

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2018.17088

多鳞鳢目标强度的模型法研究

李斌^{1, 2}, 陈国宝^{1, 3}, 曾雷^{1, 3}, 王志超^{1, 2}

1. 中国水产科学研究院 南海水产研究所, 广东 广州 510300;
2. 大连海洋大学 海洋科技与环境学院, 辽宁 大连 116023;
3. 农业部南海渔业资源环境科学观测实验站, 广东 广州 510300

摘要: 鱼类目标强度测量是渔业水声学工作的核心内容之一。本研究采用基尔霍夫近似模型对 19 尾多鳞鳢(*Sillago sihama*)样品的理论目标强度进行近似计算, 模型计算所需鱼类形态学参数由中国水产科学研究院南海水产研究所所属 X 光机(SOFTEX M-100)拍摄 X 光影像获得。通过编程计算获得多鳞鳢不同频率下目标强度随姿态倾角的变化图案, 并通过数据拟合方法建立了不同频率和倾角分布函数下多鳞鳢目标强度随体长变化的经验公式, 并与常规的 b_{20} 表式进行对比。结果表明: 在 70 kHz、120 kHz 和 200 kHz 3 种频率下多鳞鳢目标强度的倾角变化图案呈多峰状特征分布, 且频率越高目标强度对倾角变化越敏感, 波峰数增加, 目标强度最大值对应的倾角增大。70 kHz 下多鳞鳢目标强度最大值出现在 $-15^{\circ}\sim 5^{\circ}$, 120 kHz 和 200 kHz 下目标强度最大值则出现在 $-10^{\circ}\sim 0^{\circ}$, 且各频率下目标强度最大值出现的位置各不相同。不同频率及倾角分布函数下多鳞鳢目标强度随体长变化特性各不相同, 其中在角度函数为 $(-5^{\circ}, 15^{\circ})$ 、频率为 120 kHz, 以及角度函数为 $(0^{\circ}, 10^{\circ})$ 、频率为 200 kHz 时目标强度对体长经验公式和常规的 b_{20} 表式曲线基本重合, 拟合度较高, 可将常规的 b_{20} 表式直接用于多鳞鳢的资源评估; 而其他情形下 2 种表式存在一定偏差, 采用直接拟合的参数方程更为恰当。研究表明, 基尔霍夫近似模型能够很好地反映多鳞鳢的目标强度特性, 可为中国南海近岸鱼类目标强度研究提供有益借鉴, 为提高渔业资源水声学评估的准确度和可信度提供科学依据。

关键词: 目标强度; 多鳞鳢; 姿态倾角; 基尔霍夫近似模型

中图分类号: S932

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2018)02-0403-10

多鳞鳢(*Sillago sihama*)属鲈形目(Perciformes)、鳢科(Sillaginidae)、鳢属, 为暖水性洄游鱼类, 主食浮游动物、多毛类蠕虫及虾类等。多鳞鳢主要分布于印度洋至西太平洋的热带海域, 多集中于海滩、沿岸内湾及河口沙洲水域, 在中国沿海地区均有分布, 是南海海区重要经济性食用鱼类^[1]。近年来由于南海沿岸水域生态环境的破坏及海洋捕捞业的发展, 多鳞鳢资源濒临枯竭, 如何对其进行有效监测并合理管理以保证多鳞鳢的可持续捕捞成为亟待解决的问题。

鱼类资源评估是对渔业资源进行合理开发利

用的基础和前提^[2], 渔业资源的水声学评估方法以其快速高效、非接触不损害生物资源、调查空间尺度大及可提供连续数据等优点^[3-4], 被广泛应用于海洋生物的资源评估^[5-6]、种类识别^[7-8]和行为监测追踪^[9-10], 该方法自引入中国以来逐步成为中国海洋生物资源调查研究的重要手段^[11-13]。所谓渔业资源的水声学评估, 即以声学积分值(nautical area scattering coefficient, NASC, $\text{m}^2/\text{n mile}^2$)的大小来衡量调查海域内生物资源量的多寡, 而目标强度(target strength, dB)则是两者进行转化的关键参数^[14-15]。因此, 准确测定鱼类单体目标

收稿日期: 2017-03-08; 修订日期: 2017-09-17.

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201403008); 深圳市科技计划项目(JSGG20141015154342147); 农业部财政项目南海海洋捕捞生产结构调查(640).

作者简介: 李斌(1990-), 男, 硕士研究生, 从事渔业资源及渔业水声学研究. E-mail: 657904475@qq.com

通信作者: 陈国宝, 研究员. E-mail: chenguobao@scsfri.ac.cn

强度是利用水声学方法评估鱼类资源的前提。

鱼类目标强度测量方法主要分为实验测定法和模型法两大类,其中实验测定法主要是利用搭建的声学实验平台对受控鱼类进行目标强度测量^[16-18]。或者在海上调查期间利用声学仪器对自然状态下的离散目标进行现场测定^[19-21]。上述两种方法虽然具有一定的优越性,但对实验条件要求较高,同时受限于声学实验平台的搭建较为困难且不易操作,灵活性较差,因此至今国际上仅对有限的数十种鱼类的目标强度通过实验测定法进行过测量研究。鱼类目标强度的模型法是将鱼类近似为规则的几何形状,根据声波散射理论对其目标强度进行测定,具备简单、灵活、低成本的特征,在国外得到广泛应用^[22-24]。国内的相关研究起步较晚,仅对数种具有重要生态意义及经济价值的鱼类目标强度进行过模型法的研究^[25-28],模型法作为实验测定法的重要补充远未达到渔业资源水声学评估的要求。

本研究基于基尔霍夫近似模型对多鳞鱖的单体目标强度进行计算,分析其随不同声学频率、鱼体姿态倾角和体长的变化特性,同时得出多鳞鱖的目标强度经验公式并与传统的 b_{20} 表式进行对比分析,以期能够为中国南海近岸鱼类目标强度的模型法研究提供有益借鉴,为提高渔业资源水声学评估的准确度和可信度提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品鱼的获取

本研究共对 19 尾多鳞鱖样品的目标强度进行测量研究,所有样品均由底拖网现场采样获得,其中编号 1~8 的样品于 2016 年 8 月 12 日采自江门广海湾及镇海湾海域,编号 9~19 的样品于 2016 年 8 月 27 日采自珠江口海域,所有样品均进行现地水冷保存以最大程度保证样品的鲜度,并在 24 小时之内完成 X 射线摄影操作,获得多鳞鱖样品的 X 光影像。

1.2 多鳞鱖生物学参数测量及 X 光影像的获取

在进行 X 射线摄影操作前对每尾多鳞鱖样品编号并进行生物学测量,利用直尺测量多鳞鱖的体长及全长(cm),利用天平测量多鳞鱖的体重(g)。

多鳞鱖样品的 X 光影像由中国水产科学研究院南海水产研究所所属 X 光机(SOFTEX M-100)拍摄获得,该设备相关参数如下:输入为 AC200 V, 50/60 Hz;输出为最大发射电压 100 kV,最大发射电流 3 mA;管球型号为 NX-02SN,拍摄尺寸为 432 mm×348 mm,外观尺寸为 551 mm×395 mm×62 mm,重量为 7.6 kg。在进行 X 光摄影前按照仪器操作手册对 X 光机进行暖机操作,并对其系统进行校正,包括位置校正和灰度校正,以保证获得的多鳞鱖样品 X 光影像的准确性。

1.3 基尔霍夫近似模型

本研究拟通过基尔霍夫近似模型对多鳞鱖的目标强度进行测量研究,模型建立的具体方法如下:首先将鱼体和鱼鳔分别近似等距离垂直切片,分解为若干近似圆柱体,然后分别计算鱼体和鱼鳔各个圆柱体的散射强度,最后进行相应的积分运算使鱼体和鱼鳔散射强度叠加,获得目标鱼类的总体散射强度。鱼鳔散射长度为^[29]

$$L_s \approx$$

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

式中, R_{bc} 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, A_{sb} 为对较小有效圆柱半径的经验振幅, k_b 为鱼体内波数,为 a_j 等效圆柱半径, χ 为水平轴到鱼体轴间夹角, ψ_p 为对较小有效圆柱半径的经验相位, Δu_j 为切片长随 χ 进行坐标旋转后在横轴上的投影。

鱼体的散射长度为^[29]

$$L_b \approx$$

$$-i \frac{R_{wb}}{2\sqrt{\pi}} \sum_0^{N_b-1} (k a_j)^2 \left[e^{-i2k v_{Lj}} - T_{wb} T_{bw} e^{-i2k v_{Lj} + i2k(v_{Lj} - v_{Lj}) + i\psi_b} \right] \Delta u_j$$

式中, N_b 为鱼体切片数, k 为水环境中波数, v_{Lj} 为等效圆柱体上表面坐标, v_{Lj} 为等效圆柱体下表面坐标, T_{wb} 为声波由水体入射到鱼体界面处的传输系数, T_{bw} 为声波由鱼体入射到水体的传输系数。

将鱼体和鱼鳔的散射振幅叠加得到总的散射长度

$$L = L_b + L_s$$

而它与单体鱼后向散射截面 σ_{bs} (back scattering cross-section, m^2) 的关系为

$$\sigma_{bs} = L^2$$

从而得到鱼类目标强度

$$TS = 10\log_{10} \sigma_{bs}$$

1.4 多鳞鱖形态学参数的获取及目标强度测定

在获得多鳞鱖 X 光影像后利用图像处理软件对每尾多鳞鱖样品的形态学参数进行测量, 获得对应的鱼类形态学参数, 同时根据基尔霍夫近似模型的计算要求对所获多鳞鱖 X 光影像进行近似等距离切片, 并测量每一片段的相关位置坐标, 如图 1 所示。

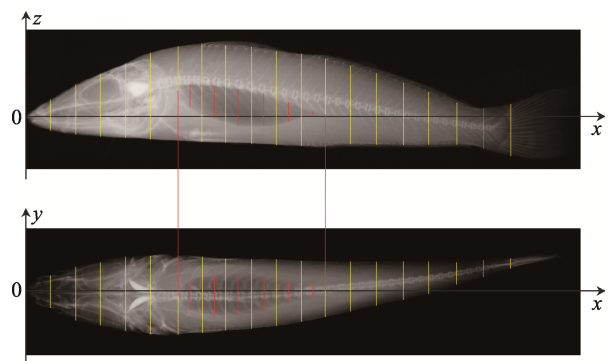


图 1 多鳞鱖形态学参数测量示意图

Fig. 1 Morphological parameters measurement of *Sillago sihama*

在获取多鳞鱖样品形态学参数的基础上, 利用 MATLAB 软件对所得到的数据进行分析, 同时参考南海近海渔业资源水声学调查科学探鱼仪 (EY60, Simrad) 3 种常用探测频率, 选择 70 kHz、120 kHz 及 200 kHz 作为多鳞鱖目标强度测定的研究频率, 鱼体姿态倾角参照鱼类正常游泳活动情况并参考相关文献选择 $-50^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 作为多鳞鱖姿态倾角的研究范围 (声波入射与鱼体垂直时为 0° , 鱼头向下姿态倾角为负)^[30]。鱼体姿态倾角的分布密度函数选择对鱼类日常活动进行监测后得出的截断正态分布函数 ($-5^{\circ}, 15^{\circ}$) 及 ($0^{\circ}, 10^{\circ}$)^[24]。基尔霍夫近似模型目标强度计算分析所需海水环境参数以及典型海水鱼类声学参数见表 1^[29]。

2 结果与分析

2.1 多鳞鱖生物学测定结果

在进行 X 射线摄影操作前对每尾多鳞鱖样品编号并进行生物学测量, 利用直尺测量多鳞鱖的

体长及全长 (cm), 利用天平测量多鳞鱖的体重 (g), 结果如表 2 所示。

表 1 海水环境参数与典型海水鱼类声学参数^[29]
Tab. 1 Seawater environmental parameters and acoustic parameters of typical marine fish^[29]

介质 medium	密度/ (kg/m ³) density	声速/(m/s) sound speed	密度比 density contrast	声速比 sound speed ratio
海水 seawater	1030	1490		—
鱼体 fish body	1070	1570	1.04	1.05
鱼鳔 swim bladder	1.24	345	0.001	0.22

注: 密度比 $g = \rho_s / \rho_l$, 其中 ρ_s 为鱼体或鱼鳔密度, ρ_l 为海水密度; 声速比 $h = c_s / c_l$, 其中 c_s 为鱼体或鱼鳔中的声速, c_l 为海水中的声速。

Note: Density contrast formula is $g = \rho_s / \rho_l$; ρ_s is density of fish body or swim bladder, and ρ_l is density of seawater. Sound speed contrast formula is $h = c_s / c_l$; c_s is sound speed in fish body or swim bladder, and c_l is sound speed in seawater.

表 2 多鳞鱖生物学测定结果
Tab. 2 Biological determination results of *Sillago sihama*

编号 serial number	体长/cm body length	全长/cm total length	体重/g body weight
1	13.2	14.9	26
2	13.9	15.9	28
3	15.7	17.2	37
4	14.1	15.3	29
5	14.5	16.3	32
6	13.8	15.2	30
7	13.4	15.2	25
8	12.3	14.1	20
9	21.0	23.4	103
10	22.9	25.3	123
11	23.5	26.2	127
12	20.9	23.3	96
13	18.3	20.6	69
14	21.0	23.2	103
15	15.8	17.7	58
16	16.9	19.0	52
17	18.2	20.4	64
18	15.6	17.3	41
19	16.7	18.2	51

由表 2 可知, 19 尾多鳞鱖样品的体长范围为 12.3~23.5 cm, 平均体长为 16.9 cm, 全长范围为 14.1~26.2 cm, 平均全长为 18.9 cm, 体重范围为 20~127 g, 平均体重为 58.6 g。对全部多鳞鱖体长与体重数据利用最小二乘法进行相关性分析, 得到多鳞鱖体重对体长拟合关系式为

$$W = 0.02303L^{2.741}$$

式中, W 为多鳞鳢体重, 单位 g ; L 为多鳞鳢体长, 单位 cm ; a 的 95% 置信区间为 $[0.003343, 0.04271]$; b 的 95% 置信区间为 $[2.457, 3.025]$; 相关系数为 0.9948(图 2)。

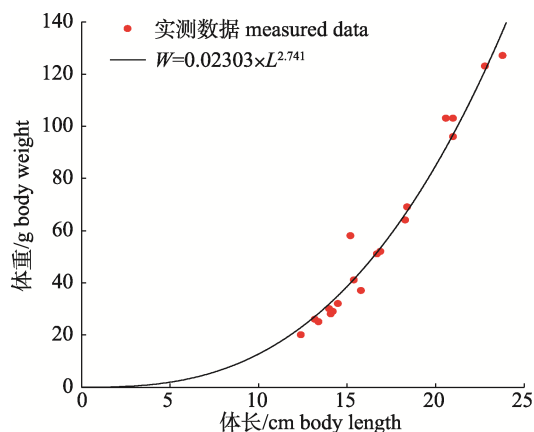


图 2 多鳞鳢体重对体长拟合关系

Fig. 2 Fitting curve of body weight of *Sillago sihama* with body length

2.2 不同频率下多鳞鳢目标强度随姿态倾角的变化特性

在对编号 1~19 的多鳞鳢样品 X 光影像切片处理测量后获得鱼体和鱼鳔结构坐标参数, 利用 MATLAB 软件对不同姿态倾角下的目标强度进行计算, 获得 3 种频率 70 kHz、120 kHz 和 200 kHz 下多鳞鳢目标强度随姿态倾角的变化特性, 图 3 为编号 6 的多鳞鳢在 3 种频率下目标强度随姿态倾角的变化图案。

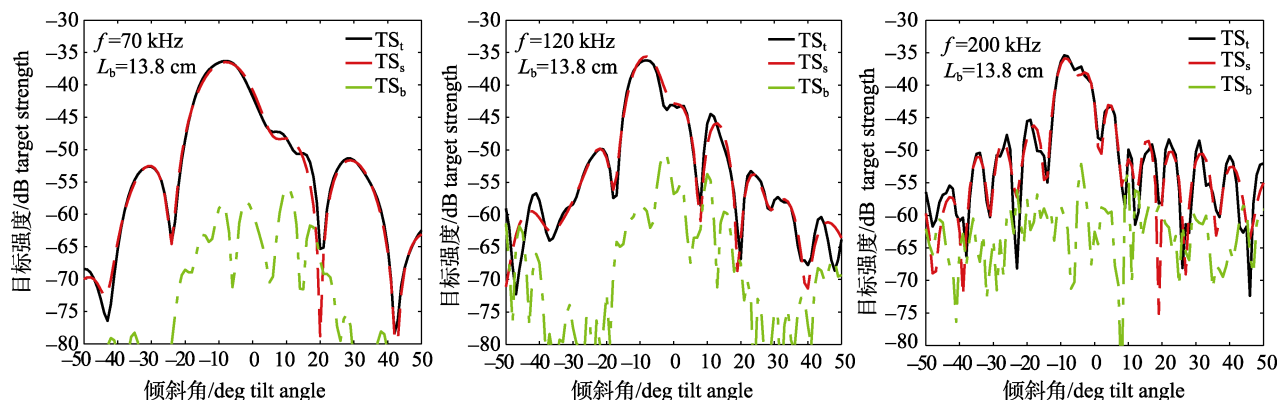


图 3 不同探测频率下编号 6 多鳞鳢目标强度随姿态倾角变化图

TS_t 为鱼类整体目标强度, TS_s 为鱼鳔目标强度, TS_b 为鱼体目标强度, L_b 为鱼类体长。

Fig. 3 Variation of target strength (TS) of No. 6 *Sillago sihama* with tilt angle at different frequencies

TS_t means TS of the whole fish; TS_s means TS of the swim bladder; TS_b means TS of the fish body; L_b means body length of fish.

对编号 1~19 多鳞鳢样品的目标强度随姿态倾角变化特性进行统计发现, 虽然不同体长多鳞鳢目标强度随姿态倾角变化关系各不相同, 但鱼鳔目标强度与鱼类总的目标强度基本重合, 变化趋势一致, 表明鱼鳔是多鳞鳢声散射的主体, 对多鳞鳢的目标强度起决定性作用。在 70 kHz、120 kHz 和 200 kHz 3 种频率下多鳞鳢目标强度随姿态倾角变化关系均呈多峰状分布, 且随着频率的增大, 目标强度随姿态倾角变化越敏感, 波峰数增加, 目标强度最大值对应的姿态倾角增大。在 70 kHz 下, 多鳞鳢目标强度最大值对应的姿态倾角主要位于 $-15^\circ \sim -5^\circ$, 且集中在 -10° 左右; 在 120 kHz 下, 目标强度最大值对应的姿态倾角主要位于 $-10^\circ \sim 0^\circ$, 集中在 -9° 附近; 在 200 kHz 下, 目标强度最大值对应的姿态倾角同样位于 $-10^\circ \sim 0^\circ$, 但出现姿态倾角不固定的现象。

2.3 不同频率下多鳞鳢目标强度随体长的变化特性

在完成多鳞鳢目标强度随姿态倾角变化的统计分析后, 利用基尔霍夫近似模型对 3 种频率下不同体长、不同姿态倾角分布函数下多鳞鳢的平均目标强度进行计算, 统计分析其平均目标强度与体长的相关关系, 其中鱼体姿态倾角分布函数选择 $(-5^\circ, 15^\circ)$ 及 $(0^\circ, 10^\circ)$, 结果见表 3。

根据表 3 对不同角度分布函数 $(-5^\circ, 15^\circ)$ 及 $(0^\circ, 10^\circ)$ 下各声学频率目标强度数据及对应体长数据利用最小二乘法进行线性拟合, 采用 $TS = a \log_{10} L + b$

表 3 不同频率及角度函数下多鳞鱖的目标强度
Tab. 3 Target strength of *Sillago sihama* at different frequencies and angle functions

编号 serial number	角度函数(-5°, 15°)下平均目标强度 mean target strength at angle function of (-5°, 15°)						角度函数(0°, 10°)下平均目标强度 mean target strength at angle function of (0°, 10°)					
	频率/kHz frequency			b_{20}			频率/kHz frequency			b_{20}		
	70	120	200	$b_{20}/70$	$b_{20}/120$	$b_{20}/200$	70	120	200	$b_{20}/70$	$b_{20}/120$	$b_{20}/200$
1	-41.8	-42.4	-43.1	-64.2	-64.9	-65.6	-41.5	-42.1	-42.7	-64.0	-64.5	-65.2
2	-41.7	-42.2	-42.9	-64.6	-65.0	-65.8	-41.5	-41.8	-42.6	-64.3	-64.6	-65.5
3	-40.7	-41.6	-42.0	-64.6	-65.5	-65.9	-40.9	-41.7	-42.2	-64.8	-65.6	-66.1
4	-41.1	-41.9	-42.0	-64.1	-64.9	-65.0	-40.5	-41.2	-41.3	-63.5	-64.2	-64.2
5	-40.3	-41.3	-41.3	-63.5	-64.5	-64.5	-39.3	-40.2	-40.1	-62.5	-63.5	-63.4
6	-40.9	-42.0	-41.8	-63.8	-64.8	-64.6	-40.5	-41.5	-41.1	-63.3	-64.3	-63.9
7	-42.1	-42.7	-42.9	-64.6	-65.2	-65.5	-41.8	-42.2	-42.3	-64.4	-64.8	-64.9
8	-44.2	-43.8	-44.6	-66.0	-65.6	-66.4	-44.7	-43.8	-44.5	-66.5	-65.6	-66.3
9	-38.8	-38.8	-38.7	-65.2	-65.3	-65.2	-37.5	-37.4	-37.3	-64.0	-63.9	-63.8
10	-37.6	-38.4	-38.1	-64.9	-65.6	-65.3	-37.1	-37.9	-37.7	-64.3	-65.1	-64.9
11	-38.0	-39.0	-38.5	-65.5	-66.4	-65.9	-37.3	-38.2	-37.7	-64.7	-65.7	-65.1
12	-38.1	-38.9	-38.9	-64.5	-65.4	-65.3	-37.3	-38.2	-38.2	-63.7	-64.6	-64.6
13	-38.8	-39.4	-41.0	-64.1	-64.6	-66.3	-38.0	-38.4	-40.3	-63.3	-63.6	-65.6
14	-38.4	-38.9	-38.9	-64.8	-65.3	-65.3	-37.5	-37.9	-38.0	-63.9	-64.3	-64.4
15	-39.7	-40.5	-41.2	-63.7	-64.4	-65.2	-39.5	-40.1	-41.1	-63.5	-64.1	-65.1
16	-39.4	-40.5	-40.7	-64.0	-65.0	-65.2	-38.5	-39.6	-39.7	-63.1	-64.2	-64.3
17	-38.2	-39.0	-39.7	-63.4	-64.2	-64.9	-37.0	-37.7	-38.3	-62.2	-62.9	-63.5
18	-39.9	-41.1	-40.3	-63.8	-64.9	-64.1	-39.6	-40.7	-39.6	-63.4	-64.5	-63.4
19	-39.4	-40.4	-40.6	-63.9	-64.9	-65.1	-38.4	-39.3	-39.4	-62.9	-63.8	-63.8

形式, 统计分析不同频率下多鳞鱖目标强度随体长的变化关系, 拟合曲线如图 4~图 6 所示, 结果如下:

(1)角度函数为(-5°, 15°)时, 70 kHz 下目标强度对体长拟合方程为 $TS = 18.3\log_{10}L - 62.3$, 式中, L 为多鳞鱖体长, 单位 cm; a 的 95%置信区间为 [14.3, 22.3], b 的 95%置信区间为 [-67.2, -57.4], 相关系数为 0.8458; 120 kHz 下目标强度对体长拟合方程为 $TS = 17.8\log_{10}L - 62.3$, a 的 95%置信区间为 [15.0, 20.5], b 的 95%置信区间为 [-65.7, 59.0], 相关系数为 0.9162; 200 kHz 下目标强度对体长拟合方程为 $TS = 19.8\log_{10}L - 65.1$, a 的 95%置信区间为 [16.4, 23.2], b 的 95%置信区间为 [-69.3, -61.0], 相关系数为 0.8992。

(2)角度函数为(0°, 10°)时, 70 kHz 下目标强度对体长拟合方程为 $TS = 21.5\log_{10}L - 65.7$, a 的 95%置信区间为 [16.0, 27.1], b 的 95%置信区间为 [-72.5, -58.9], 相关系数为 0.7979; 120 kHz 下目标强度对体长拟合方程为 $TS = 20.2\log_{10}L - 64.6$,

a 的 95%置信区间为 [15.7, 24.6], b 的 95%置信区间为 [-70.0, 59.2], 相关系数为 0.8455; 200 kHz 下目标强度对体长拟合方程为 $TS = 21.6\log_{10}L - 66.6$, a 的 95%置信区间为 [16.5, 26.8], b 的 95%置信区间为 [-72.9, -60.3], 相关系数为 0.8218。

采用标准参考方程 $TS = 20\log_{10}L - b_{20}$ 形式表示对应有以下结果:

(1)角度函数为(-5°, 15°)时, 70 kHz 下目标强度与体长相关关系为 $TS = 20\log_{10}L - 64.4$, 120 kHz 下为 $TS = 20\log_{10}L - 65.1$, 200 kHz 下为 $TS = 20\log_{10}L - 65.3$ 。

(2)角度函数为(0°, 10°)时, 70 kHz 下目标强度对体长拟合方程为 $TS = 20\log_{10}L - 63.8$, 120 kHz 下为 $TS = 20\log_{10}L - 64.4$, 200 kHz 下为 $TS = 20\log_{10}L - 64.6$ 。

为方便对不同频率和角度函数下多鳞鱖目标强度和体长的拟合关系式与 b_{20} 表式进行比较, 对上述数据进行整理, 结果见表 4。

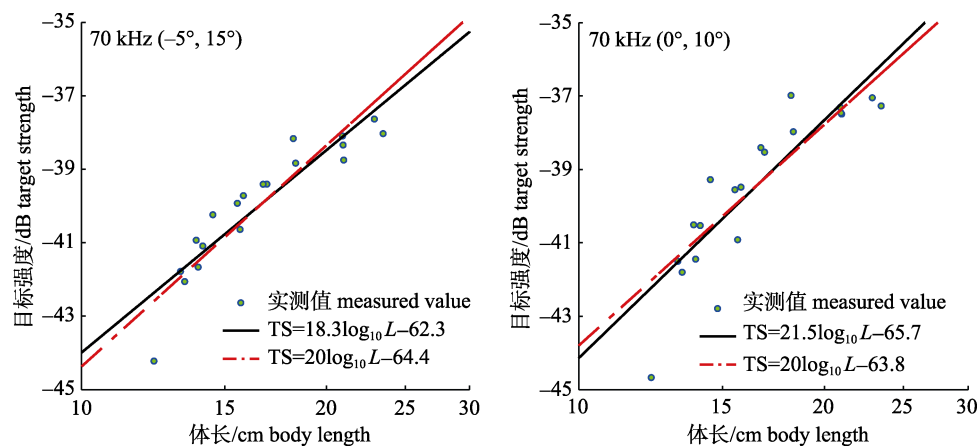


图 4 不同角度函数下 70 kHz 多鳞鳕目标强度与体长关系拟合曲线

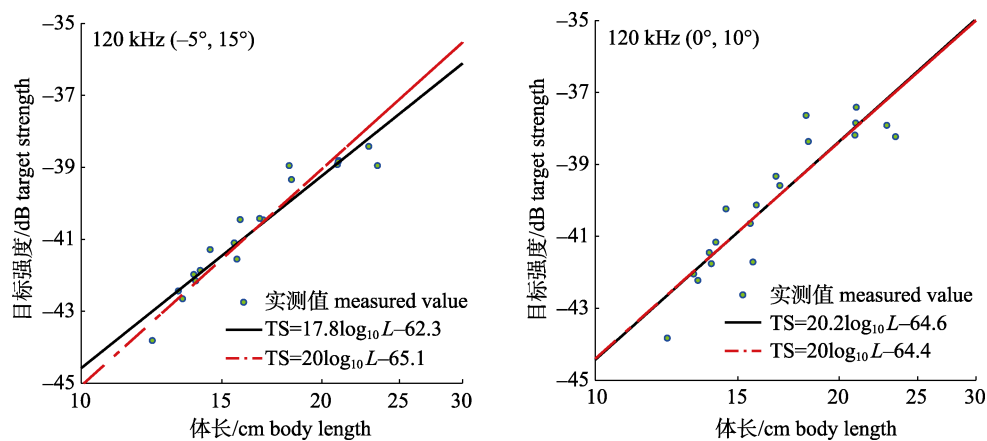
Fig. 4 Fitting curve of target strength of *Sillago sihama* with body length at 70 kHz and various angle functions

图 5 不同角度函数下 120 kHz 多鳞鳕目标强度与体长关系拟合曲线

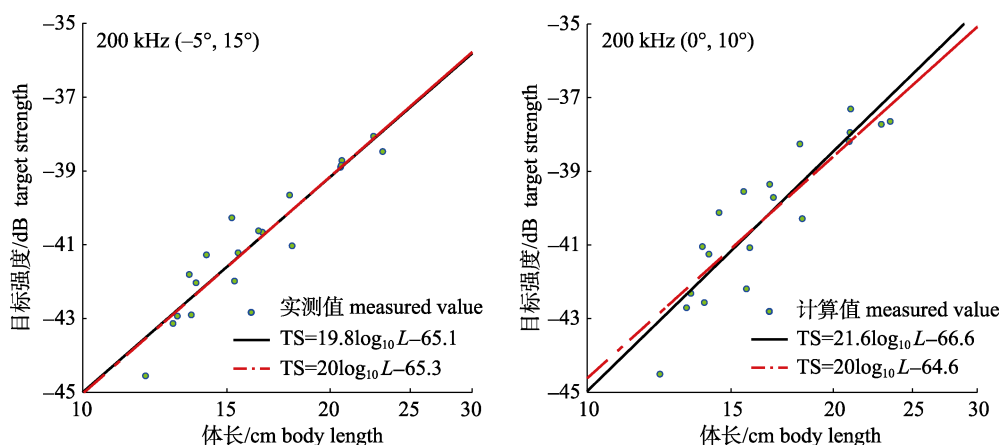
Fig. 5 Fitting curve of target strength of *Sillago sihama* with body length at 120 kHz and various angle functions

图 6 不同角度函数下 200 kHz 多鳞鳕目标强度与体长关系拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of target strength of *Sillago sihama* with body length at 200 kHz and various angle functions

3 讨论

3.1 多鳞鱖形态学参数的获取

利用模型法对鱼类目标强度进行测量研究的前提均是准确测定目标鱼类的鱼鳔形态, 本研究通过利用 X 光机对多鳞鱖进行 X 射线摄影获取其 X 光影像, 能够较为真实准确地反映鱼类的内部结构, 是鱼类目标强度模型法研究中常用的方法之一^[31-33]。在进行鱼类 X 光摄影之前应尽可能保证样品鱼的鲜度, 而所有样品均由现场采样获得, 渔获位置和实验现场存在一定距离, 在鱼类样品运送过程中鱼鳔结构可能发生形变甚至破损, 导致拍摄到的 X 光影像并非每张均可使用。本研究选取拍摄鱼鳔及鱼体轮廓较为清晰的 19 尾多鳞鱖样品的 X 光影像进行目标强度的相关研究, 以便准确测定用于鱼类目标强度计算的鱼体及鱼鳔结构参数, 这导致在进行多鳞鱖目标强度与体长关系拟合时数据量偏少, 因此在今后的研究中应

增加样品数量, 以获得更多可用于目标强度测量研究的鱼类 X 光影像。

在获得样品鱼类的 X 光影像后利用图像处理软件对多鳞鱖的形态学参数进行测量, 获得鱼体和鱼鳔的坐标参数以用于理论目标强度计算。图像处理软件提供的测量工具的测量精度可达 0.1 mm, 能够满足模型计算所需精度, 但基尔霍夫近似模型要求对鱼体和鱼鳔进行较为复杂的坐标测量, 测量误差会导致目标强度的计算偏差。此外, 鱼类样品均是在离水状态下进行 X 光摄影操作, 受外界压力变化影响, 鱼鳔体积可能发生不同程度的变化, 导致拍摄到的 X 光影像所表达的鱼体内部结构特征并非真实的鱼体结构, 同样会使模型计算结果出现偏差。尽管利用基尔霍夫近似模型对多鳞鱖目标强度进行测量研究存在上述问题, 但其仍能较好地反映多鳞鱖在不同声学频率下目标强度随姿态倾角和体长变化关系, 不失为一种有效研究鱼类目标强度特性的方法。

表 4 不同频率和角度函数下多鳞鱖目标强度与体长关系式
Tab. 4 Formula of target strength of *Sillago sihama* with body length at different frequencies and angle functions

频率/kHz frequency	角度函数(-5°, 15°) angle function of (-5°, 15°)		角度函数(0°, 10°) angle function of (0°, 10°)	
	拟合关系式 fitting formula	b ₂₀ 表式 b ₂₀ formula	拟合关系式 fitting formula	b ₂₀ 表式 b ₂₀ formula
70	TS=18.3log ₁₀ L-62.3	TS=20log ₁₀ L-64.4	TS=21.5log ₁₀ L-65.7	TS=20log ₁₀ L-63.8
120	TS=17.8log ₁₀ L-62.3	TS=20log ₁₀ L-65.1	TS=20.2log ₁₀ L-64.6	TS=20log ₁₀ L-64.4
200	TS=19.8log ₁₀ L-65.1	TS=20log ₁₀ L-65.3	TS=21.6log ₁₀ L-66.6	TS=20log ₁₀ L-64.6

3.2 多鳞鱖目标强度与姿态倾角分布的关系

许多研究^[34-35]均表明鱼类目标强度与姿态倾角分布存在密切关系, 故在目标强度测量时需考虑鱼类姿态倾角分布, 本研究基于基尔霍夫近似模型对每尾多鳞鱖样品在不同声学频率下目标强度随姿态倾角的变化关系进行统计分析, 结果表明: 70 kHz 下多鳞鱖目标强度最大值主要位于 -15°~5°, 120 kHz 和 200 kHz 下目标强度最大值则主要位于 -10°~0°, 且各频率下目标强度最大值出现的位置各不相同。鱼类在不同情境下会产生不同的行为, 而目前尚不清楚多鳞鱖在不同季节、时间(昼夜)的行为活动, 如产卵、摄食、躲避敌害、昼夜迁移等时的行为特征, 故本研究尚不能量化说明不同季节、时间多鳞鱖目标强度随姿态倾角分布变化的差异性, 对此有必要开展鱼类不同行

为活动下目标强度随姿态倾角变化的相关研究, 以提高目标强度测量的准确性, 为提高渔业资源水声学评估的准确度和可信度提供科学依据。

3.3 多鳞鱖目标强度与体长的关系

鱼类体长是表征鱼类个体大小的重要参量, 是影响鱼类目标强度大小的主要因素, 本研究对不同声学频率、角度分布函数下多鳞鱖目标强度与体长的相关关系利用最小二乘法进行线性拟合, 获得目标强度对体长的拟合方程, 并与采用 $TS = 20\log_{10}L - b_{20}$ 的常规表式进行对比分析, 结果表明: 多鳞鱖在角度函数为(-5°, 15°)、声学频率为 120 kHz, 以及角度函数为(0°, 10°)、声学频率为 200 kHz 2 种情况下目标强度对体长拟合方程与采用常规的 b_{20} 表式曲线基本重合, 拟合度较高, 可将常规的 b_{20} 表式直接用于多鳞鱖的资源

评估,而在其他几种情形下两种表式存在一定偏差,不宜将常规的 b_{20} 表式直接用于资源评估,采用直接拟合的参数方程更为恰当。

此外,通过对比分析发现在两种角度分布函数下多鳞鱈参考目标强度 b_{20} 均有随频率增大而减小的趋势,当角度函数为 $(-5^\circ, 15^\circ)$ 时,随着频率的增大 b_{20} 值依次减小 1.09% 和 0.31%; 当角度函数为 $(0^\circ, 10^\circ)$ 时,随着频率的增大 b_{20} 值依次减小 0.94% 和 0.31%, 两种角度分布函数下 b_{20} 值的变化程度均不大。

3.4 其他因素对多鳞鱈目标强度的影响

多鳞鱈属于有鳔鱼类,鱼鳔作为声波散射的主体占鱼类总体散射能力的 90%~95%^[36], 决定了目标强度的大小,因此能够影响到鱼鳔形态、大小的因素,如胃饱满度、性腺发育程度等均成为影响鱼类目标强度大小的重要因素。而本研究仅是将目标鱼类近似为简单的几何模型进行目标强度的测量研究,未考虑上述因素对鱼类目标强度的影响,故今后需开展多鳞鱈目标强度随其生理形态特征变化的相关研究工作,以得到更为准确的目标强度变化关系。

在利用基尔霍夫近似模型对多鳞鱈目标强度进行研究时使用的海水环境参数和海水鱼类声学参数并未进行实际测量,而是参考 Clay 等^[29] 对大西洋鳕(*Gadus morhua*)的测量结果,因此目标强度测量结果会存在一定偏差。此外,有研究表明鱼类目标强度与鱼类所处深度存在一定程度的依赖关系^[37-38],随着水深的增加鱼鳔所受压力增大导致体积减小,有效后向散射截面减小对应鱼类目标强度减小。本研究在利用模型法测量计算多鳞鱈目标强度时形态学参数是通过离水状态下拍摄目标鱼类的 X 光影像获得的,因此仅能代表海表层多鳞鱈的目标强度关系,而其目标强度随水深的变化关系需在今后的研究工作中开展。

致谢: 感谢中国水产科学研究院长江水产研究所的蔺丹清博士在模型使用及数据处理过程中提供的帮助,谨致谢忱!

参考文献:

[1] Chen Z C, Liu J X. South China Sea Economy Fish[M].

Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1982. [陈再超, 刘继兴. 南海经济鱼类[M]. 广州: 广东科技出版社, 1982.]

- [2] Zhan B Y. Fishery Resources Assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 236-253. [詹秉义. 渔业资源评估学. 北京: 中国农业出版社, 1995: 236-253.]
- [3] Koslow J A. The role of acoustics in ecosystem-based fishery management[J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(6): 966-973.
- [4] Zhang J, Chen P M, Fang L C, et al. Background acoustic estimation of fisheries resources in marine ranching area of Zhelin Bay-Nan'ao Island in the South China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(8): 1187-1198. [张俊, 陈丕茂, 房立晨, 等. 南海柘林湾—南澳岛海洋牧场渔业资源本底声学评估. 水产学报, 2015, 39(8): 1187-1198.]
- [5] Davison P C, Koslow J A, Kloser R J. Acoustic biomass estimation of mesopelagic fish: backscattering from individuals, populations, and communities[J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(5): 1413-1424.
- [6] Makarov M M, Degtev A I, Kucher K M, et al. Estimation of the abundance and biomass of the Baikalian omul by means of trawl-acoustic survey[J]. Doklady Biological Sciences, 2012, 447(1): 363-366.
- [7] Deshpande K, Kelkar N. Acoustic identification of *Otomops wroughtoni* and other free-tailed bat species (Chiroptera: Molossidae) from India[J]. Acta Chiropterologica, 2015, 17(2): 419-428.
- [8] Korneliussen R J. The acoustic identification of Atlantic mackerel[J]. ICES Journal of Marine Science, 2010, 67(8): 1749-1758.
- [9] Tang Y, Lin D, Zhang G, et al. Testing the tracking of behaviour of a caged *Takifugu rubripes* (Temminck & Schlegel, 1850) using acoustic telemetry[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2013, 29(6): 1456-1458.
- [10] Acolas M L, Anras M L B, Véron V, et al. An assessment of the upstream migration and reproductive behaviour of allis shad (*Alosa alosa* L.) using acoustic tracking[J]. ICES Journal of Marine Science, 2004, 61(8): 1291-1304.
- [11] Zhang J, Chen Z Z, Chen G B, et al. Hydroacoustic studies on the commercially important squid *Sthenoteuthis oualaniensis* in the South China Sea[J]. Fisheries Research, 2015, 169: 45-51.
- [12] Chen G B, Zhang J, Yu J, et al. Hydroacoustic scattering characteristics and biomass assessment of the purple back flying squid [*Sthenoteuthis oualaniensis*, (Lesson, 1830)] from the deepwater area of the South China Sea[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2013, 29(6): 1447-1452.
- [13] Tan X C, Kang M, Tao J P, et al. Hydroacoustic survey of fish density, spatial distribution, and behavior upstream and

- downstream of the Changzhou Dam on the Pearl River, China[J]. Fisheries Science, 2011, 77(6): 891-901.
- [14] MacLennan D N. Acoustical measurement of fish abundance[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 87(1): 1-15.
- [15] Fässler S M M, O'Donnell C, Jech J M. Boarfish (*Caprosaper*) target strength modelled from magnetic resonance imaging (MRI) scans of its swimbladder[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(7): 1451-1459.
- [16] Kang D, Hwang D. *Ex situ* target strength of rockfish (*Sebastes schlegeli*) and red sea bream (*Pagrus major*) in the Northwest Pacific[J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60(3): 538-543.
- [17] Chen G B, Li Y Z, Chen P M, et al. Measurement of single-fish target strength in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(4): 554-562.
- [18] Rose G A, Porter D R. Target-strength studies on Atlantic cod (*Gadus morhua*) in Newfoundland waters[J]. ICES Journal of Marine Science, 1996, 53: 259-265.
- [19] Robertis A D, Taylor K. *In situ* target strength measurements of the scyphomedusa *Chrysaora melanaster*[J]. Fisheries Research, 2014, 153: 18-23.
- [20] Zhao X, Wang Y, Dai F. Depth-dependent target strength of anchovy (*Engraulis japonicus*) measured *in situ*[J]. ICES Journal of Marine Science, 2008, 65(6): 882-888.
- [21] Zhao X. *In situ* target-strength measurement of young hairtail (*Trichiurus haumela*) in the Yellow Sea[J]. ICES Journal of Marine Science, 2006, 63(1): 46-51.
- [22] Demer D A. Validation of the stochastic distorted-wave born approximation model with broad bandwidth total target strength measurements of Antarctic krill[J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60(3): 625-635.
- [23] Stanton T K. Sound scattering by cylinders of finite length. III. Deformed cylinders[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1989, 86(2): 691-705.
- [24] Furusawa M. Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength[J]. Journal of the Acoustical Society of Japan (E), 1988, 9(1): 13-24.
- [25] Tang Y, Nishimori Y, Furusawa M. The average three-dimensional target strength of fish by spheroid model for sonar surveys[J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(6): 1176-1183.
- [26] Shang X M, Kong L M, Wu C W. On target strength of several important economic fishes[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(3): 636-641. [尚晓明, 孔令民, 吴常文. 三种东海重要经济鱼类目标强度随角度变化的椭球体模型及实验测定的研究[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 636-641.]
- Yu H Y, Zhao X Y. Modeling study on the target strength of anchovy (*Engraulis japonicus*)[J]. Applied Acoustics, 2007, 26(5): 267-276. [于海圆, 赵宪勇. 鳀鱼(*Engraulis japonicus*)目标强度的模型法研究[J]. 应用声学, 2007, 26(5): 267-276.]
- [27] Lin D Q, Shi W G, Tang Y. Measurements of the fish target strength with single and dual-chambered swimbladders by two acoustic modles[C]// Aquatic Science & Technology Forum in 2010. Beijing: Chinese Acadeing of Fishery Sciences, 2010. [蔺丹清, 施伟纲, 汤勇. 基于理论模型法测量单室鳔和两室鳔鱼类目标强度[C]// 2010 水产科技论坛, 北京: 中国水产科学研究院, 2010.]
- [28] Clay C S, Horne J K. Acoustic models of fish: The Atlantic cod (*Gadus morhua*)[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 96(3): 1661-1668.
- [29] Love R H. Dorsal-aspect target strength of an individual fish[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1971, 49(3): 816-823.
- [30] Yasuma H, Sawada K, Ohshima T, et al. Target strength of mesopelagic lanternfishes (family Myctophidae) based on swimbladder morphology[J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60(3): 584-591.
- [31] Sawada K, Ye Z, Kieser R, et al. Target strength measurements and modeling of walleye pollock and pacific hake[J]. Fisheries Science, 1999, 65(2): 193-205.
- [32] Kang D, Sadayasu K, Mukai T, et al. Target strength estimation of black porgy *Acanthopagrus schlegeli*, using acoustic measurements and a scattering model[J]. Fisheries Science, 2004, 70(5): 819-828.
- [33] Tomiyasu M, Kao W Y, Abe K, et al. The relationship between body angle and target strength of ribbonfish (*Trichiurus japonicus*) displaying a vertical swimming motion[J]. ICES Journal of Marine Science, 2016, 73(8): 2049-2057.
- [34] Yoon E, Hwang D, Miyuki H, et al. *Ex situ* acoustic target strength by tilt angle and pulsation of moon jellyfish (*Aurelia aurita*) using frequency 70 kHz[J]. Journal of the Korean Society of Fisheries Technology, 2015, 51(3): 295-301.
- [35] Foote K G. Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: A comparison of gadoid and mackerel target strengths[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 67(6): 2084-2089.
- [36] Bernasconi M, Patel R, Nøttestad L, et al. The effect of depth on the target strength of a humpback whale (*Megaptera novaeangliae*)[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(6): 4316.
- [37] Mukai T, Iida K. Depth dependence of target strength of live kokanee salmon in accordance with Boyle's law[J]. ICES Journal of Marine Science, 1996, 53(2): 245-248.

Modeling study on the target strength of *Sillago sihama*

LI Bin^{1,2}, CHEN Guobao^{1,3}, ZENG Lei^{1,3}, WANG Zhichao^{1,2}

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

2. College of Marine Sci-Tech and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

3. Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources & Environment, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510300, China

Abstract: Measurement of fish target strength is one of the core components of fisheries hydroacoustics. Research focused on offshore fish in the South China Sea has not met the needs of fisheries-resource estimations. As a typical offshore fish, little is known about the target-strength characteristics of *Sillago sihama*. To understand the target-strength characteristics of *S. sihama*, a Kirchhoff ray-mode approximation was used to calculate the theoretical target strength of 19 *S. sihama* samples and the morphological parameters, calculated using a model of the fish, were obtained using an X-ray machine (SOFTEX M-100) belonging to the South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences. The changes in patterns of target strength of *S. sihama* with tilt angle were obtained by calculating programmatically at different frequencies. The empirical formulas of target strength of *S. sihama* with body length were established for different frequencies and the distribution function of the tilt angle was produced using a data-fitting method, and compared with the conventional b_{20} expression. The results show that the various patterns of target strength of *S. sihama*, with tilt angle at 70 kHz, 120 kHz, and 200 kHz, show multiple-peak-like distributions, and the variation of target strength with the tilt angle is more sensitive at higher frequencies. As the number of crests increased, the maximum target strength corresponding to the tilt angle increased. Maximum target strength of *S. sihama* occurs between -15° and 5° at 70 kHz, and the maximum target strength appears between -10° to 0° at 120 kHz and 200 kHz. The position of maximum target strength occurred differently at each frequency. The varying characteristics of target strength of *S. sihama* with body length changed under different frequencies and distribution functions of the tilt angle. When the angle function is $(-5^\circ, 15^\circ)$, frequency is 120 kHz, and when the angle function is $(0^\circ, 10^\circ)$, frequency is 200 kHz, the empirical formula and the conventional b_{20} expression curve of target strength with body length coincide, the degree of fit is higher, and the conventional b_{20} formula can be used directly for resource assessment of *S. sihama*. In other cases, there are some deviations in the two formulas, and the direct fitting parameter equation is more appropriate. The study confirms that the Kirchhoff ray-mode approximation can reflect the target-strength characteristics of *S. sihama*, providing a useful reference for the study of target strength of inshore fish in the South China Sea and a scientific basis for improving the accuracy and credibility of hydroacoustic assessment of fisheries resources.

Key words: target strength; *Sillago sihama*; tilt angle; the Kirchhoff ray-mode approximation

Corresponding author: CHEN Guobao. E-mail: chenguobao@scsfri.ac.cn