

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*

尚晓明 孔令民 吴常文^①

(浙江海洋学院海洋科学与技术学院 国家海洋设施养殖工程技术研究中心 舟山 316022)

摘要 采用椭球体近似模型对大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)、小黄鱼(*P. polyactis*)和银鲳(*Pampus argenteus*)的声散射特征进行了理论计算和研究。其中鱼鳔为充满气体的椭球体模型,鱼体为充满液体的椭球体模型。利用研制的散射角度可调的目标强度测量装置,对几种鱼种进行了目标强度随倾角变化关系研究。通过理论分析和实验对比,采用数据拟合的方法建立了3种鱼类目标强度随倾角变化的经验公式。研究表明,角度分布是影响目标强度的重要参数,目标强度最大值和最小值相差大于15dB,其最大值出现在 -10° 和 10° 之间,最小值出现在 -40° 以后。修正后的椭球体模型可以较好地反映目标强度的指向性,可以作为现场测定重要补充。

关键词 大黄鱼;小黄鱼;银鲳;声散射;椭球体模型;目标强度

中图分类号 Q958 **doi:** 10.11693/hyhz20141200362

声学方法是进行渔业资源调查和网箱监控的重要方法,具有简单、快速、有效的特点。(谭细畅等,2009),目标强度是鱼类资源评估和网箱监控的重要参数(赵宪勇等,2003; Simmonds *et al*, 2006),研究目标强度的方法包括实验测定和模型研究两种方法(于海圆等,2007)。实验测定方法是应用声学实验装置对受控水生生物进行实验测定。国外学者应用这种方法对水生生物的目标强度进行了大量研究,研究对象包括鱼类(Francis, 1985; Yasuma *et al*, 2005)、水母(Alvarez *et al*, 2008)、头足类、海龟(Mahfurdz *et al*, 2013)以及海洋哺乳类动物如鲸鱼、海豚(Li *et al*, 2012)等,主要通过改变水生生物的角度或所处深度,研究目标强度和角度、水深之间的关系;对水生生物进行实时监测,研究目标强度与生活习性的关系。国内学者也有部分研究,主要研究对象为经济鱼类或保护鱼种,如褐鲳鲷(*Sebastiscus marmoratus*) (张婧雯, 2012)、大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)、许氏平鲷(*Sebastods schlegelii*) (栾洋等, 2011)、青海湖裸鲤(Naked carp)(谭细畅等, 2009)、狭鳕(*Theragra chalcogramma*) (赵

宪勇等, 1996)等,主要研究平均目标强度同鱼类体长的关系。但小黄鱼、银鲳的研究未见报道,目标强度同角度的关系研究尚显不足。

模型研究方法是将鱼体简化为几何模型,利用声波的散射原理对鱼类的目标强度进行近似研究。目前,国外采用的模型方法有球体模型(Anderson, 1950)、椭球体模型(Furusawa, 1988)、基尔霍夫模型(Clay *et al*, 1994)、有限弯曲模型、低分辨率声学模型(Jech *et al*, 1995)以及基于基尔霍夫模型的立体模型(Tang *et al*, 2009)等。国内也有学者对鱼类的声学模型进行了研究,其中有代表性的是鱼群的声散射模型(张波等, 2009)以及鲳鱼的椭球体模型(于海圆等, 2007)。椭球体模型是常用的模型,能够较好地反映目标强度的指向性,但未与实验测定方法相结合。模型研究方法不受实验测定条件的限制,具有灵活方便的特点,是实验测定重要补充。

本文以东海三种重要经济鱼类大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)、小黄鱼(*P. polyactis*)、银鲳(*Pampus argenteus*)为研究对象,提出了可精确控制角度的目标强度测量

*海岛生态系统监测及保护关键技术研究示范, 2012BAB16B02号。尚晓明, 硕士研究生, E-mail: niboou@outlook.com

通讯作者: 吴常文, 教授, 博士生导师, E-mail: wucw08@126.com

收稿日期: 2014-12-04, 收修改稿日期: 2015-01-13

装置, 并应用该装置进行实验测定的研究。采用模型法估算了其不同倾角状态下鱼体的目标强度, 通过对比实验和理论结果, 修正了椭球体模型。为进一步研究目标强度和角度的关系, 从而进一步改进模型提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验测定

1.1.1 实验装置 本文研制了可精确控制角度的目标强度测量装置, 如图 1 所示。装置中鱼体、天平横杆和细线组成平行四边形, 因此横杆角度即为鱼体角度。通过对调节螺母和游码的移动调整, 测量不同倾角状态下的鱼体的目标强度值。水桶高 2m, 直径为 1.85m。目标强度测量仪器为 Biosonic DT-X 回声探测仪, 测量波束为分裂波, 频率 430kHz。

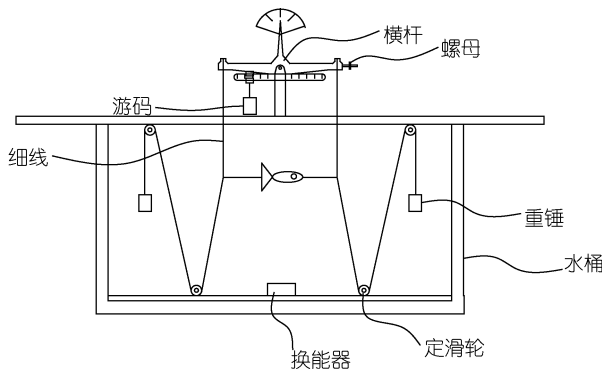


图 1 目标强度测量装置

Fig.1 The experimental design on target strength measurement

1.1.2 目标强度的实验测定 大黄鱼、小黄鱼、银鲳样品购自舟山渔政码头, 在表 1 中给出了三种实验样品的参数。实验时, 将鱼体固定在实验装置上, 换能器固定在鱼体正下方 1.6m 处, 调节横杆上的螺母和游码, 以 1 度为间隔测量鱼体的目标强度值。测量范围 $-40^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$, 取鱼体头部向上时倾角为正, 头向下时倾角为负。

表 1 实验鱼体长、体重

Tab.1 The length and weight of experimental fish body

| 实验鱼 | 大黄鱼 | 小黄鱼 | 银鲳 |
|--------|--------|-------|--------|
| 叉长(cm) | 25.34 | 18.1 | 16.8 |
| 全长(cm) | 27.95 | 18.6 | 20.2 |
| 体重(g) | 227.05 | 77.34 | 112.56 |

1.2 模型法

1.2.1 基本定义与原理 目标强度(TS)是反映鱼

体对声波反射能力的物理量, 定义为(Anderson, 1950; Zhao, 2006):

$$TS = 10 \lg(\sigma/4\pi) \quad (1)$$

其中, σ 是鱼类的反向散射截面, 可以作为鱼对入射声波产生散射的等效面积。

对于鲸类和海豚等哺乳动物而言, 肺部和脂肪层是产生散射的主要部分(Miller *et al*, 2001), 有壳生物主要的散射部位是壳(Wareen *et al*, 2002), 有鳔鱼种主要声散射器官是鱼鳔(Sasmowiyono *et al*, 2010)。因此, 有鳔鱼类的声散射可以近似为鱼鳔的声散射和除鱼鳔以外的肌肉、骨骼、内脏等鱼体其它部分的散射组成。鱼类的散射声场为点源散射场, 因此鱼鳔的散射和鱼体的散射可近似为完全相干, 没有相位差, 鱼的总散射振幅可近似为鱼鳔和鱼体的散射振幅之和(于海圆等, 2007)。

$$f_{tot} = f_{sb} + f_b \quad (2)$$

其中, f_{tot} 为鱼类个体的总散射振幅, f_{sb} 为鱼鳔的散射振幅, f_b 为总散射振幅。鱼体的总声学截面表示为(于海圆等, 2007):

$$\sigma = 4\pi |f_{tot}|^2 \quad (3)$$

1.2.2 椭球体模型的声散射场 椭球体模型的构造方法是将鱼体近似为一系列沿长轴无间排列的椭球体微元组成, 椭球体模型的散射场为 $f = f_0 D(\theta)$, 其中, f_0 为声波从鱼体背部垂直入射时的散射振幅, $D(\theta)$ 代表模型的指向性(于海圆等, 2007)。

$$f_0 = \frac{-2i}{\pi} \int_0^{l/2} dx \sum_{m=0}^{\infty} b_m(x/(l/2)) \quad (4)$$

$$b_m(x/(l/2)) = \varepsilon_m (-1)^m / (1 + ic_m(x/(l/2))) \quad (5)$$

$$C_m = \left\{ \frac{[J'_m(k^*a)N_m(ka)]}{[J_m(k^*a)J'_m(ka)]} - gh \frac{[N'_m(ka)]}{[J'_m(ka)]} \right\} \quad (6)$$

$$\left\{ \frac{[J_m(ka)J'_m(k^*a)]}{[J_m(k^*a)J'_m(ka)]} - gh \right\}$$

其中, x 是圆柱体微元相对于椭球体中心的位置, l 是模型长轴的长度; ε_m 是诺曼数, 当 $m > 0$ 时, $\varepsilon_m = 2$; 当 $m = 0$ 时, $\varepsilon_0 = 1$; $J_m(u)$ 和 $N_m(u)$ 是 m 阶贝塞尔函数的第一类和第二类函数, $J'_m(u)$ 和 $N'_m(u)$ 分别是 $J_m(u)$ 和 $N_m(u)$ 对 (u) 的一阶导数, a 是圆柱体微元横截面半径; g 是模型材料的密度与海水密度的比值; h 是模型内声速和海水声速的比值, k^* 是模型内声波波数, k 是海水声波波数, $k^* = k/h$ (7)。

$$D(\theta) = \frac{\sin(kl \sin(\theta))}{kl \sin(\theta)} \cos^2(\theta) \quad (8)$$

其中, θ 是模型长轴相对于入射波的倾角(于海圆等, 2007)。

1.2.3 模型参数的确定 鱼体和鱼鳔的参数取自实验测定用鱼, 鱼体参数通过拍照和鱼尺测量获得; 鱼鳔参数通过解剖、拍照和图片处理软件获得, 应用 Photoshop 对照片处理, 测定鱼鳔和鱼体的相对尺度, 鱼鳔参数=鱼体长度×相对尺度。经过换算后的具体参数如表 2 所示。

表 2 鱼鳔和鱼体参数
Tab.2 The parameters of fish body and swim-bladder

| 实验鱼 | 大黄鱼 | 小黄鱼 | 银鲳 |
|------------|---------|-------|-------|
| 鱼鳔长轴(cm) | 8.45 | 6.07 | 3.53 |
| 鱼鳔短轴半径(cm) | 1.86 | 0.35 | 2.52 |
| 鱼体长轴(cm) | 25.34 | 18.1 | 16.8 |
| 鱼体短轴(cm) | 7.03 | 4.69 | 10.01 |
| 鱼鳔相对倾角 | -11.12° | 9.67° | 7.30° |

模型介质参数采用 Furusawa(1988)对鲱鱼的实验结果, 鱼体的密度与声速参数为(1.04, 1.04c), 鱼鳔的密度与声速参数为(0.00129, 0.23c), 海水盐度和温度的参数由 YSI 水质测定仪测得。经测定, 鱼体所处水层水深 0.4m, 温度 26.04°C, 盐度 25.43, 海水声速 1564.2m/s, 海水密度为 1015.8kg/m³。

1.2.4 模型目标强度评估 根据评估模型, 应用 Matlab 7.0 软件编程, 以 0.1 度为间隔计算鱼体目标强度, 得出目标强度随声波入射角变化(即鱼体倾角)的分布, 角度取值范围 $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 。鱼体倾角为相对水平面的角度, 取头部向上为正, 头部向下为负。

2 结果与分析

2.1 实验测定结果与分析

在图 2 中给出了得出鱼类声学目标强度随角度变化关系。

从图 2(a)中可以看出, 小黄鱼目标强度的最大值出现在 4°, 最小值出现在 -40°, 次最小值出现在 14°, 平均值为 -51.3°dB。从 -40°到 40°范围内一共有 22 个主瓣, 左侧自 -38°以后下降速度较快, 右侧在 38°后略有回升。从图 2b 中可以看出, 大黄鱼目标强度的最大值出现在 -2°, 最小值出现在 15°, 次最小值出现在 -40°, 平均值为 -46.6°dB。从左至右一共有 21 个主瓣, 左侧自 -38°后下降速度较快, 右侧在 39°后略有回升。从图 2c 中可以看出, 银鲳目标强度的最大值出现在 10°, 最小值出现在 30°, 次最小值出现在

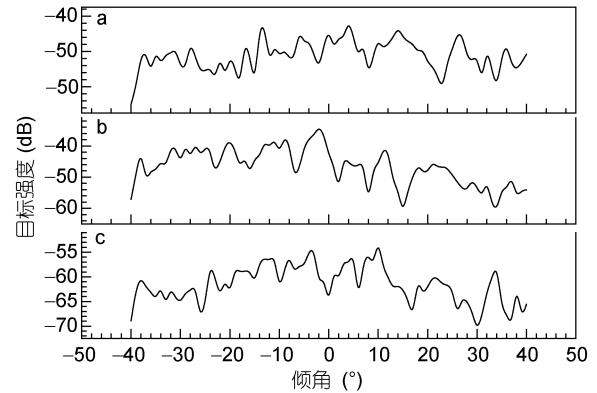


图 2 实验条件下鱼类的目标强度随角度变化

Fig.2 The target strength of fish varying with tilt-angle in experimental situations

-40°, 平均值为 -61.6°dB。主瓣数为 22, 整体趋势自中心向两侧依次降低, 左侧自 -38°后下降速度较快, 右侧在 38°后回升。

从图 2 可以看出, 鱼类的目标强度随角度变化较为敏感, 且变化幅度较大, 目标强度最大值和最小值相差大于 15dB。目标强度的最大值出现在 -10°和 10°之间, 图形有一定的规律性, 目标强度在左侧 -38°后下降速度较快, 右侧在 39 度附近回升。不同鱼种目标强度随角度变化趋势略有不同, 具体表现为目标强度最大值出现角度、各峰峰值大小、各峰出现的角度间隔不同。将大黄鱼、银鲳和小黄鱼的目标强度最小值和次最小值对比后发现, 小黄鱼最小值出现角度和大黄鱼、银鲳的次最小值角度一致, 因此推测大黄鱼和银鲳的目标强度值在 -40°时仍有下降的趋势, 其最小值应在 -40°以后。从图 2 中还可以看出, 目标强度的主瓣宽度大致相同, 主瓣峰值整体趋势以目标强度最大值为中心向两侧依次降低, 且左侧主瓣较为密集, 右侧主瓣较左侧略为稀疏, 部分主瓣为不规则的波峰, 但整体上较为规则, 因此推测主瓣的不规则可能与桶内回波和环境中的噪音有关。

2.2 理论模型估算结果与分析

小黄鱼、大黄鱼等实验用鱼模型的目标强度随角度变化如图 3 所示。

从图 3 中可以看出鱼体的目标强度有一个最大的峰值, 出现在 -10°和 10°之间, 自峰值中心向两侧减弱, 峰值两侧不对称。对比图 3a、3b 和 3c 还可以看出不同种类鱼的目标强度峰值所处角度不同; 小黄鱼目标强度最大值出现在 9.5°, 大黄鱼目标强度最大值出现在 -3.5°, 银鲳最大值出现在 9°, 这与鱼鳔和鱼体的相对倾角有关; 大黄鱼鱼鳔相对倾角为负, 小

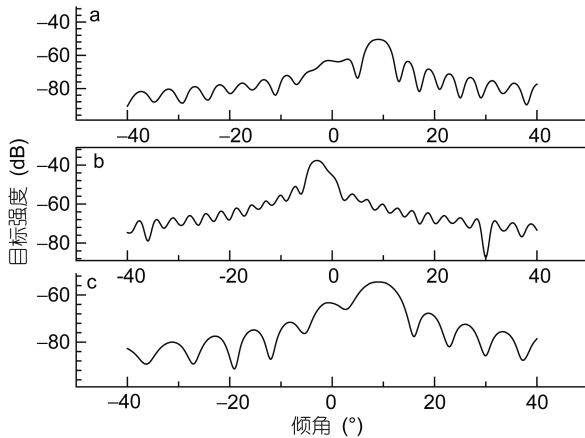


图 3 理论鱼类的目标强度随角度变化

Fig.3 Theoretical target strength of fish varying with tilt-angle

黄鱼和银鲳的鱼鳔相对倾角为正。对比图 3a、图 3b 和图 3c 还可以看出不同种类鱼的同一角度范围内目标强度主瓣数和主瓣宽度不同, 这与鱼的体长有关, 体长越长, 同一角度范围内主瓣数越多、主瓣宽度越窄, 目标强度随角度的变化幅度越大。

3 讨论

3.1 理论模型和实验测定的结果对比

从理论模型的模拟结果可以看出, 理论目标强度的最大值以及出现角度和实验测定结果一致, 理论目标强度的主瓣数随鱼种改变变化幅度较大; 实验测定结果可以看出, 实验目标强度的主瓣数和实验鱼种类无关。根据理论目标强度的计算公式, 目标强度的主瓣数和声波的发射频率以及鱼体的长度成正比相关, 不符合实验得出的主瓣数和鱼种无关的结论, 因此可将理论目标强度测量式(7)中的 1 设定为常数值 C 。对比理论模型和实验测定的结果可以看出, 理论目标强度随角度变化的幅度较实验目标强度的变化幅度大, 因此在式(1)前加上修正系数 $C1$, 式(1)后加上修正系数 $C2$, 修正后的目标强度公式为式(19)。

$$D(\theta) = \frac{\sin(kC \sin(\theta))}{kC \sin(\theta)} \cos^2(\theta),$$

$$TS = 10 * C1 \log(\sigma / 4\pi) + C2 \quad (19)$$

其中 C 为常数值, $C1$ 为修正系数, $C2$ 为修正值。鱼类的目标强度与鱼类的长度有关, 因此修正值 $C2$ 与鱼类的长度有关。应用 origin8.0 软件的自定义函数拟合功能, 分别得出大黄鱼、小黄鱼和银鲳的 $C1$ 和 $C2$ 值(表 3), 拟合后的图形如图 4 所示。

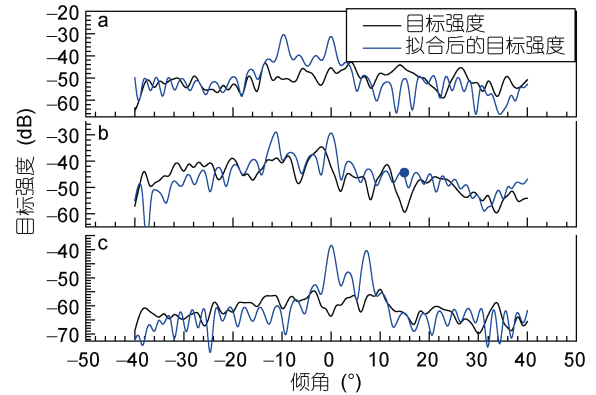


图 4 鱼类目标强度拟合结果

Fig.4 Result of simulation for fish target strength

表 3 修正系数及修正值

Tab.3 The correction factor and modification value

| 实验鱼 | 大黄鱼 | 小黄鱼 | 银鲳 |
|-----|---------|---------|---------|
| C | 1.12567 | 1.01273 | 1.02185 |
| C1 | 0.54133 | 0.58298 | 0.66468 |
| C2 | 1.01757 | 1.01803 | 1.00435 |

从图 4 中可以看出, 拟合后的函数图形和实验结果较为近似, 具体表现为波峰数量、出现角度和形状近似; 部分波形有所偏差, 可能和鱼鳔参数测量方法以及测量环境中的噪音有关。从图 4 中还可以看出, 修正后的椭球体模型法能够较好地反映目标强度(TS)随角度的变化。

3.2 目标强度与倾角分布的关系

反向散射指向性暗示着鱼类目标强度与倾角分布之间存在密切关系, 本文根据椭球体模型计算了不同角度下鱼类的目标强度, 并通过实验的方法进行验证和修正模型的计算公式, 进一步证实了倾角对鱼类目标强度的重要作用。鱼类的倾角随着昼夜变化、摄食、躲避敌害等行为发生变化, 因此其目标强度也会发生相应的变化。根据实验测定结果, 目标强度的最大值和最小值相差超过 15dB, 因此在资源评估和网箱监控的过程中, 若忽视倾角对目标强度的影响, 将对其精度造成不可忽视的影响。

3.3 鱼鳔对反射声能的贡献

根据 Foote(1980)的研究结果, 鱼鳔是反射声能的主要器官, 占据总反射强度的 90%—95%。因此目标强度的最大值应在鱼鳔倾角附近, 然而根据实验测定的结果, 目标强度最大值的角度和鱼鳔相对鱼体倾角不同, 可能是因为除鱼鳔外还有另外一个对目标强度影响较大的器官。鲸鱼、海豚等动物主要的声反射器官为肺部和脂肪层(Miller *et al*, 2001), 鱼

类同样有脂肪层,因此推测这个影响目标强度最大值出现角度的器官可能为脂肪层。因此在今后的研究中,有必要研究鱼体的各个部分对鱼体总目标强度值的贡献。

4 结语

目标强度是渔业资源调查和网箱声学监控的重要参数,而倾角分布是影响目标强度大小的关键性因素。以上研究结果表明,修正后的椭球体模型可以较好地反映目标强度和角度的关系。目标强度和倾角分布的理论模型研究可以作为现场测定方法的有效补充,对提高目标强度评估、进而提高网箱监控、鱼类资源评估的准确性,以及进一步研究鱼类目标强度发挥着重要作用。

参 考 文 献

- 于海圆, 赵宪勇, 2007. 鳊鱼(*Engraulis japonicus*)目标强度的模型法研究. 应用声学, 26(5): 267—276
- 张 波, 2009. 鱼群声散射模型及其仿真研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 72
- 张婧雯, 2012. 枸杞岛海域褐菖鲈的声学目标强度研究及其应用. 上海: 上海海洋大学硕士学位论文, 36
- 赵宪勇, 陈嫩祯, 李显森等, 2003. 多种类海洋渔业资源声学评估技术和方法探讨. 海洋学报, 25(增刊 1): 191—202
- 赵宪勇, 陈毓桢, 1996. 狭鳕(*Theragra chalcogramma* Palas)目标强度的现场测定. 中国水产科学, 3(4): 19—27
- 栾 洋, 关长涛, 石晓天等, 2011. 大黄鱼和许氏平鲈声反射特征与体重和体长关系的研究. 渔业科学进展, 32(2): 47—52
- 谭细畅, 史建全, 张 宏等, 2009. EY60 回声探测仪在青海湖鱼类资源量评估中的应用. 湖泊科学, 21(6): 865—872
- Anderson V C, 1950. Sound scattering from a fluid sphere. Journal of the Acoustical Society of America, 22(4): 426—431
- Clay C S, Horne J K, 1994. Acoustic models of fish: The Atlantic cod (*Gadus morhua*). Journal of the Acoustical Society of America, 96(3): 1661—1668
- Colombo G A, Benović A, Malej A *et al*, 2008. Acoustic survey of a jellyfish-dominated ecosystem (Mljet Island, Croatia). Hydrobiologia, 616(1): 99—111
- Foote K G, 1980. Effect of fish behavior on echo energy: the need for measurements of orientation distributions. ICES Journal of Marine Science, 39(2): 193—201
- Francis R I C C, 1985. Two acoustic surveys of pelagic fish in Hawke bay, New Zealand, 1980. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 19(3): 375—389
- Furusawa M, 1988. Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength. Journal of the Acoustical Society of Japan, 9(1): 13—24
- Jech J M, Schael D M, Clay C S, 1995. Application of three sound scattering models to threadfin shad (*Dorosoma petenense*). Journal of the Acoustical Society of America, 98(4): 2262—2269
- Li S H, Nachtigall P E, Breese M *et al*, 2012. Hearing sensation levels of emitted biosonar clicks in an echolocating atlantic bottlenose dolphin. PLoS One, 7(1): e129793
- Mahfurdz A, Ahmad H, Abdullah S *et al*, 2013. Acoustic strength of green turtle and fish based on FFT analysis. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 4(9): 74—78
- Miller J H, Potter D C, 2001. Active high frequency phased-array sonar for whale shipstrike avoidance: target strength measurements. In: MTS/IEEE Conference and Exhibition. Honolulu, HI: IEEE, 4: 2104—2107
- Sasmowiyono S, Yundhana A, Din J *et al*, 2010. Fish species identification based on its acoustic target strength using *in situ* measurement. Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation, 3(3): 195—209
- Simmonds J E, MacLennan D N, 2006. Fisheries Acoustics. London: Blackwell Publishers Professional, 437
- Tang Y, Nishimori Y, Furusawa M, 2009. The average three-dimensional target strength of fish by spheroid model for sonar surveys. ICES Journal of Marine Science, 66(6): 1176—1183
- Wareen J D, Stanton T K, McGehee D E *et al*, 2002. Effect of animal orientation on acoustic estimates of zooplankton properties. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 27(1): 130—138
- Yasuma H, Takao Y, Sawada K *et al*, 2005. Target strength of the lanternfish, *Stenobrachius leucopsarus* (family Myctophidae), a fish without an airbladder, measured in the Bering Sea. ICES Journal of Marine Science, 63(4): 683—692
- Zhao X Y, 2006. *In situ* target-strength measurement of young hairtail (*Trichiurus haumela*) in the Yellow Sea. ICES Journal of Marine Science, 63(1): 46—51

ON TARGET STRENGTH OF SEVERAL IMPORTANT ECONOMIC FISHES

SHANG Xiao-Ming, KONG Ling-Min, WU Chang-Wen

(Marine Science and Tecknology College of Zhejiang Ocean University,
National Engineering Research Center of Marine Facilities Aquaculture, Zhoushan 316022, China)

Abstract We studied the scattering property of yellow croaker *Pseudosciaena crocea*, redlip croaker *P. polyactis*, and pomfret *Pampus argenteus*, based on approximately ellipsoid model. Where the swim-bladder model is modeled by gas-filled ellipsoid model, and the fish body is modeled by liquid-filled ellipsoid model. We constructed an equipment of measuring target strength with changing the tilt-angle of fish and studied the target strength of yellow croaker, redlip croaker and pomfret with this equipment. Compared the theoretical results with experimental results, we construct three empirical formulas of target strength changing with angle, using data fliting method. The research shows that the angular distribution is an important parameter of effecting target strength, the difference between maximum and minimum value of target strength assumed to be greater than 15dB, the maximum value appears at -10° to 10° , while the minimum appears below -40° . The flited ellipsoid model could be a better response to directivity of target strength, so it could be an important supplement in in-situ measurements.

Key words yellow croaker *Pseudosciaena crocea*; redlip croaker *P. polyactis*; pomfret *Pampus argenteus*; backscattering; ellipsoid model; target strength