designs in temperate Australia[J]. *Fish Res*, 2023, 257: 106509.
- [13] DUNNING J, JANSEN T, FENWICK A J, et al. A new *in-situ* method to estimate fish target strength reveals high variability in broadband measurements[J]. *Fish Res*, 2023, 261: 106611.
- [14] 万树杰, 陈新军, 童剑锋. 声散射模型在鱼类目标强度和种类识别研究中的应用及其进展[J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(1): 171-180.
- [15] RAUTUREAU C, GOULON C, GUILLARD J. *In situ* TS detections using two generations of echo-sounder, EK60 and EK80: the continuity of fishery acoustic data in lakes[J]. *Fish Res*, 2022, 249: 106237.
- [16] 尚悦. 鱼种回波信号特征提取及分类方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 9-13.
- [17] 钱金玉. 莱州湾海洋牧场鱼礁区渔业资源声学调查技术研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023: 5-7.
- [18] 杨毅. 鱼声散射特性分析及声学生物量监测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021: 13-14.
- [19] 李佩杰. 尾明角灯鱼目标强度的模型法研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2016: 24-25.
- [20] 吴晁天, 胡忠军, 葛航, 等. 基于基尔霍夫近似模型的鲢和鳊目标强度测量[J/OL]. *水产学报*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20220721.1344.002.html>.
- [21] 薛铭华. 西北太平洋鲑鱼声散射特征及在声学资源评估中的应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 49-50.
- [22] 李斌. 基于基尔霍夫近似模型的多鳞鳕(*Sillago sihama*)和红牙鲷(*Otolithes ruber*)目标强度测量研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2017: 44-45.
- [23] 孙扬, 汤勇, 邢彬彬, 等. 基于基尔霍夫射线模型法的高白鲑目标强度研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(2): 310-316.
- [24] 王金明. 基于模型法对黄河鲤鱼的目标强度的测量[D]. 大连: 大连海洋大学, 2018: 11-14.
- [25] KUSDINAR A, HWANG B K, SHIN H O. Determining the target strength bamboo wrasse (*Pseudolabrus japonicus*) using Kirchhoff-Ray Mode[J]. *J Korean Soc Fish Ocean Technol*, 2014, 50(4): 427-434.
- [26] CLAY C S, HORNE J K. Acoustic models of fish: the Atlantic cod (*Gadus morhua*)[J]. *J Acoust Soc Am*, 1994, 96(3): 1661-1668.
- [27] LOVE R H. Dorsal-aspect target strength of an individual fish[J]. *J Acoust Soc Am*, 1971, 49(3B): 816-823.
- [28] PROUD R, HANDEGARD N O, KLOSER R J, et al. From siphonophores to deep scattering layers: uncertainty ranges for the estimation of global mesopelagic fish biomass[J]. *ICES J Mar Sci*, 2019, 76(3): 718-733.
- [29] SIMMONDS J, MACLENNAN D. Fisheries acoustics: theory and practice[M]. 2nd ed. Oxford: Blackwell Science, 2005: 229-230.
- [30] 刘家富. 大黄鱼养殖与生物学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2013: 295.
- [31] LI D L, HAO Y F, DUAN Y Q. Noninvasive methods for biomass estimation in aquaculture with emphasis on fish: a review[J]. *Rev Aquac*, 2020, 12(3): 1390-1411.
- [32] GAUTHIER S, HORNE J K. Acoustic characteristics of forage fish species in the Gulf of Alaska and Bering Sea based on Kirchhoff-Approximation Models[J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 2004, 61(10): 1839-1850.
- [33] WANZENBÖCK J, KUBECKA J, SAJDOVA Z, et al. Hydroacoustic target strength vs. fish length revisited: data of caged, free-swimming European whitefish (*Coregonus lavaretus* L.) suggest a bi-phasic linear relationship under a limited range of tilt angles[J]. *Fish Res*, 2020, 229: 105620.
- [34] FOOTE K G. Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: a comparison of gadoid and mackerel target strengths[J]. *J Acoust Soc Am*, 1980, 67(6): 2084-2089.
- [35] 谢晓, 张辉, 孙立元, 等. 基于网箱控制法和模型法的长江4种淡水鱼目标强度研究[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(5): 536-546.