

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19009

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

谢晓^{1,2}, 张辉^{1,2}, 孙立元^{1,2}, 蔡志宇^{1,2}, 王恒^{1,2}, 霍来江^{1,2}, 危起伟^{1,2}

1. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223;
2. 华中农业大学水产学院, 湖北 武汉 430070

摘要: 目标强度(target strength, TS)是将回波积分值转换成绝对资源量的关键参数, 同时也是渔业声学技术的热点研究内容。2012年12月及2013年6—7月, 在三峡水库中华鲟基地网箱内使用BioSonics DT-X(199 kHz)分裂波式科学回声仪测定了4种共计31尾不同鳔室构造和体型的长江淡水鱼类背腹方向的目标强度, 并将此结果与基尔霍夫近似模型法测定结果进行比较。实验鱼包括鳊(*Parabramis pekinensis*)6尾、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)8尾、鲇(*Silurus asotus*)10尾及长江鲟(*Acipenser dabryanus*)7尾。结果表明, 模型法测定结果与网箱控制法所测结果无显著性差异。构建4种鱼TS值(dB)与体长(BL, cm)的标准方程分别为鳊: $TS=20\lg(BL)-70.1$ ($R^2=0.94$); 鲢: $TS=20\lg(BL)-67.0$ ($R^2=0.80$); 鲇: $TS=20\lg(BL)-74.5$ ($R^2=0.80$)及长江鲟: $TS=20\lg(BL)-66.1$ ($R^2=0.94$)。模型法获得实验鱼目标强度的分布表明, 鱼类不同的形态学特征及鳔室数量会影响目标强度的大小与分布特征。低频(38 kHz)下鳊、鲇及长江鲟目标强度最大值对应的姿态倾角出现在 $-10^\circ\sim 0^\circ$, 而鲢目标强度最大值出现在 $-20^\circ\sim -10^\circ$, 且不同种类鱼的目标强度最大值所对应姿态倾角的位置各不相同。本研究通过网箱控制法和模型法测定了4种不同鳔室构造和体型的长江淡水鱼类目标强度, 可为长江淡水鱼类目标强度研究提供有益借鉴, 为采用渔业声学方法进行长江淡水鱼类垂直原位监测评估资源量提供相关参数。

关键词: 目标强度; 资源评估; 长江; 淡水鱼类; 网箱控制法; 基尔霍夫近似模型; 渔业声学
中图分类号: S931 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8737-(2020)05-0536-11

在渔业资源评估方法的选择上, 相比于传统的渔获物调查法, 渔业声学调查法能覆盖更多的水体体积, 具有快速、连续、无伤害及投入小等优势, 受到全球范围内的关注^[1-2]。在水域环境方面, 渔业声学技术广泛应用于海洋^[3-4]、河口^[5]、河流^[6-8]、湖泊^[9]及水库^[10-11]渔业资源监测; 此外, 在鱼类行为^[12-13]、鱼种鉴定^[14]、大坝过鱼设施效果评估^[15]、重要经济鱼类^[16-17]和珍稀濒危鱼类繁殖群体监测^[18-19]等方面有大量应用。

目标强度(target strength, TS)是描述作为声散射体对声波反射能力的物理量, 是将声散射积分值转化成绝对资源量的关键参数, 同时也是渔业

声学技术的热点研究内容。目前, 全球已标定目标强度的淡水鱼类仅数十种, 且大多集中在具商业价值的品种, 尤其是鲑科类(salmonids)、鲤科类(cyprinids)、鲈类(percids)、胡瓜鱼类(osmerids)及鲱类(clupeids), 占该领域已发表文献数量的85%, 具有不同鳔室结构和体型特征的鱼类很少被关注。而基于不同鱼体结构等因素对声波反射的差异特征是运用声波对鱼类进行鉴别的基础, 也是未来渔业声学发展的方向^[20]。国际上鱼类目标强度研究起步较早, 但研究鱼类的种类比较有限, 特别是应用在实际资源评估中。中国情况更加复杂, 主要体现在多鱼种混栖, 为资源监测和

收稿日期: 2019-01-08; 修订日期: 2019-11-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31711540294, 51641909, 31602160 和 31772854); 中国水产科学研究院基本科研业务费资助项目(2018JBF16); 农业部财政专项子课题“长江中游渔业资源与环境调查”(CJDC-2017-14).

作者简介: 谢晓(1988-), 男, 博士研究生, 专业方向为渔业资源. E-mail: xiexiao5@163.com

通信作者: 危起伟, 研究员, 研究方向为鱼类生态与资源保护. E-mail: weiqw@yfi.ac.cn

评估增加了难度,也对鱼类目标强度研究提出了更高的要求^[21-22]。为促进渔业声学技术在我国的发展和运用,开展目标强度这一基础研究成为当务之急。

根据被研究对象所处的状态,目标强度的测定方法可分为原位测定法(*in situ*)^[23-28]和非原位测定法(*ex situ*)。非原位测定法又可细分为绳系法^[29-30]、网箱控制法^[3, 31]及模型法^[32-35]等。模型法主要有球体模型(sphere)、有限圆柱体模型(an finite chlinder)、畸形圆柱模型(deformed cylinder model, DCM)和基尔霍夫近似模型(the Kirchhoff ray-mode approximation model, KRM)。模型法的基本原理为将影响目标强度的因素(鳔和鱼体的生物学结构、体型及声波入射角度等)作为参数,运用相关声波散射原理来进行计算。相比于其他模型法,基尔霍夫近似模型能够很好地反映鱼的目标强度特征,在国外有着广泛的研究,而国内研究的并不多^[32, 35-39]。目前,内陆水体目标强度的测定常采用单一的方法,而采用模型法对实测法结果进行比较的研究极少,两种方法结合使用能够提高鱼类目标强度测定结果的准确性。

基于长江淡水鱼类鳔室数量、骨板有无、栖息类型及形态学特征,选取代表性种类鳊(*Parabramis pekinensis*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鲇(*Silurus asotus*)和长江鲟(*Acipenser dabryanus*)作为实验对象,使用网箱控制法进行现场测定,同时采用模型法对实测结果进行比较,尝试建立以上 4 种鱼目标强度与其生物学参数的回归关系,并研究不同鳔室结构、身体构造及声波入射角度等因素对目标强度的影响,旨在丰富长江淡水鱼类目标强度数据资料,为采用渔业声学方法进行长江淡水鱼类垂直原位监测评估资源量提供可供参考的相关参数。

1 材料与方 法

1.1 网箱控制法

1.1.1 实验平台 实验水域选在湖北省宜昌市三峡库区(三峡大坝上游约 5 km)的中华鲟养殖网箱基地(30°52.1310'N, 110°58.8554'E),该水域水深 60~80 m,水流速 0.01 m/s,网箱离岸约 300 m。实

验网箱规格 4.5 m×4.5 m×15 m(长×宽×深),网目(2a=12 mm),换能器发射的声波在网箱底部(15 m),波束直径约为 1.78 m(小于网箱宽度 4.5 m),故网箱四周网衣对声波信号无干扰。网衣底部四角悬挂 10 kg 的铅球,确保网衣竖直。实验装置及实验鱼回波图(示例长江鲟)如图 1 所示。

1.1.2 实验鱼的选择与来源

鳊: 体长为体高的 2.3~3.0 倍,体高,甚侧扁,呈长菱形。鳔 3 室,中室最大,后室小而末端尖。栖息于水体的中下层,广布性种类。

鲢: 体长为体高的 2.7~3.6 倍,体侧扁,稍高,腹部扁薄。鳔大,2 室,前室长而膨大,后室锥形,末端小。分布极广,栖息于江河干流及附属水体的上层。广布性种类。

鲇: 体长为体高的 4.3~6.1 倍,体延长。鳔 1 室,心形。栖息于水体底层,广布性种类。

长江鲟: 体长为体高的 6.0~9.9 倍,体长,呈梭型。鳔 1 室,体具 5 行骨板。

实验于 2012 年 12 月及 2013 年 6—7 月开展。鳊和鲢由定制刺网和板罟采集于三峡库区。长江鲟随机取自中华鲟基地网箱,鲇购买自临近养殖户。

1.1.3 数据获取 使用 BioSonics DT-X 分裂波式科学回声仪(BioSonics INC, USA)应用网箱控制法测定 TS 值,该仪器相关参数见表 1。

换能器固定于自制金属浮筒,由两根从网箱对角线发出的绳索将浮筒置于网箱正中央,换能器入水 0.45 m,朝向垂直向下(图 1)。使用 13.7 mm 标准铜球对仪器进行校准,铜球参考目标强度值为-45 dB(图 2)。

实验前,挑选不同大小规格且体表无明显伤痕的实验鱼暂养于备用网箱中 2 周以上,然后转入实验网箱中适应至少 12 h。实验过程中,每次测定 1 尾。由于换能器声波束覆盖水体体积小,实验鱼自由游入声波束内的概率低,故每尾实验鱼测定耗时 24~72 h,尽可能采集多的鱼类回波信号。测定后,使用 MS-222 (Sigma)对实验鱼进行麻醉处理,测量其全长(mm)、体长(mm)和体重(g),部分实验鱼进行 X 光拍照,用于模型法计算。

实验期间,水银温度计读取水温范围为 14.2~

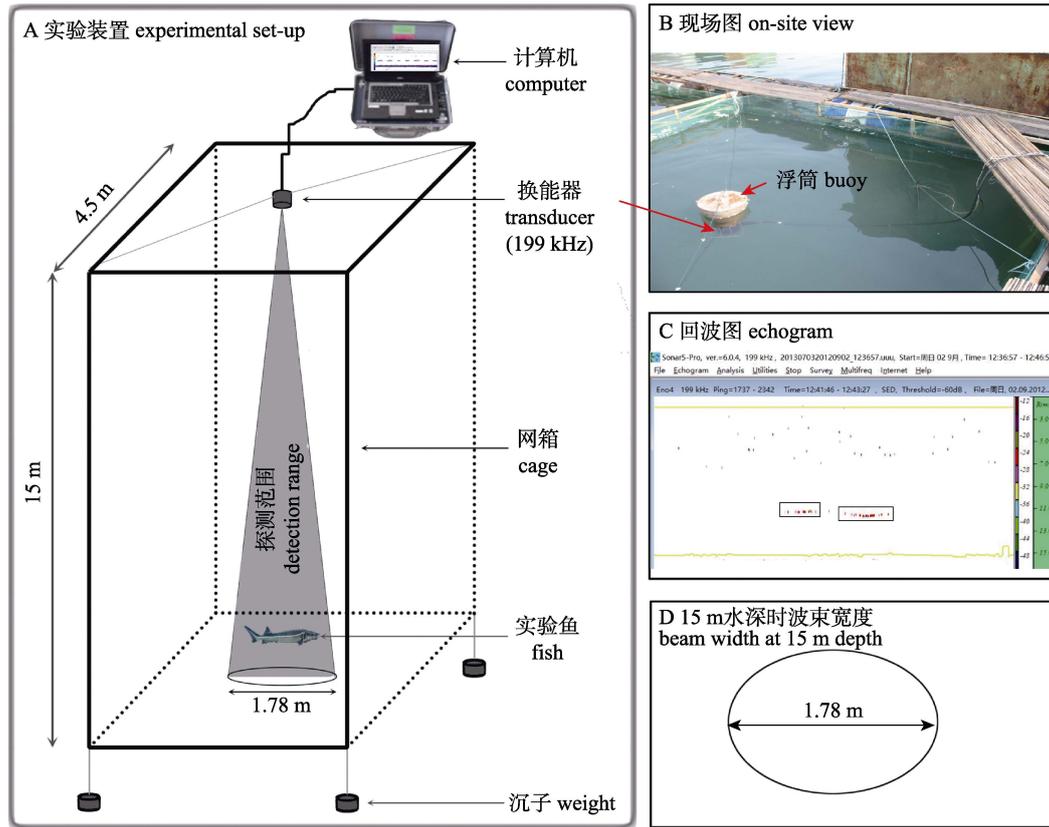


图 1 实验装置(A)及长江鲟的回波测定(B, C, D)
 Fig. 1 Experimental set-up (A) and echogram of *Acipenser dabryanus* (B, C, D)

表 1 换能器及单体检测参数设置

Tab. 1 The system parameters of the transducer and the value setting of Sonar-5 Pro parameters for single target detection

参数 parameter	值设置 value setting
BioSonics DT-X 科学回声仪测量参数 BioSonics DT-X scientific echosounder	
声源级 source level	220.4 dB μ pa
接收灵敏度 receive sensitivity	-53.1 dB μ pa
工作频率 acoustic frequency	199 kHz
脉冲宽度 pulse duration	0.1 ms
采样率 ping rate	5 ping/s
声速 sound speed	1462.33-1501.90 m/s
吸收系数 absorption coefficient	7.16-10.56 dB/km
换能器参数	
双向波束角 two-way beam angle	-21.1°
采样阈值 data collection threshold level	-130 dB
波束宽度 beam width	6.7° \times 6.7°
单体检测参数	
SED 回波阈值 TS threshold	-70 dB
时变增益 TVG	40logR (R 为目标信号水深)
最小回波长度 minimum echo length	0.80 rel. pw
最大回波长度 maximum echo length	1.30 rel. pw
最大增益补偿 maximum gain comp.	3.00 dB
最大时相偏差 maximum phase dev.	0.3 deg

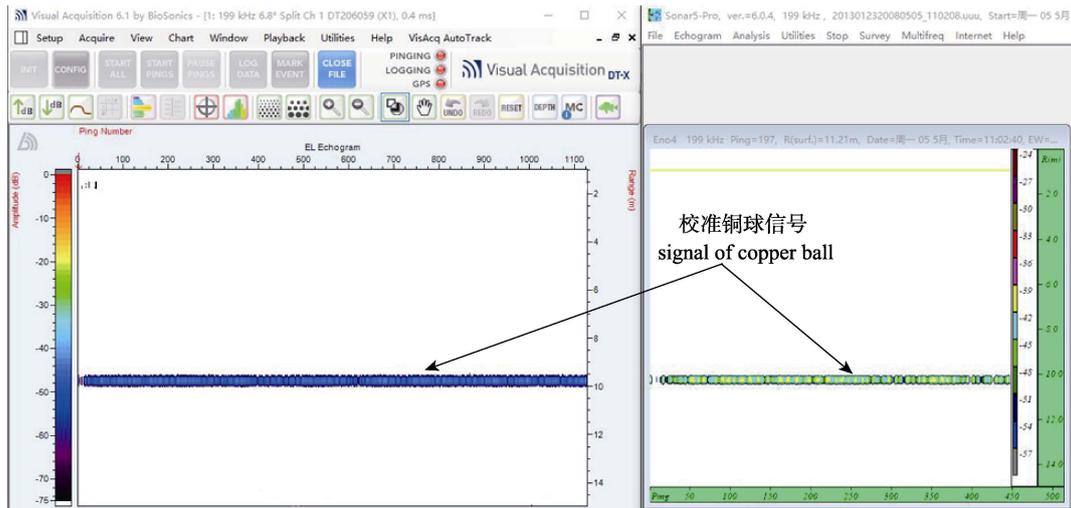


图 2 校准铜球回波映像

Fig. 2 Target strength echogram of copper ball for calibration

26.8 °C, 盐度计(台湾衡欣, 型号 AZ8371)读取盐度为(0.17±0.03) mg/L。

1.1.4 数据处理与分析 使用 Sonar-5 Pro 软件(University of Oslo, Norway; 版本 6.0.4)对采集的声学数据进行处理。流程为: (1) 将原始数据(.dt4 格式)转化为软件能处理的格式(.uuu 格式); (2) 设置表层和底层 2 条线来屏蔽掉近场(near field)回波以及网箱底部盲区(dead zone), 近场设定为 2 m, 底部盲区为 0.5 m; (3) 进行单体检测(single target detection), 相关参数设定见表 1; (4) 导出单个体实验鱼的数据结果如波束补偿目标强度(mean TS_c)、未补偿的目标强度(mean TS_u)、目标所在水深(depth)等数据; (5) 将 Sonar-5 Pro 软件输出的单体鱼 TS 值换算为反向散射截面(average of the backscattering cross-sections, σ), 然后计算平均目标强度(mean target strength, \overline{TS})^[1]。

计算公式如下:

$$\sigma = 10^{(TS/10)} \quad (1)$$

$$\overline{\sigma}_{bs} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_N}{N} \quad (2)$$

$$\overline{TS} = 10 \lg(\overline{\sigma}_{bs}) \quad (3)$$

式中, σ_{bs} 为目标物体对声波的反向散射截面强度, 即为 TS 的线性值, 与目标物线性长度的平方相关, N 为目标信号的数量。

数据统计分析和制图使用软件 IBM SPSS Statistics 22 (IBM, USA)和 OriginPro 2016 (Ori-

ginLab, USA)。

1.2 模型法

1.2.1 基尔霍夫近似模型 基尔霍夫近似模型假设鱼体在任意界面的每个点的声波反射(例如在任意闭合曲面上的密度不连续)与来自于无限的切向界面的无限平面波相同。对有鳔鱼类而言, 鱼的声散射包括鱼鳔散射和鱼体散射, 而相较于与水介质声阻抗相近的鱼体而言, 充气的鱼鳔相对于水介质的声阻抗较大, 即鱼鳔对声散射的贡献率最大, 超过 90%^[40]。基尔霍夫近似模型是沿着鱼体和鱼鳔的轮廓等距离垂直切片, 将鱼体的每一部分切片当成是一系列充满液体的不规则柱体的组合体, 而把鱼鳔的每一部分切片当成是一系列充满气体的不规则圆柱的组合体, 分别计算出两者目标强度进行叠加, 得出鱼类整体目标强度。计算公式主要参考文献[35-36]。

1.2.2 数据获取 实验鱼生物学参数获取于鱼类 X 光影像。本次实验使用 X 光机(Dongfang 500 mA, 上海)对实验鱼体侧向和背腹向分别拍摄 X 光影像。根据基尔霍夫近似模型需要, 在 Photoshop CS5 软件(Adobe, USA)中对所拍摄实验鱼 X 光影像进行等距离切片, 并测定每切片与鱼体(鱼鳔)相关点坐标(图 3), 代入 Matlab R2016a 软件(MathWorks, USA)编程进行 TS 值计算, 程序代码来源于文献[41]。入射声波倾角选择清晰度较高的 -50°~50°, 来研究该范围内 TS 值随不同

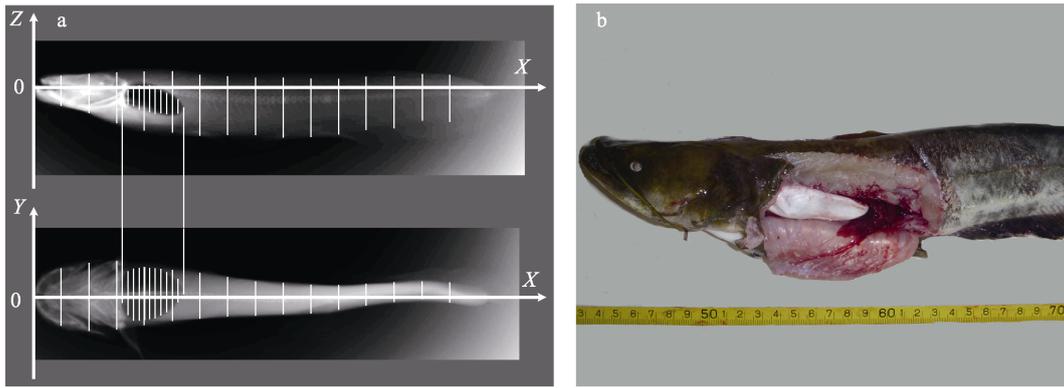


图 3 实验鱼(鱼体和鱼鳔)X 光影像及切片划分坐标(鱼体侧面为 x-z 轴;背面为 x-y 轴)示意图

a. 鲇的 X 光影像; b. 鲇的解剖图。

Fig. 3 The coordinates of slices of fish body and swimbladder in lateral (x, z) and dorsal (x, y) aspect by using the X-ray images
a. X-ray image of *Silurus asotus*. b. Anatomy image of *Silurus asotus*.

声波入射角度的变化(入射声波与鱼体垂直方向为 0° , 鱼头朝上的姿态为正)。鱼体姿态倾角 ζ 分布函数参考 Furusawa^[38], 淡水与淡水鱼体(鱼鳔)典型声学参数参考 Clay 等^[35]。水体声速计算所需的水温、盐度等参数与网箱控制法现场测定数据一致。

2 结果与分析

2.1 4 种鱼生物学特征

根据 4 种实验鱼(鳊、鲢、鲇和长江鲟)的生物学资料, 经点图分析, 其体重(W)与体长(L)呈幂函数关系, 符合 $W=a \times L^b$ 的规律, 且拟合度较好(图 4)。由于实验组鲇取自养殖网箱, 可能在解剖学上与长江野生个体有差异, 选取 186 尾野生鲇(未发表数据)作为对照组进行生物学特性比较, 比较指标为体长-体重关系曲线及肥满度。

两组鲇体长-体重曲线关系为:

$$\text{实验组(养殖)鲇: } W=0.0163L^{2.8579}, R^2=0.9941$$

$$\text{对照组(野生)鲇: } W=0.0126L^{2.9294}, R^2=0.9834$$

式中, W 为鱼体重(g), L 为鱼体体长, a 、 b 为参数, R 为体重与体长的相关系数。

此外, 实验组(养殖)鲇与对照组(野生)鲇的肥满度计算公式参考黄祥飞^[42]:

$$K = W/L^3 \quad (4)$$

式中, K 为肥满度系数(%), L 为体长(cm); W 为体重(g)。

实验组鲇的肥满度为 0.61%~1.05%, 对照组

为 0.62%~1.70%。采用独立样本 T 检验对两组鲇肥满度进行统计分析, 结果表明二者无显著性差异($df=194, P>0.05$)。由于缺少野生长江鲟生物学数据, 故未对实验组长江鲟(养殖)与野生群体做对比分析。

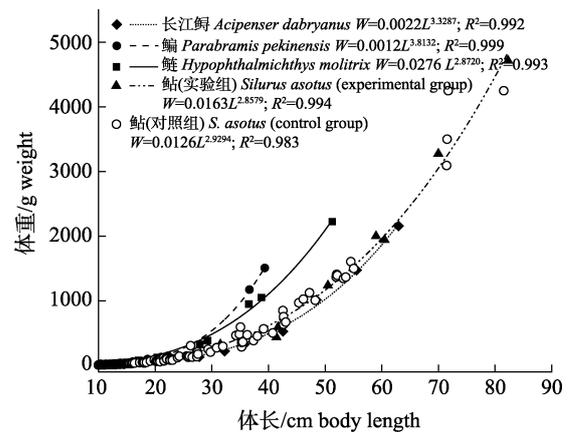


图 4 4 种鱼体长与体重的关系曲线

Fig. 4 Relationship between the length and the body weight of 4 fish species

2.2 网箱控制法测定实验鱼平均 TS 值与生物学指标的关系

采用网箱控制法对 4 种不同生物学特征鱼类 TS 值进行标定, 实验鱼相关生物学参数与标定结果见表 2。

鳊共计标定 6 尾, 体长范围 19.2~39.5 cm, 体重范围 65~1512 g; 目标强度(TS, dB)与体长(BL, cm)的标准方程为 $TS=20lgBL-70.1$ ($R^2=0.94$)。

表 2 鱼类体长(BL, cm)/全长(TL, cm)与目标强度 TS 的回归方程
Tab. 2 Regression analyses of mean target strength and fish body length (BL, cm)/total length (TL, cm)

鱼种 species	体长范围/cm body length range	尾数 number	TS ₁ =m ₁ lgBL+b ₁			TS ₂ =20lgBL+b ₂		TS ₃ =m ₂ lgTL+b ₃			TS ₄ =20lgTL+b ₄	
			m ₁	b ₁	SE	b ₂	SE	m ₂	b ₃	SE	b ₄	SE
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	16.2~39.5	6	26.4	-79.1	4.2	-70.1	1.3	26.0	-80.1	4.4	-71.4	1.2
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	17.1~51.3	8	19.6	-66.5	5.9	-67.0	1.4	19.7	-67.8	5.9	-68.3	1.3
鲇 <i>Silurus asotus</i>	26.7~82.3	10	20.0	-74.4	5.4	-74.5	1.3	20.2	-75.5	5.8	-75.1	1.4
长江鲟 <i>Acipenser dabryanus</i>	28.0~63.2	7	27.8	-78.8	4.5	-66.1	1.2	28.3	-82.3	5.7	-68.0	1.3

注: SE 为标准误。

Note: SE denotes the standard error.

鳊共计标定 8 尾, 体长范围 17.1~51.3 cm, 体重范围 78~2223g; 目标强度(TS, dB)与体长(BL, cm)的标准方程为 TS=20lgBL-67.0 (R²=0.80)。

鲢共计标定 10 尾, 体长范围 26.7~82.3 cm, 体重范围 59~4716g; 目标强度(TS, dB)与体长(BL, cm)的标准方程为 TS=20lgBL-74.5 (R²=0.80)。

长江鲟共计标定 7 尾, 体长范围 28.0~63.2 cm, 体重范围 127~2150 g; 目标强度(TS, dB)与体长(BL, cm)的标准方程为 TS=20lgBL-66.1 (R²=0.94)。

2.3 模型法测定结果

选取不同体长规格的鲇 3 尾、鲢 2 尾、鳊 1 尾及长江鲟 1 尾, 采用基尔霍夫近似模型进行目标强度的模型法计算。其中鲇、鲢及鳊为网箱控制法测定过的实验鱼, 而该尾长江鲟为补充拍摄的 X 光影像, 未进行网箱控制法测定, 其数据仅用于分析不同鳔室结构的实验鱼在 38 kHz 换能器频率下 TS 值随声波角度的变化(图 5)。200 kHz 频率下模型法与网箱控制法 TS 值测定结果见

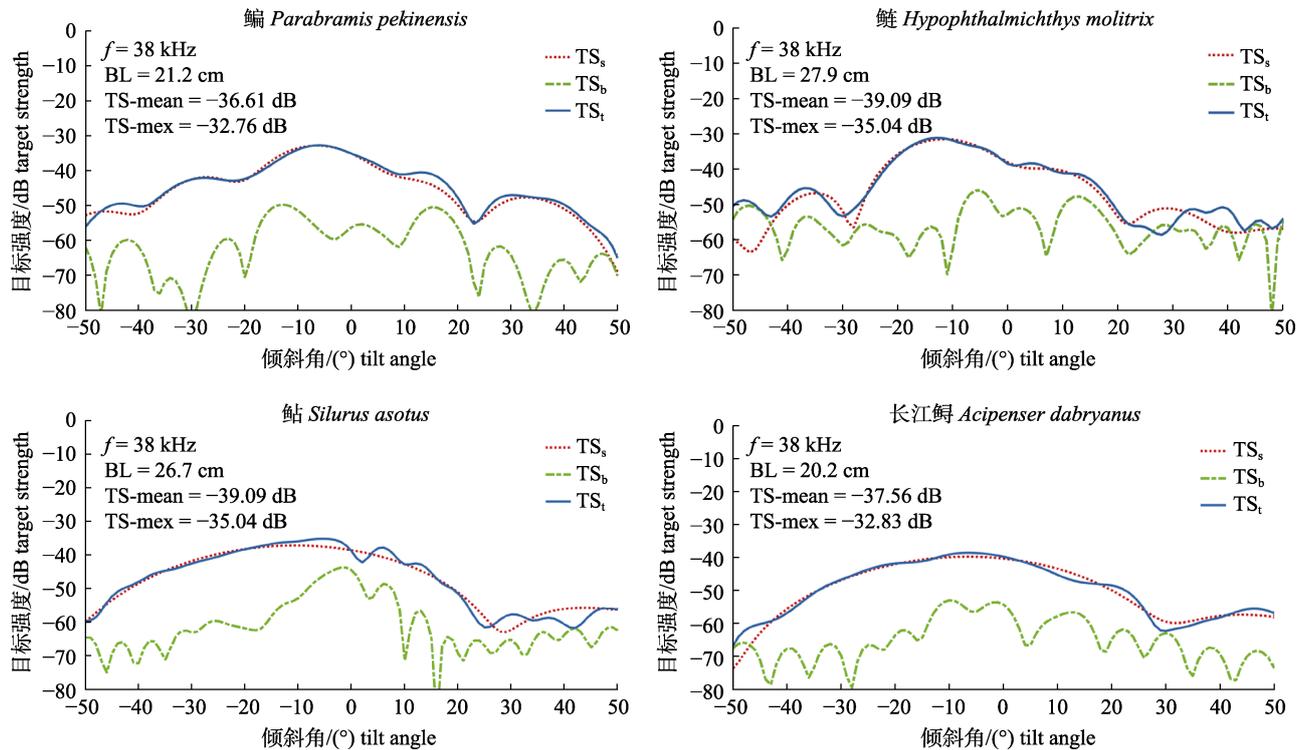


图 5 4 尾不同鳔室结构的实验鱼在 38 kHz 换能器频率下目标强度(TS)值随声波角度变化图
TS_t为鱼整体目标强度, TS_s为鱼鳔目标强度, TS_b为鱼体目标强度, BL 为鱼体体长, f 为换能器频率。

Fig. 5 Target strength (TS) patterns of four fish species under echosounder with 38 kHz
TS_t means TS of the whole fish; TS_s means TS of the swimbladder; TS_b means TS of the fish body;
BL means body length; f means the frequency of echosounder.

表 3。其中,对于较大全长的鲇和鳊,网箱控制法测定的 TS 值明显小于模型法测定的结果,如全长为 86.2 cm 的鲇,网箱控制法测定的 TS 值为 -29.09 dB,明显小于模型法测定的 -25.72 dB;全

长为 24.5 cm 的鳊,网箱控制法测定的 TS 值为 -43.81 dB,明显小于模型法测定的 -36.61 dB。将网箱控制法与模型法测定的实验鱼 TS 值进行配对样本 T 检验,结果显示差异不显著($P>0.05$,表 4)。

表 3 进行 X 光拍照的实验鱼平均目标强度值
Tab. 3 The mean target strength (TS) of fishes in X-ray images

鱼种 species	全长/cm total length, TL	体长/cm body length, BL	体重/g body weight, W	网箱控制法平均 TS 值/dB mean TS in cage method	模型法平均 TS 值/dB mean TS in model method
鲇 <i>Silurus asotus</i>	86.2	82.3	4716	-29.09	-25.72
	54.5	50.5	1238	-33.71	-33.19
	28	26.7	159	-40.67	-40.30
鳊	31.8	27.9	326	-39.14	-40.30
<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	19.6	17.1	78	-43.46	-42.45
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	24.5	21.2	153	-43.81	-36.61

表 4 实测值与模型值配对样本 T 检验结果
Tab. 4 Paired T test results of measurement TS values and calculated results by model

实测值与模型值差值 difference between the result of the cage method and model method			差值的 95%置信区间 95% confidence interval for the difference		t	自由度 degree of freedom	显著性 sig.	相关系数 correlation coefficient, R^2
平均值 mean	标准差 standard deviation	标准差 deviation	下限 lower limits	上限 upper limits				
-1.89	2.99	2.99	-5.02	1.25	-1.55	5	0.18	0.89

选取体长接近的 4 种实验鱼,绘制平均 TS 值随声波入射角度变化的分布图,以观察不同鳃室数量与结构差异对 TS 值的影响(图 5)。因频率越高,TS 值会呈现出多波峰的特性,为更加清晰地观测 TS 值随声波入射角度的变化,特选择低频率 38 kHz,声波入射角度选择常规状态下的 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 范围。图 5 中 TS_s 、 TS_b 和 TS_t 分别指代鱼鳃、鱼体及鱼体、鱼鳃叠加随声波入射角度变化曲线。由图可知, TS_s 与 TS_t 两条曲线几近重叠,印证了鳃是鱼的声散射主体,同时也是声学回波散射强度的主要贡献因子。长江鲟、鲇和鳊的目标强度最大值对应的姿态倾角主要位于 $-10^\circ \sim 0^\circ$,且集中在 -8° 左右,鳊、鲇的 TS 值最大值对应的姿态倾角分别集中于 -7° 和 -5° 左右,而鳊 TS 值最大值对应的姿态倾角位于 $-20^\circ \sim -10^\circ$,集中于 -13° 左右。

3 讨论

3.1 网箱控制法与基尔霍夫近似模型法结果的比较

本研究在自然水体采用网箱控制法对具有代

表性的 4 种长江鱼类 TS 值进行现场测定,鱼体能够自由游动,接近于自然环境。基尔霍夫近似模型能够很好地反映鱼的目标强度特征,且不受实验场地条件的限制,越来越受到重视^[43]。对淡水鱼类而言,同时采用网箱控制法和基尔霍夫近似模型法测定鱼类目标强度的研究较少。本研究结果中,网箱控制法测定较大个体的鲇和鳊的 TS 值要明显大于模型法计算的结果,产生的原因可能是在网箱控制法实验条件下,换能器产生的波束覆盖水体体积小,鱼体不完全处于声波束内而造成较小的 TS 值。此外,相对于鳊,在进行背腹向 X 光拍摄时,鲇和鳊腹部柔软,其鳃更容易受挤压造成更大的表面积,致使模型法计算时产生较大的 TS 值。总体上,基尔霍夫近似模型所测结果与网箱实测结果间无显著性差异,表明两种方法相结合适合于长江淡水鱼类目标强度的标定。

3.2 鱼体构造对目标强度的影响

目标强度主要受作为声散射体的鱼体各组织、器官的声学特性及影响鱼体反向散射特征鱼类行为的影响。前者主要包括鱼体的骨骼、肌

肉、内脏及有鳔鱼类的鳔, 后者主要包括鱼类的倾角分布^[1]。对有鳔鱼类而言, 鳔是鱼类反射声波的主要器官, 90%~95%的反射声能来自鳔的贡献^[40]。根据本研究 4 种鱼类 TS 值的实测结果, 比较相同体长实验鱼对应 TS 值大小顺序为: 长江鲟>鲢>鳊>鳙(表 2)。有研究表明, 对于体长相近的单鳔室鱼类与两鳔室鱼类, 单鳔室鱼类的 TS 值均小于两鳔室鱼类^[32], 与本研究中相同体长条件下鳙(单鳔室)平均 TS 值小于鲢(两鳔室)相一致。然而, 另一方面, 同为单鳔室的长江鲟 TS 值要大于两鳔室的鲢, 其原因可能是长江鲟较大的鳔体积或者其具有骨板这一特殊的构造, 能反射更多的声波能量。甚至, 同为单鳔室的长江鲟和鳙的 TS 值相差最大, 其原因值得深入研究。

目标强度测定的模型法结果(图 5)中可知, TS_s (鱼鳔 TS 值)与 TS_t (鱼鳔与鱼体叠加的 TS 值)两根曲线几近重叠, 鱼鳔 TS 值在鱼常态分布的倾角范围内明显大于鱼体 TS 值(TS_b), 验证了鱼鳔是鱼的声散射主体, 是鱼声散射能量的最主要的贡献因子。鱼类 TS 值受鱼体相对于入射声波的姿态倾角所影响, 由姿态倾角变化造成的 TS 值的差异达 30 dB^[44], 本研究模型法的结果支持该结论(图 5)。鱼类 TS 值与鱼体体型有关。本研究中鳊和鳙两种有鳔鱼类的目标强度标准方程中 b_{20} 值均小于 -68 dB, 类似的结果也存在于许氏平鲈(*Sebastes schlegeli*)和真鲷(*Pagrus major*)^[45]。鳊和鳙较低的 b_{20} 值可能与其体型有关, 有研究发现, 与鞭尾型(whiptail, 跟本研究鳙的体型相似)及侧扁型(oreo-type forms, 跟本研究鳊的体型相似)鱼类相比, 相同体长的圆筒型鱼类 TS 值较大^[46]。此外, 有研究表明鱼类 TS 值与姿态倾角分布也存在密切关系^[47]。在低频率 38 kHz 条件下, 基于基尔霍夫近似模型对相近体长的鳊、鲢、鳙及长江鲟 TS 值随姿态倾角的变化关系发现, 鳊、鳙及长江鲟目标强度最大值主要位于 $-10^\circ \sim 0^\circ$, 而鲢目标强度最大值主要位于 $-20^\circ \sim -10^\circ$, 且不同种类的鱼 TS 值最大值所对应的姿态倾角的位置各不相同, 这可能与不同种类鱼类表现出不同的行为活动有关。

3.3 本研究的不足和展望

受限于实验时间与实验鱼来源, 本研究测定的鱼类品种(4 种, 鳊、鲢、鳙及长江鲟)及每种鱼不同规格个体数量(6~10 尾)偏少。本实验使用仪器的波束角为 $6.7^\circ \times 6.7^\circ$, 在网箱内声波束仅占很小的体积, 实验鱼在网箱内自由游动被探测到的概率低。为获取足够数量的目标信号, 单尾鱼需测定的时间较长(24~72 h), 后续需优化网箱结构以缩短实验时间并获取大量信号。本实验中, 所测定的养殖鳙(实验组)与野生鳙(对照组)在生长特性及肥满度两方面表现出无显著性差异, 故实验组在形态学特征上具有代表性。受限于缺乏足够野生长江鲟生物学数据, 无法判定本实验中长江鲟体型是否同样具有代表性。不同频率的换能器对于目标强度测定结果会有一定的影响^[27]。本实验受硬件条件限制, 仅使用 199 kHz 频率的换能器对实验鱼进行测定, 在后续研究中, 考虑增加其他内陆水体常用频率(如 70 kHz 和 120 kHz)。

致谢: 感谢中国水产科学研究院淡水渔业研究中心 蔺丹清博士在模型使用 and 数据分析过程中提供的帮助。感谢韩国姜尚国立大学 Myounghee Kang 博士在网箱实验平台搭建方面提供的宝贵建议。感谢郭威在网箱实验过程中给予的协助。感谢王祖飞先生、张良先生和王耀武先生在实验鱼的获取及生活方面提供的便利。感谢中国水产科学研究院长江水产研究所濒危鱼类保护学科组成员对本研究的支持和帮助。

参考文献:

- [1] Simmonds E J, Maclean D N. Fisheries Acoustics: Theory and Practice[M]. 2nd edition. Oxford: Blackwell Publishing, 2005: 1-437.
- [2] Martignac F, Daroux A, Bagliniere J L, et al. The use of acoustic cameras in shallow waters: New hydroacoustic tools for monitoring migratory fish population. A review of DIDSON technology[J]. Fish and Fisheries, 2015, 16(3): 486-510.
- [3] Kim H, Kang D, Cho S, et al. Acoustic target strength measurements for biomass estimation of aquaculture fish, redlip mullet (*Chelon haematocheilus*)[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1536.
- [4] Zhang J, Qiu Y S, Chen Z Z, et al. Advances in pelagic fish-

- ery resources survey and assessment in open South China Sea[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(6): 118-127. [张俊, 邱永松, 陈作志, 等. 南海外海大洋性渔业资源调查评估进展[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(6): 118-127.]
- [5] Boswell K M, Wilson M P, Wilson C A. Hydroacoustics as a tool for assessing fish biomass and size distribution associated with discrete shallow water estuarine habitats in Louisiana[J]. *Estuaries and Coasts*, 2007, 30(4): 607-617.
- [6] Zhang H J, Yang D G, Wei Q W, et al. Hydro-acoustic survey on fishes in the reach from Gezhouba Dam to Gulaobei of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 86-91. [张慧杰, 杨德国, 危起伟, 等. 葛洲坝至古老背江段鱼类的水声学调查[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(1): 86-91.]
- [7] Zhang H, Wang C Y, Yang D G, et al. Spatial distribution and habitat choice of adult Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* Gray, 1835) downstream of Gezhouba Dam, Yangtze River, China[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2014, 30(6): 1483-1491.
- [8] Xie X, Zhang H, Wang C Y, et al. Are river protected areas sufficient for fish conservation? Implications from large-scale hydroacoustic surveys in the middle reach of the Yangtze River[J]. *BMC Ecology*, 2019, 19: Article No. 42.
- [9] Rudstam L G, Parker-Stetter S L, Sullivan P J, et al. Towards a standard operating procedure for fishery acoustic surveys in the Laurentian Great Lakes, North America[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2009, 66(6): 1391-1397.
- [10] Wu Z, Li J, Zhu S L, et al. Seasonal variation of fish density and behavior in Shijiao Reservoir, Beijiing River by using hydroacoustic methods[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(3): 674-681. [武智, 李捷, 朱书礼, 等. 基于水声学的北江石角水库鱼类资源季节变动及行为特征研究[J]. *中国水产科学*, 2018, 25(3): 674-681.]
- [11] Laouar H, Djemali I. Seasonal inter-calibration between acoustic and multi-mesh gillnets sampling for fish biomass assessment in reservoirs[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2018, 34(4): 850-860.
- [12] Godlewska M, Balk H, Kaczkowski Z, et al. Night fish avoidance of *Microcystis* bloom revealed by simultaneous hydroacoustic measurements of both organisms[J]. *Fisheries Research*, 2018, 207: 74-84.
- [13] Zhang H, Wei Q W, Kang M. Measurement of swimming pattern and body length of cultured Chinese sturgeon by use of imaging sonar[J]. *Aquaculture*, 2014, 434: 184-187.
- [14] Langkau M C, Balk H, Schmidt M B, et al. Can acoustic shadows identify fish species? A novel application of imaging sonar data[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2012, 19(4): 313-322.
- [15] Tao J P, Wang X, Tan X C, et al. Diel pattern of fish presence at the Changzhou fishway (Pearl River, China) during the flood season[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2015, 31(3): 451-458.
- [16] Tan X C, Li X H, Chang J B, et al. Acoustic observation of the spawning aggregation of *Megalobrama hoffmanni* in the Pearl River[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2009, 24(2): 293-299.
- [17] Tao J P, Yang Z, Cai Y P, et al. Spatiotemporal response of pelagic fish aggregations in their spawning grounds of middle Yangtze to the flood process optimized by the Three Gorges Reservoir operation[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 103: 86-94.
- [18] Wu J M, Wang C Y, Zhang S H, et al. From continuous to occasional: Small-scale natural reproduction of Chinese sturgeon occurred in the Gezhouba spawning ground, Yichang, China[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(3): 425-431. [吴金明, 王成友, 张书环, 等. 从连续到偶发: 中华鲟在葛洲坝下发生小规模自然繁殖[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(3): 425-431.]
- [19] Zhang H, Wei Q W, Du H, et al. Is there evidence that the Chinese paddlefish (*Psephurus gladius*) still survives in the upper Yangtze River? Concerns inferred from hydroacoustic and capture surveys, 2006-2008[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2009, 25: 95-99.
- [20] Pollom R A, Rose G A. A global review of the spatial, taxonomic, and temporal scope of freshwater fisheries hydroacoustics research[J]. *Environmental Reviews*, 2016, 24: 333-347.
- [21] Foote K G. Fish target strengths for use in echo integrator surveys[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, 82(3): 981-987.
- [22] Love R H. Dorsal-aspect target strength of an individual fish[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1971, 49(3B): 816-823.
- [23] Zhao X Y, Chen Y Z. *In situ* target strength measurements on walleye pollock (*Theragra chalcogramma Pallas*) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1996, 3(4): 19-27. [赵宪勇, 陈毓楨. 狭鳕(*Theragra chalcogramma Pallas*)目标强度的现场测定[J]. *中国水产科学*, 1996, 3(4): 19-27.]
- [24] Williamson N J, Traynor J J. *In situ* target-strength estimation of Pacific whiting (*Merluccius productus*) using a dual-beam transducer[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1984, 41(3): 285-292.
- [25] Zhao X Y. *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.
- [26] Zare P, Kasatkina S M, Shibaev S V, et al. *In situ* acoustic target strength of anchovy kilka (*Clupeonella engrauliformis*) in the Caspian Sea (Iran)[J]. Fisheries Research, 2017, 186: 311-318.
- [27] MacAulay G J, Kloser R J, Ryan T E. *In situ* target strength estimates of visually verified orange roughy[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(1): 215-222.
- [28] O'Driscoll R L, Canese S, Ladroit Y, et al. First *in situ* estimates of acoustic target strength of Antarctic toothfish (*Dissostichus mawsoni*)[J]. Fisheries Research, 2018, 206: 79-84.
- [29] 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.
- [30] Luan Y, Guan C T, Shi X T, et al. The relationship between acoustic backscattering property and weight and body length of big yellow croaker and black rockfish[J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(2): 47-52. [栾洋, 关长涛, 石晓天, 等. 大黄鱼和许氏平鲉声反射特征与体重和体长关系的研究[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(2): 47-52.]
- [31] Knudsen F R, Fosseidengen J E, Oppedal F, et al. Hydroacoustic monitoring of fish in sea cages: Target strength (TS) measurements on Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J]. Fisheries Research, 2004, 69: 205-209.
- [32] Lin D Q, Zhang H, Li J Y, et al. Target strength of four freshwater cultured fish species and a variance analysis[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(1): 1-10. [蔺丹清, 张辉, 李君轶, 等. 4种常见淡水养殖鱼类目标强度测定与差异分析. 中国水产科学, 2017, 24(1): 1-10.]
- [33] Prario I S, Gonzalez J D, Madirolas A, et al. A prolate spheroidal approach for fish target strength estimation: Modeling and measurements[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2015, 101(5): 928-940.
- [34] Yu H Y, Zhang 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.]
- [35] 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.
- [36] Du W D, Li H S, Chen B W, et al. Features acquisition of fish with swim bladder based on acoustic scattering characteristics[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(6): 505-511. [杜伟东, 李海森, 陈宝伟, 等. 一种基于声散射特性的有鳔鱼特征获取方法[J]. 应用声学, 2014, 33(6): 505-511.]
- [37] Clay C S. Composite ray-mode approximations for back-scattered sound from gas-filled cylinders and swimbladders[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 92(4): 2173-2180.
- [38] 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.
- [39] Andreeva I. Scattering of sound by air bladders of fish in deep sound scattering layers[J]. Soviet Physics Acoustics, 1964, 10: 17-20.
- [40] 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.
- [41] Lin D Q. The acoustic scattering characteristics of different chamberd swimbladder fishes and acoustic detection methods in the Yangtze River[D]. Chongqing: Southwest University, 2016: 1-117. [蔺丹清. 长江不同鳔鱼类声学散射特性及其声学探测方法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016: 1-117.]
- [42] Huang X F. Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology[M]. Beijing: Standards Press of China, 2000: 98-100. [黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 98-100.]
- [43] Li B, Chen G B, Zeng L, et al. Modeling study on the target strength of *Sillago sihama*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(2): 403-412. [李斌, 陈国宝, 曾雷, 等. 多鳞鱖目标强度的模型法研究[J]. 中国水产科学, 2018, 25(2): 403-412.]
- [44] Love R H. Measurements of fish target strength: A review[J]. Fishery Bulletin, 1971, 69(4): 703-715.
- [45] 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.
- [46] McClatchie S, Macaulay G J, Coombs R F. A requiem for the use of $20 \log_{10}$ length for acoustic target strength with special reference to deep-sea fishes[J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60(2): 419-428.
- [47] 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.

Target strength of four freshwater fish species in the Yangtze River based on cage and model method

XIE Xiao^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, SUN Liyuan^{1,2}, CAI Zhiyu^{1,2}, WANG Heng^{1,2}, HUO Laijiang^{1,2}, WEI Qiwei^{1,2}

1. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;

2. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: Target strength (TS) is a pivotal parameter for converting echo integral values into absolute fish abundance. It is also a hot research topic in the research and application of fishery acoustic technology. However, the TS-length relationships have been studied in very few freshwater species. Most studies focused on commercially important species, while TS in fish of different physiological structures is investigated less frequently. In this study, cage method and KRM (the Kirchhoff ray-mode approximation model) method were used to measure TS of 4 fish species (*Parabramis pekinensis*, *Hypophthalmichthys molitrix*, *Silurus asotus*, and *Acipenser dabryanus*) which represent different morphological and ecotypic characteristics. Thirty-one individuals were measured by a calibrated 199-kHz BioSonics DT-X split beam echosounder in the vertical direction in a net cage, using the Visual Acquisition software. The *ex situ* cage method experiment was conducted in the Chinese sturgeon farm base which is located in the Three Gorges Reservoir, in December 2012 and from June to July in 2013. During the cage experiment, one fish was measured each time. Then, the body length and weight of each species were measured after the fish were euthanized in Tricaine-S (MS-222). The acoustic data were processed by Sonar-5 Pro software. Two X-ray images were taken from the dorsal and side of fish to understand the internal physiology and the shape of the swim bladder of the fish. The TS of six individuals was calculated using KRM model, and the results were verified by cage method. The results showed that it was feasible to determine TS of freshwater fishes using the cage method, and the results of this method were not significantly different from the model method. The linear regression equations for mean TS with fish BL were derived in dorsal aspect were: $TS_{pp}=20\lg(BL)-70.1$ ($R^2=0.94$), $TS_{hm}=20\lg(BL)-67.0$ ($R^2=0.80$), $TS_{sa}=20\lg(BL)-74.5$ ($R^2=0.80$), and $TS_{ad}=20\lg(BL)-66.1$ ($R^2=0.94$), respectively, where BL is fish body length, pp is *P. pekinensis*, hm is *H. molitrix*, sa is *S. asotus*, and ad is *A. dabryanus*. The linear regression equations for mean TS with fish TL in dorsal aspect were: $TS_{pp}=20\lg(TL)-71.4$ ($R^2=0.94$), $TS_{hm}=20\lg(TL)-68.3$ ($R^2=0.80$), $TS_{sa}=20\lg(TL)-75.1$ ($R^2=0.80$), and $TS_{ad}=20\lg(TL)-68.0$ ($R^2=0.94$), respectively, where TL is total fish length. Under the same body length conditions, the TS of the four fish species was compared: *A. dabryanus* > *H. molitrix* > *P. pekinensis* > *S. asotus*. The results of KRM model support that swim bladder is the primary contributor to backscattered energy. The values of TS and their distribution calculated by the cage method and model method were affected by the morphological characteristics and the swim bladder structure of fish species. Maximum TS of *P. pekinensis*, *S. asotus*, and *A. dabryanus* occurred between -10° and 0° at 38 kHz, while the maximum TS of *H. molitrix* appeared between -20° and -10° . The position of maximum TS occurred differently for each fish species. At the low frequency of 38 kHz, the model method results showed that there was significant difference in the distribution of TS with the angle of incidence of sound waves between fish with a one-chambered swim bladder and those with a multi-chambered swim bladder. Compared to immobilized and unconscious fish, the fish in the net cage can swim freely. However, the narrow beam lowers the probability of the fish being detected, which increases the time of the experiment. In the future, it is necessary to appropriately reduce the size of the cage to optimize the implementation conditions. Our study enriches the TS of freshwater fishes and accumulates basic data for acoustic identification.

Key words: target strength; resource assessment; Yangtze River; freshwater fish; cage method; the Kirchhoff ray-mode approximation model; fishery acoustics

Corresponding author: WEI Qiwei. E-mail: weiqw@yfi.ac.cn