

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16261

4 种常见淡水养殖鱼类目标强度测定与差异分析

蔺丹清^{1,2}, 张辉², 李君轶^{1,2}, 杨焕超^{2,3}, 邸军^{1,2}, 危起伟^{1,2,3}

1. 西南大学 生命科学学院, 重庆 400715;

2. 中国水产科学研究院 长江水产研究所, 湖北 武汉 430223;

3. 华中农业大学 水产学院, 湖北 武汉 430070

摘要: 鱼类目标强度(target strength)的测量是渔业声学技术研究和应用的核心内容之一。2015 年 6—10 月, 在小型水槽内使用 BioSonics DT-X(199 kHz)科学探鱼仪发射水平声波, 测量了 4 种共 29 尾不同鳔室结构的淡水养殖鱼类体侧向及背腹向(180°范围)的目标强度, 并拍摄 X 光影像以了解鱼体鳔室结构及特征。其中瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)7 尾、鳊鱼(*Siniperca chuatsi*)9 尾、鲫鱼(*Carassius auratus*)6 尾、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)7 尾。结果显示, 单体鱼目标强度与声波入射角度具有 $\cos^3$ 三次方函数关系, 体侧向与背腹向上最大目标强度均出现于鱼体主轴垂直于入射声波时, 最小目标强度出现于头尾方向朝向声波时, 与最大目标强度相差 10 dB。不同种鱼类体侧向平均目标强度略大于背腹向 0.5~5 dB。单室鳔鱼类目标强度比相近体长的两室鳔鱼类小。对 4 种鱼类的目标强度与鱼体相关生物学指标进行主成分分析, 体侧向与背腹向目标强度主要受体长、鳔长和鳔长/鳔高值的影响较大。通过目标强度与实验鱼全长、体长、体重的线性回归, 获得体侧和背腹入射方向目标强度与 3 个生物学参数的关系式。本研究通过分析不同鳔室形态鱼种的回波特征差异, 辅助判别长江内常见鱼类(如瓦氏黄颡鱼、鳊鱼、鲫鱼等)的声学信号, 结果对于淡水水域水平原位监测时分析评估资源量相关参数具有参考意义。

关键词: 目标强度; 水平方向; 声波; 入射角度; 鳔室结构; 线性回归; 淡水养殖鱼类

中图分类号: S932

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)01-0001-10

渔业水声学方法凭借其快速准确、覆盖面大、回波映像数据可保存、预报及时且不损害鱼类资源等优点, 已成为国际上普遍采用的渔业资源调查与评估方法^[1]。在内陆水域如河流^[2-3]、湖泊^[4]、水库^[5-6]、河口^[7]等, 通常会选择具有代表性的区域, 如鱼类洄游通道、产卵场等位置, 使用科学探鱼仪(scintific echosounder)进行昼夜或长期水平方向上的监测^[8], 来实现鱼类回波计数、推算鱼类大小以及监测鱼类行为。尽管可使用回波计数方法对河流中的鱼类密度进行量化^[9], 但仍需针对不同鱼种, 测定单体鱼目标强度(target strength, TS), 该指标是决定回声仪评估精确度的核心参数。此工作一直是使用水声学方法评估渔业资源

量的基础核心工作之一。

鱼类 TS 受入射声波频率、入射角度以及鱼类生物特征(包括鱼体大小、形状、内部结构)等因素影响, 主要影响因素为鱼体内鱼鳔的尺寸及形状^[10-11], 因其决定声波后向散射截面面积大小。以往对欧洲淡水单室鳔及两室鳔鱼类 TS 进行水槽内测定时发现, 不同鳔室鱼类具有不同的 TS 偏度分布特征^[12], 单室鳔鱼类 TS 偏度较两室鳔更大。声波入射角度也对单体鱼 TS 具有很大影响^[13-14]。当声波从水平方向射向鱼体时, 被探测鱼类 TS 与声波入射角度具有 $\cos^3 2\alpha$ 的数量关系^[15-17]。当固定鱼体进行测量, 鱼体在确定方向下的 TS 均值会根据入射声波频率变化而不同, 如 200 kHz

收稿日期: 2016-08-29; 修订日期: 2016-10-09.

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(2012A0103); 中国水产科学研究院长江水产研究所所长基金项目(SZ2010-05); 国家自然科学基金项目(31602160).

作者简介: 蔺丹清(1987-), 女, 博士研究生, 专业方向为渔业资源与环境. E-mail: spirit_y@163.com

通信作者: 危起伟, 研究员. E-mail: weiqw@yfi.ac.cn

与 420 kHz 下的同尾鱼具有不同的测量结果^[16-18]。此外, 同样实验条件下不同脉冲宽度会对 TS 产生不确定影响, 比如 0.4 ms 下的鳊鱼鱼体 TS 大于 0.1 ms 下的, 且具有显著性差异^[19]; 而在另一组对 0.256 ms 与 0.128 ms 下同尾鲃科鱼类平均 TS 测量结果中则未见显著差异^[20]。

目前国内针对鱼类 TS 的测量主要配合分配声波积分值并以计算资源密度为目的, 通常在单一鱼种存在水域进行现场法测定^[21-22], 此法针对性较强, 适用于已知种类估算密度的情况。而对于针对多种鱼类共存水体中需分配声学积分值的情况, 则需使用非现场法进行不同种类的 TS 差异评估。目前在国内使用水声学方法评估渔业资源, 多以声波垂直向入射的走航式探测为主, 故多以网箱法或悬垂法测算鱼体背腹方向平均 TS 大小, 建立 TS 与鱼类体长等生物学指标关系。目前已对鳊鱼(*Engraulis japonicus*)^[23]、黄斑蓝子鱼(*Siganus oramin*)^[24]、许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)^[25]、中华鲟(*Acipenser sinensis*)^[26]、鳙鱼(*Aristichthys nobilis*)^[27]等进行过非现场法测量。在针对河流及浅水湖泊进行监测时, 由于受科学探鱼仪声波束较狭窄等限制因素影响, 导致无法在浅水区进行垂直探测, 使用固定换能器水平方向发射声波进行断面监测较为实用。然而针对水平方向入射声波的情况, 对不同鱼种之间的回波差异以及入射声波的角度影响并未进行深入了解, 这会导致在进行水平向原位监测时不能很好地辨别鱼种。本研究尝试在小型消声水槽内, 对 4 种具有不同鳔室特征的淡水养殖鱼类瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)、鳊(*Siniperca chuatsi*)、鲫(*Carassius auratus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*), 进行水平入射声波下 TS 差异性测量, 确定不同入射声波角度下鱼类 TS 变化规律, 尝试获得 TS 与鱼体生物学指标的相关关系, 为在长江流域内开展鱼类资源水平向探测研究及实现目标识别积累基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验场地

实验水槽位于中国水产科学研究院长江水产研究所, 为了便于测定过程的目视观测, 整个水

槽由水族箱专用玻璃制作, 玻璃厚度 19 mm, 四周用钢支架加固, 并置于钢支架之上。水槽呈“T”字形, “T”字两部分均为 3.2 m×1.2 m×1.3 m(长×宽×高)长方体, 水槽满水水深 1.2 m, 如图 1 所示。槽内四壁铺设 3 cm 厚的聚氨酯棉进行简易消声处理, 经测试可以满足水槽内实验要求。实验板房内配有空调, 保证水温在 21~22℃之间。

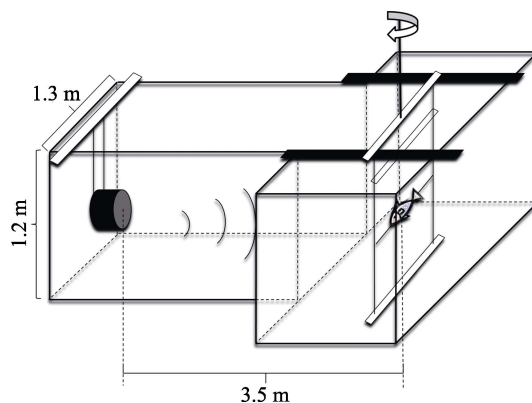


图 1 水槽及声学测定系统示意图

Fig. 1 The diagram of experiment tank and acoustic measurement system

1.2 实验材料

实验于 2015 年 6 月至 10 月开展, 于武汉市水产市场购买 4 种常见健康状况良好的活体经济鱼类共计 29 尾。实验鱼放置于圆形暂养池暂养。使用麻醉剂将暂养 1 d 的实验鱼麻醉。麻醉后按序测量每尾鱼生物学指标, 包括全长(cm)、体长(cm)、体高(cm)、体宽(cm)、体重(g)。然后将实验鱼挂于可控角度的悬挂测量架上, 架长 1.5 m, 采用几乎无弹性的鱼线(0.4 mm)将鱼体悬挂于旋转架并固定, 因当鱼头朝向换能器表面时, 鱼体中轴与声轴夹角为 0°, 故将此时方向定为夹角 0°, 每 5°为一间隔, 匀速顺时针方向旋转。每角度间隔记录数据不少于 1 min。水平旋转 180°为一个测量周期, 每尾鱼测量两周期。为对比分析 TS 大小受声波入射角度变化影响, 使用同样方法对实验鱼背腹方向的 TS 进行测量。鱼体背部朝向换能器, 同样以鱼头朝向换能器表面为 0°, 每 5°间隔, 顺时针旋转。角度划分如图 2 所示。测量过程中遇到鱼体剧烈挣扎情况, 则舍弃此部分数据。测量后继续将鱼麻醉, 拍摄鱼体侧向、背

腹向的 X 光影像, 进一步了解鱼体内部构造, 测量鱼鳔的生物学指标(鱼鳔数量、鳔长、鳔高、鳔宽), 用以辅助分析不同鱼种间 TS 的差异。

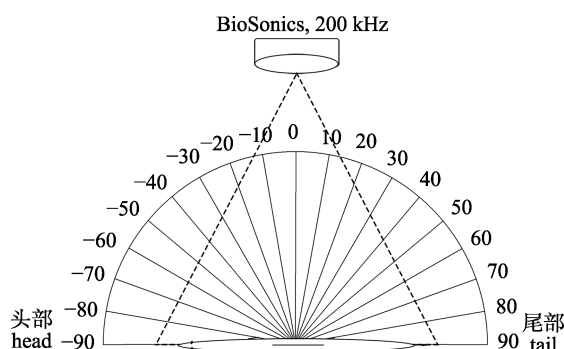


图 2 旋转角度及鱼体位置示意图

以鱼体侧垂直入射声波为 -90° , 顺时针旋转, 鱼头朝向换能器表面为 0° , 旋转至另一侧朝向换能器为 90° 。

Fig. 2 Rotation angle and fish body positions
 -90° means the fish side aspect is vertical with the incident wave, and 0° means the fish head is toward the transducer face.

1.3 实验设备

使用分裂式波束科学探鱼仪 DT-X 系列 (BioSonics, USA) 进行 TS 测量实验。工作频率 199 kHz, 波束角 $6.7^\circ \times 6.7^\circ$, 换能器声学近场边界 0.5 m (BioSonics 厂家提供)。根据水温及换能器放置深度可知, 实验时声速为 1487.7 m/s, 吸收系数为 0.00082 dB/m。

因单体鱼 TS 大小会受声波脉冲宽度影响, 因而仪器的参数设置和测量目标的合适距离需要通过测量已知理论 TS 值的标准球 TS 来获得。具体方法为, 首先将换能器以水平姿态放置于专用固定架上, 置于水槽末端, 换能器中心入水 0.5 m。使用 13.7 mm 标准铜球测定水槽内池壁反射产生混响, 并对换能器进行校正。标准球理论目标强度值为 -45 dB。调试换能器脉冲宽度及采样频率, 脉冲宽度以 0.1 ms 为间隔, 由 0.1 ms 增加至 0.4 ms。将标准球放置于换能器声学近场边界开始, 置于与换能器中心相同深度, 逐渐远离换能器表面, 至靠近水槽壁 0.1 m 停止。通过观测标准球的回波状况, 根据标准球回波是否失真, 以及其 TS 大小判断, 在尽可能远离换能器的情况下, 距换能器表面 3.5 m 为最佳测量距离。根据探测标准球 TS 效果及回波混响情况, 大于 0.1 ms 时回

波振幅发生改变, 确定脉冲宽度设置为 0.1 ms, 发射声波的周期为 5 次/s。配套数据采集软件 Visual Acquisition 6 可进行实时采集并存储数据。使用科学探鱼仪被动模式进行空水槽内背景噪声测试, 显示背景噪声为 -130 dB。位于水槽的 T 型接口处, 即距换能器表面 3.0 m 处有噪声干扰, 因其低于 -70 dB 故忽略不计。

1.4 鱼类目标强度计算

鱼类目标强度的均值计算使用^[11]:

$$\overline{TS} = 10 \lg(\overline{\sigma_{bs}}) \quad (1)$$

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。

因当声波水平入射时 TS 与入射声波角度有 $\cos^3$ 级关系^[15-16], 即:

$$TS = m \cos^3 2\alpha + n \quad (2)$$

式中, m 和 n 为回归系数, α 为入射声波与鱼体主轴之间的夹角。测量鱼体 TS 后分析不同声波入射角度下, 不同种类鱼 TS 的变化规律。针对已知角度下每尾鱼的 TS 均值, 分析其与单体鱼各项生物学参数的相关关系, 参考传统经验公式进行拟合^[11]:

$$TS = a \lg X_i + b \quad (3)$$

式中, a, b 为回归系数, X_i 为全长, 体长, 体重等生物学参数。

通过对 29 尾实验鱼的 TS 进行测量, 获得每尾鱼水平方向上 360° 内每 5° 的 TS 均值。参考 Boswell 等^[19]的分组方法, 按本次试验实际情况, 将 $-90^\circ \sim -80^\circ$, $80^\circ \sim 90^\circ$ 合并划分为全侧方向, $-75^\circ \sim -20^\circ$, $20^\circ \sim 75^\circ$ 划分为倾斜方向, $-20^\circ \sim 20^\circ$ 为头尾向。将每尾鱼的 TS 值划分为此 3 组, 求全部鱼类 3 组内的 TS 平均值。对鱼体全侧向、倾斜方向及所有角度所获得的 TS 均值与鱼体体长、体高及体重进行线性回归, 计算回归系数。为对比背腹向与体侧向 TS 均值差异, 背腹向所测 TS 值亦使用此方法分组及计算。因鱼体具有对称性, 两体侧向之间、背向及腹向之间所测平均 TS 不具有显著差异, 仅使用 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 间的 TS 测量值进行生物学指标相关关系计算。

1.5 数据分析

使用水声学专用软件 Echoview4.9(Echoview, Australia)进行数据处理。使用 Adobe Photoshop CS6 软件进行鱼体 X 光影像内鱼鳔参数测量,使用 SPSS 22.0 进行统计相关计算。

2 结果与分析

2.1 鱼类生物学参数

逐尾测量实验鱼全长、体长、体高、体宽、体重。根据鱼体侧向及背腹向 X 光影像,分别测量鱼鳔长、鳔高、鳔宽。其中瓦氏黄颡鱼、鳊鱼为单室鳔鱼类,瓦氏黄颡鱼鳔呈椭圆形,鳊鱼鳔呈延长形;鲫鱼、草鱼为两室鳔,前室鳔椭圆,后室鳔延长形。4 种鱼鳔室形状见图 3,所有样品鱼全长范围 15.8~46 cm (28.2 ± 8.8) cm,体长范围 13.1~39.5 cm (24.1 ± 7.7) cm,体高范围 2.5~11.5 cm (7.3 ± 2.7) cm,体宽范围 2.0~8.0 cm (4.8 ± 1.6) cm,体重范围 30~1130 g (393 ± 313.2) g。其他生物学指标见表 1。

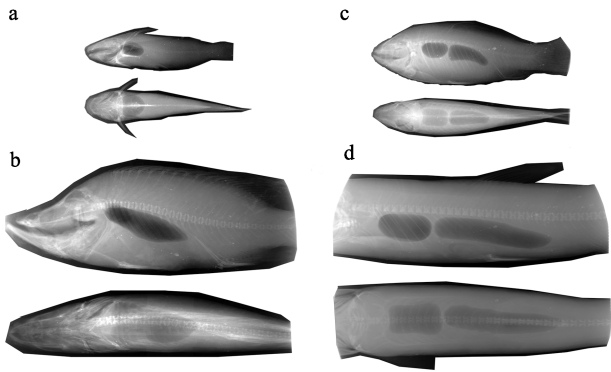


图 3 4 种鱼的 X 光影像
上为体侧向,下为背腹向。a. 瓦氏黄颡鱼;b. 鳊鱼;c. 鲫鱼;
d. 草鱼。图中比例尺分别为 1 cm。4 尾鱼的体长分别为
16.5 cm、31 cm、18.3 cm、39.5 cm。

Fig. 3 X-ray images of four fishes
The upper part of each figure shows the side aspect of fish, and the lower part of each figure shows the dorsal aspect of fish. a. The image of *Pelteobagrus vachelli*. b. The image of *Siniperca chuatsi*. c. The image of *Carassius auratus*. d. The image of *Ctenopharyngodon idellus*. The standard length of four fishes are 16.5 cm, 31 cm, 18.3 cm and 39.5 cm, respectively.

表 1 实验鱼生物学参数
Tab. 1 Biological parameters of the fishes for target strength measurement

参数 parameter	种类 species			
	瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>
尾数 number	7	9	6	7
平均全长/cm TL	20.6	30.8	25.7	35.5
平均体长/cm SL	17.6	27.2	21.4	30.1
平均体重/g W	105.0	473.6	337.0	648.5
平均体高/cm H	3.9	9.8	8.4	6.8
平均体宽/cm WD	3.5	5.8	4.8	4.8
鳔长/cm SWL	前室 anterior chamber	7.2	3.2	3.6
	后室 posterior chamber	—	4.9	7.9
鳔高/cm SWH	前室 anterior chamber	2.1	2.2	2.0
	后室 posterior chamber	—	2.4	1.5
鳔宽/cm SWW	前室 anterior chamber	3.7	2.8	2.3
	后室 posterior chamber	—	2.6	1.7
体长/体高 SL/H	4.56	2.76	2.49	4.68
体长/体宽 SL/WD	4.99	4.81	4.40	5.90
体高/体宽 H/WD	1.11	1.74	1.77	1.27
鳔长/鳔高 SWL/SWH	1.91	3.70	3.32	5.68
鳔长/鳔宽 SWL/SWW	1.01	2.04	2.96	4.89
鳔高/鳔宽 SWH/SWW	0.54	0.55	0.90	0.86
鳔长/体长 SWL/SL	0.15	0.27	0.38	2.96

Note: TL means total length; SL means standard length; W means body weight; H means body height; WD means body width; SWL means swimbladder length; SWH means swimbladder height; SWW means swimbladder width.

2.2 单体鱼目标强度随声波入射角度变化规律

测量结果显示, 当鱼体完全侧向(背腹向)面对换能器表面时, 即鱼体主轴与入射声波垂直下的 -90° 、 90° 时获得 TS 均值的最大值。头尾方向朝

向换能器即 0° 、 180° 时获得 TS 均值的最小值。绘制瓦氏黄颡鱼的 TS 均值散点图及其随角度变化拟合曲线图(图 4)。本实验计算出 4 种鱼 TS 随角度变化回归参数于表 2 中列出, 体侧向及背腹向分别计算。

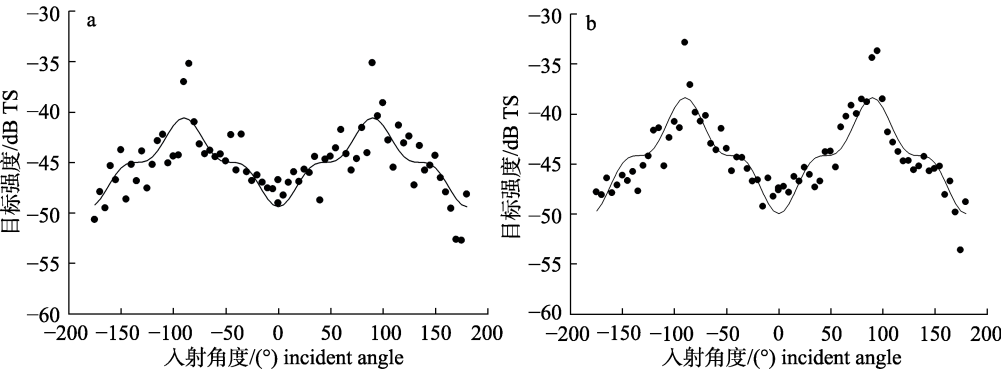


图 4 瓦氏黄颡鱼体侧向及背腹向每 5° 目标强度均值分布图
a. 体侧向旋转 360° TS 均值分布图; b. 背腹向旋转 360° TS 均值分布图. 散点表示测量值, 曲线表示目标强度与声波入射角度回归拟合曲线. 曲线参数见表 2.

Fig. 4 The mean target strength (TS) with 5° interval on the side and dorsal aspects of *Pelteobagrus vachelli*
a. The mean TS on the 360° with the 5° interval on the side aspect; b. The mean TS on the dorsal-ventral aspect. The scatters is the measured TS; The line is the linear regression curve of the TS with the incident angle. The linear regression parameters are shown in Tab. 2.

表 2 4 种鱼目标强度均值与声波入射角度回归系数

Tab. 2 Regression analyses of mean target strength (TS) in dB of 4 fishes according to equation

种类 species	尾数 number	体侧向 side-aspect			背腹向 dorsal-aspect		
		<i>m</i>	<i>n</i>	<i>R</i> ²	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>R</i> ²
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	7	-4.4	-44.9	0.60	-5.8	-44.2	0.76
鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>	9	-7.0	-39.3	0.68	-6.6	-40.2	0.63
鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	6	-8.3	-38.2	0.76	-6.2	-40.1	0.62
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	7	-7.3	-42.1	0.43	-5.3	-39.4	0.50

注: 所使用回归方程 $TS = m \cos^3 2\alpha + n$, 其中 α 为入射声波与鱼体主轴夹角。
Note: $TS = m \cos^3 2\alpha + n$, α represents the angle between incident sound wave and fish body.

2.3 不同鱼种间目标强度差异

2.3.1 TS 均值与单体鱼生物学指标的关系 通过使用 SPSS 22.0 软件对每尾鱼生物学指标与 3 组 TS 均值(全侧向、头尾向、全方向)的线性值分别进行主成分分析, 计算各指标与对应 TS 均值的相关系数。除生物学指标外结合鱼类体型特点, 对生物学指标建立比例关系, 并同步分析其与 TS 均值的相关性。具体结果如表 3 所示。可知体侧向情况下, 影响全侧向 TS 均值的主要因素分别为鳃长、体长及鳃长/鳃高值, 相关系数分别为 0.68, 0.65 及 0.45; 影响头尾向 TS 均值的主要因素

为鳃长/鳃高, 鳃长/鳃宽及鳃长, 相关系数分别为 0.38, 0.31, 0.30; 全方向上 TS 均值主要受鳃长、体长及鳃长/鳃高影响, 相关系数分别为 0.73, 0.70, 0.48. 针对背腹向测量结果分别进行生物学指标的主成分分析, 可知影响完全背腹向 TS 均值的参数为体长、鳃长、鳃长/鳃高, 相关系数分别为 0.90, 0.82, 0.41; 头尾向 TS 均值主要受鳃长、体长、鳃长/鳃宽影响, 相关系数分别为 0.74, 0.56 及 0.53; 全方向上 TS 均值主要受鳃长、体长及鳃长/鳃高影响, 相关系数分别为 0.82, 0.77, 0.55。可见 TS 均值主要受鳃长、体长、鳃参数间比例影响。

表 3 生物学指标与不同方向下的目标强度均值相关系数表

Tab. 3 The correlative coefficients of the fish parameters and mean target strength (TS) under different orientations

参数 parameter	体侧向 side-aspect			背腹向 dorsal-aspect		
	侧向 lateral	头尾向 head-tail	全方向 whole	侧向 lateral	头尾向 head-tail	全方向 whole
体长 SL	0.65	0.28	0.70	0.90	0.56	0.77
鳔长 SWL	0.68	0.30	0.73	0.82	0.74	0.82
体长/体高 SL/H	0.01	0.04	-0.03	-0.32	0.03	-0.20
体长/体宽 SL/WD	0.08	0.18	0.06	-0.28	0.27	-0.10
体高/体宽 H/WD	0.05	0.05	0.07	0.14	0.09	0.09
鳔长/鳔高 SWL/SWH	0.45	0.38	0.48	0.41	0.52	0.55
鳔长/鳔宽 SWL/SWW	0.43	0.31	0.47	0.25	0.53	0.45
鳔高/鳔宽 SWH/SWW	0.25	0.13	0.28	0.03	0.40	0.24
鳔长/体长 SWL/SL	0.41	0.26	0.46	0.33	0.52	0.52

Note: TL means total length; SL means standard length; W means body weight; H means body height; WD means body width; SWL means swimbladder length; SWH means swimbladder height; SWW means swimbladder width.

为更详细了解鱼鳔形态对 TS 的影响, 将 4 种鱼体侧向、背腹向两种情况下的全侧向(−90°~−80°, 80°~90°)TS 均值绘制箱图(图 5), 对比发现, 所有鱼种均出现体侧向 TS 均值大于背腹向 TS 均值的情况。体侧向与背腹向 TS 均值之差由低到高分别为: 瓦氏黄颡鱼、鳊鱼、草鱼、鲫鱼, 差值为 0.5 dB、2.4 dB、2.5 dB、5.1 dB。组间对比显示, 体长相近的单室鳔与两室鳔鱼类, 单室鳔鱼类的 TS 均值小于两室鳔鱼类, 体侧向上瓦氏黄颡鱼的 TS 均值为−39.2 dB, 较鲫鱼−29.7 dB 小 9.5 dB, 背腹向瓦氏黄颡鱼的 TS 均值为−39.7 dB, 小于鲫鱼 5 dB。

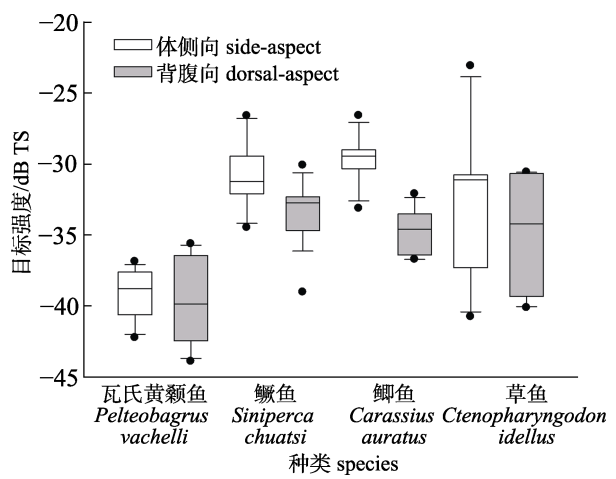


图 5 4 种鱼体侧向及背腹向完全侧向下 TS 均值分布图
Fig. 5 Mean target strength (TS) patterns of 4 fishes in the side and dorsal directions (−90° to −80°, 80° to 90°)

2.3.2 不同鱼种 TS 均值与生物学指标的相关关系 分别对 4 种实验鱼进行体侧向及背腹向下的

TS 均值与全长、体长、体重线性相关分析, TS 均值分 3 种角度情况计算, 包括全侧向、倾斜角度及全方向, 因头尾向的 TS 均值与体长等指标几乎无线性相关, 所以没有进行拟合。3 组方向下拟合的线性回归系数如表 4 所示。

3 讨论

本研究可知, 单体鱼在不同声波入射角度情况下, 鱼体周的 TS 均值呈 cos 3 次方函数变化。体侧向或背腹向均以鱼体侧向完全朝向声波时出现最大值, 所有实验鱼体侧向时的完全侧向与头尾向平均相差 10.9 dB, 背腹向时完全侧向与头尾向平均相差 8.2 dB, 因完全侧向时鱼鳔在声波入射方向具有最大的投影面积。而不同鱼种具有的不同鱼鳔形状, 以及鱼鳔相对于鱼体主轴具有不同的倾角, 使背腹向投影面积略小于体侧向投影面积, 因而会产生体侧向与背腹向之间 TS 的差异。如瓦氏黄颡鱼的鳔近似椭圆, 鳔长/鳔高=1.91, 鳔长/鳔宽=1.01, 体侧向与背腹向间 TS 均值差值仅为 0.5 dB, 而鳔室延长形的鳊鱼鳔长/鳔高=3.70, 鳔长/鳔宽=2.04, 体侧向与背腹向间 TS 均值差值为 2.4 dB。而通过鳔室数量不同的组间对比亦可知, 4 种鱼鳔高/鳔宽平均值由低到高分别为瓦氏黄颡鱼、鳊鱼、草鱼、鲫鱼, 比值分别为 0.54、0.55、0.86、0.9, 瓦氏黄颡鱼与鳊鱼鱼鳔略呈心形, 鳔宽较宽, 鳊鱼鱼鳔略向下倾斜, 而草鱼与鲫鱼鳔略狭而长, 且鱼鳔略向下倾斜。因而产生体侧向与背腹向 TS 均值差值由低到高依次为: 瓦氏

表 4 4 种鱼各生物学指标与目标强度均值线性回归系数
Tab. 4 Regression analyses of mean target strength (TS) in dB of 4 fishes according to equation

种类 species	尾数 number	方向 orientation	体侧向 side-aspect			背腹向 dorsal-aspect		
			a_i	b_i	R^2	a_i	b_i	R^2
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	7	全侧向 lateral	18.9/19.5/6.8	-63.9/-63.4/-52.3	0.80/0.84/0.86	28.5/28.7/10	-77.6/-75.7/-59.6	0.84/0.83/0.88
		倾斜 oblique	20.4/20.5/7.3	-71.6/-70.4/-59.2	0.83/0.83/0.89	27.1/27.0/9.2	-79.8/-77.8/-62.2	0.93/0.91/0.92
		全角度 whole	20.0/20.4/7.2	-69.9/-69.1/-57.7	0.88/0.90/0.95	26.7/26.7/9.2	-78.6/-76.8/-61.5	0.97/0.95/0.98
鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>	9	全侧向 lateral	51.4/46.7/14.1	-107.9/-98.4/-68.8	0.73/0.66/0.8	40.9/37.9/12.8	-94.7/-88.1/-67.8	0.87/0.88/0.80
		倾斜 oblique	28.0/27.3/6.7	-80.3/-77.9/-56.4	0.63/0.66/0.52	25.9/23.3/8.2	-75.5/-70.4/-58.8	0.82/0.79/0.77
		全角度 whole	38.2/35.9/10.1	-93.3/-87.9/-63.3	0.74/0.71/0.76	29.9/27.2/9.4	-81.2/-75.8/-61.8	0.84/0.83/0.79
鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	6	全侧向 lateral	20.9/19.3/6.0	-60.3/-56.6/-45.7	0.77/0.70/0.73	19.1/19.1/4.0	-61.4/-59.9/-44.2	0.61/0.65/0.51
		倾斜 oblique	29.6/28.3/8.6	-79.9/-75.8/-59.6	0.93/0.91/0.91	23.5/23.3/5.0	-71.8/-69.8/-50.9	0.57/0.59/0.49
		全角度 whole	24.3/22.8/7.0	-70.5/-66.6/-53.7	0.87/0.82/0.84	20.8/20.7/4.5	-67.5/-65.7/-49.1	0.72/0.74/0.63
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	7	全侧向 lateral	27.1/26.2/8.0	-73.1/-69.9/-52.7	0.89/0.89/0.89	21.7/20.9/6.5	-66.0/-63.4/-49.7	0.98/0.99/0.99
		倾斜 oblique	17.2/16.7/5.1	-65.1/-63.0/-52.0	0.74/0.74/0.74	20.9/15.6/4.8	-69.4/-64.8/-54.4	0.87/0.91/0.90
		全角度 whole	21.7/20.9/6.4	-69.9/-67.3/-53.5	0.88/0.88/0.87	12.9/12.6/3.8	-56.4/-54.8/-46.5	0.69/0.69/0.67

注: 回归方程 $TS=a_i\lg X+b_i$, i 按序为全长/体长(cm)、体重(g).
Note: $TS=a_i\lg X+b_i$, i represents fish total/standard length (cm) and weight (g), respectively.

黄颡鱼、鳊鱼、草鱼、鲫鱼(0.5 dB、2.4 dB、2.5 dB、5.1 dB)。据 X 光影像可知, 瓦氏黄颡鱼的鱼鳔仅相当于鲫鱼前室鳔大小, 因而相近体长的瓦氏黄颡鱼与鲫鱼 TS 均值相差 5~10 dB。而在同一体长范围内的较大的鳊鱼亦因鱼鳔体积小于鲫鱼, TS 均值小于鲫鱼 1 dB 左右。因所选实验用草鱼具有 15 cm 以下的小个体, 其鱼鳔发育并不完全, 因而草鱼的 TS 具有较广的分布范围及较小的平均值(图 5)。

对于同样鳔室结构的单室鳔与两室鳔组内对比显示, TS 均值大小主要受鳔长影响。对于同种鱼类, 鱼体 TS 具有随体长增大而增大的规律。通常为了量化鱼体 TS, 则将其与可直接测量的鱼体生物学参数——体长建立关系。传统的经验公式中 $a=20$, 通常海水鱼背腹向的平均 TS-L 关系式中 a 值分布于 18~30, b 值分布于 -60~-90 dB 之间^[11]; 部分淡水鱼体侧向的平均 TS-L 关系中, a 值分布于 27~34, b 分布于 -93~-114 dB^[16] 之间。本研究中, 除了鳊鱼外的 3 种鱼体侧向系数 a 介于 16.7~29.6 之间, b 分布于 -56.6~-79.9 dB 之间; 背腹向 a 介于 12.6~29.9, b 分布于 -54.8~-79.8 dB 之间。较相近于海水鱼测量结果。鳊鱼具有较大的 a 值和较小的 b 值, a 介于 27.3~51.4 之间, b 介于 -70.4~-94.7 dB。

水槽内实验将鱼体几乎完全固定, 可控姿态角度的情况下略使鱼类行为受限, 因而可能与实际水域中的自由游动鱼类的平均 TS 有差异^[19]。受到实验水槽容积影响, 测量距离较短且波束较窄, 虽能完全覆盖样本鱼体长, 但因平均 TS 是鱼体姿态角与鱼对声波反射指向角的复合加权平均数, 所测 TS 均值会受鱼鳔在波束内的不同位置及不同指向性影响。本实验设计水池形状及尺寸尽管使测量较受限制, 水池内部会产生多次回波引起混响, 但池壁铺设的吸声材料可处理大部分混响, 使其远小于鱼类 TS, 对测量结果造成影响可忽略不计。之后可使用现场测量或网箱法等对比本次测量结果, 以确保在长江内进行水平方向原位观测时换算鱼类体长及资源量的准确度。

本研究尝试性开展了对具有不同鱼鳔特性的 4 种主要淡水经济养殖鱼类进行水平入射声波条

件下的目标强度测量, 获得不同鱼鳔特性以及不同鱼类行为(姿态倾角)对鱼体回波特征的影响, 并尝试对目标强度随鱼类生物学参数变化进行线性回归。今后可针对鱼鳔形状、体型相近的鱼种增加样本数量, 扩大体长范围, 获得更为精确的目标强度与体长等线性回归公式。

参考文献:

- [1] Chen G, Chen W Z. The application of acoustic method in fishery resources survey[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2003, 12(1): 40-44. [陈刚, 陈卫忠. 渔业资源评估中声学方法的应用[J]. 上海水产大学学报, 2003, 12(1): 40-44.]
- [2] Hughes S. A mobile horizontal hydroacoustic fisheries survey of the River Thames, United Kingdom[J]. Fish Res, 1998, 35(1): 91-97.
- [3] Johnson R L, Moursund R A. Evaluation of juvenile salmon behavior at Bonneville Dam, Columbia River, using a multibeam technique[J]. Aquat Living Resour, 2000, 13(5): 313-318.
- [4] Knudsen F R, Sægrov H. Benefits from horizontal beaming during acoustic survey: application to three Norwegian lakes[J]. Fish Res, 2002, 56(2): 205-211.
- [5] Kubecka J, Wittingerova M. Horizontal beaming as a crucial component of acoustic fish stock assessment in freshwater reservoirs[J]. Fish Res, 1998, 35(1): 99-106.
- [6] Muška M, Tušer M, Frouzová J, et al. To migrate, or not to migrate: partial diel horizontal migration of fish in a temperate freshwater reservoir[J]. Hydrobiologia, 2013, 707(1): 17-28.
- [7] Boswell K M, Miller M W, Wilson C A. A lightweight transducer platform for use in stationary shallow water horizontal-aspect acoustic surveys[J]. Fish Res, 2007, 85(3): 291-294.
- [8] Kubecka J, Duncan A. Diurnal changes of fish behaviour in a lowland river monitored by a dual-beam echosounder[J]. Fish Res, 1998, 35(1): 55-63.
- [9] Zhang H J, Wei Q W, Yang D G. The development trend and application of echosounder in fishery[J]. Reservoir Fisheries, 2008, 28(1): 9-13. [张慧杰, 危起伟, 杨德国. 回声探测仪的发展趋势及渔业应用[J]. 水利渔业, 2008, 28(1): 9-13.]
- [10] Foote K G. Averaging of fish target strength functions[J]. J Acoust Soc Am, 1980, 67(2): 504-515.
- [11] Simmonds E J, MacLennan D N. Fisheries Acoustics: Theory and Practice[M]. Second edition. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 2005.

- [12] Frozova J, Kubecka J, Mrkvicka T. Differences in acoustic target strength pattern between fish with one-and two-chambered swimbladder during rotation in the horizontal plane[J]. Fish Res, 2011, 109(1): 114–118.
- [13] Love R H. Maximum side-aspect target strength of an individual fish[J]. J Acoust Soc Am, 1969, 46(3): 746–752.
- [14] Love R H. Target strength of an individual fish at any aspect[J]. J Acoust Soc Am, 1977, 62(6): 1397–1403.
- [15] Kubecka J. Simple model on the relationship between fish acoustical target strength and aspect for high-frequency sonar in shallow waters[J]. J Appl Ichthyol, 1994, 10(2–3): 75–81.
- [16] Kubecka J, Duncan A. Acoustic size vs. real size relationships for common species of riverine fish[J]. Fish Res, 1998, 35(1): 115–125.
- [17] Lilja J, Marjomaki T J, Riikonen R, et al. Side-aspect target strength of Atlantic salmon (*Salmo salar*), brown trout (*Salmo trutta*), whitefish (*Coregonus lavaretus*), and pike (*Esox lucius*)[J]. Aquat Living Resour, 2000, 13(5): 355–360.
- [18] Frouzova J, Kubecka J, Balk H, et al. Target strength of some European fish species and its dependence on fish body parameters[J]. Fish Res, 2005, 75(1–3): 86–96.
- [19] Boswell K M, Wilson C A. Side-aspect target-strength measurements of bay anchovy (*Anchoa mitchilli*) and gulf menhaden (*Brevoortia patronus*) derived from ex situ experiments[J]. ICES J Mar Sci, 2008, 65(6): 1012–1020.
- [20] Rodriguez-Sanchez V, Encina-Encina L, Rodriguez-Ruiz A, et al. Horizontal target strength of *Luciobarbus* sp. in ex situ experiments: Testing differences by aspect angle, pulse length and beam position[J]. Fish Res, 2015, 164(4): 214–222.
- [21] 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.]
- [22] Tao J P, Qiao Y, Tan X C, et al. Species identification of Chinese sturgeon using acoustic descriptors and ascertaining their spatial distribution in the spawning ground of Gezhouba Dam[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(19): 2975–2982. [陶江平, 乔晔, 谭细畅, 等. 中华鲟回声信号判别分析及其在葛洲坝产卵场的空间分布[J]. 科学通报, 2009, 54(19): 2975–2982.]
- [23] 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.]
- [24] Chen G B, Li N N, Chen P M, et al. Target strength measurements of pearl-spotted spinefoot (*Siganus oramin*) in the South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(6): 1293–1299. [陈国宝, 李娜娜, 陈丕茂, 等. 南海黄斑蓝子鱼的目标强度测量研究[J]. 中国水产科学, 2010, 17(6): 1293–1299.]
- [25] 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 Fisheries 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.]
- [26] Zhang H J. Preliminary hydroacoustic investigations of fishes stock in Yichang & Yibin reaches of the Yangtze River[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007: 1–67. [张慧杰. 长江宜昌和宜宾江段鱼类资源的水声学初步调查[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007: 1–67.]
- [27] Ren Y Q, Wang K, Duan X B, et al. In situ hydroacoustic estimates of the target strength and behavior characteristics of *Aristichthys nobilis*[J]. Freshwater Fisheries, 2011, 41(2): 3–9. [任玉芹, 王珂, 段辛斌, 等. 鳊目标强度和行为特征的水声学研究[J]. 淡水渔业, 2011, 41(2): 3–9.]

Target strength of four freshwater cultured fish species and a variance analysis

LIN Danqing^{1,2}, ZHANG Hui², LI Junyi^{1,2}, YANG Huanchao^{2,3}, DI Jun^{1,2}, WEI Qiwei^{1,2,3}

1. College of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

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

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

Abstract: Measuring fish target strength (TS) is the foundation of fisheries acoustic research and its applications. TS measurements focused on fish in the Yangtze River are lacking or do not meet the needs for a fisheries resource assessment. Variations in TS of four freshwater cultured fish species with different swim bladder structures were measured with a BioSonics DT-X (199 kHz) split beam echosounder in the horizontal direction. The four fish were Vachell's bagrid fish (*Pelteobagrus vachelli*), Mandarin fish (*Siniperca chuatsi*), crucian carp (*Carassius auratus*), and grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*). An *ex situ* experiment was carried out in a small T-shaped tank during June and October 2015. The tank was constructed of eight fiberglass-reinforced plastic boards. Polyurethane foaming plastic cotton was pasted on the internal face of the tank to absorb any sounds reverberating from multiple echoes. Twenty-nine individuals were anaesthetized and tethered on a horizontal rotation support, in turn, and TS was measured at different horizontal angles. The angles were changed from -90° to 90° at an interval of 5° . Individual TS was measured for 300 pings at each angle. The results showed that mean TS of fish was affected by the aspect angle. Maximum TS occurred in the lateral direction, and minimum TS occurred in the head-tail direction. The difference between the maximum and minimum TS was about 10 dB. A cos functional relationship was observed between the measured TS and the sound wave incident angle, as well as from the fish dorsal-ventral direction. Fish TS values were smaller in the dorsal aspect than those in the side aspect. These differences may have been affected by the shape of the swim bladder and its position in the body. Two X-ray images were taken from the side and dorsal aspects of each fish to understand the inner structure of the fish and the swim bladder. TS of fish with a one-chambered swim bladder was smaller than that fish with a multi-chambered swim bladder, even though standard length (SL) of the one-chambered fish was longer. Relationships between TS-length (TS-total length, TS-standard length), and TS-weight (TS-fish weight) were derived in three orientations: lateral (from -90° to -80° and from 80° to 90°), oblique (from -75° to -20° and from 20° to 75°), and in all of directions. Linear regression equations were prepared for the side and dorsal aspects of the four fish species. The side aspect linear regression equations for mean TS with fish SL in the lateral position were: $TS_{\text{vbf}}=19.5\lg(\text{SL})-63.4(R^2=0.84)$, $TS_{\text{mf}}=46.7\lg(\text{SL})-98.4(R^2=0.66)$, $TS_{\text{cc}}=19.7\lg(\text{SL})-56.6(R^2=0.70)$, and $TS_{\text{gc}}=26.2\lg(\text{SL})-69.9(R^2=0.89)$, respectively, where SL is fish standard length, vbf is a fish with a one-chambered swim bladder (Vachell's bagrid fish), mf is mandarin fish, cc is crucian carp, and gc is grass carp.). The dorsal aspect linear regression equations for mean TS with fish SL in the lateral position were: $TS_{\text{vbf}}=28.7\lg(\text{SL})-75.7(R^2=0.83)$, $TS_{\text{mf}}=37.9\lg(\text{SL})-88.1(R^2=0.88)$, $TS_{\text{cc}}=19.1\lg(\text{SL})-59.9(R^2=0.65)$, and $TS_{\text{gc}}=20.9\lg(\text{SL})-63.4(R^2=0.99)$, respectively. In this *ex situ* experiment, the fish's body was tethered tightly on a rotational support, so fish behavior was limited. The beam was narrow in the short distance. Although the beam covered the entire body, mean TS was affected by the swim bladder position in the body. Hence, some differences between the *ex situ* and *in situ* measurements were observed. In the future, the mean TS of these fish species should be measured *in situ* or in a net cage, so researchers can compare the results with this study to improve the accuracy of converting length and assessing resources from the TS measurements. This study will help guide fish behavior research and fisheries resource assessments in the Yangtze River.

Key words: target strength; horizontal direction; sound; incident angle; swim bladder structure; linear regression; freshwater cultured fish species

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