

文章编号: 1000-0615(2019)12-2533-12

DOI: 10.11964/jfc.20180611318

鸢乌贼目标强度绳系控制法测量

王欢欢^{1,2}, 张俊¹, 陈作志^{1*}, 汤勇²,
孙铭帅¹, 黄佳兴¹, 邱永松¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部外海渔业资源开发重点实验室, 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)

摘要: 2017年9月在南海北部(18°42.9'N, 113°05.5'E)附近的深海海域, 利用Simrad EY60型便携式分裂波束科学探鱼仪(120 kHz)和自制的鸢乌贼绳系控制装置对25尾鸢乌贼逐尾进行了单体目标强度(TS/dB)的测量, 探讨了鸢乌贼单体目标探测中脉冲长度决定水平(PLDL/dB)、最小标准脉宽(min NPL)、最大标准脉宽(max NPL)和短轴角度最大标准偏差(MIA)等参数的变化对鸢乌贼单体目标强度测量的影响, 分析了鸢乌贼单体TS的变化规律, 并归纳了鸢乌贼TS与胴长的关系。结果显示, ①随着PLDL增大, 所探测鸢乌贼单体目标的数量呈先增加后减少的特征, 并在PLDL=6 dB时达到峰值, 而平均TS则呈单调增加趋势; 随着min NPL增大, 鸢乌贼单体目标的数量减少, 在min NPL<0.7范围内, 平均TS呈明显的上升趋势; 当max NPL<1.2时, 鸢乌贼单体目标的数量随max NPL的增大而增加, 但平均TS却随之减小, 当1.2<max NPL<1.8时, 鸢乌贼单体目标的数量呈缓慢增加趋势, 但平均TS则基本保持稳定; 鸢乌贼单体目标数量随MIA的增大而增加, 但平均TS则随之减小。②本研究中鸢乌贼单体目标探测参数的优化组合为PLDL=6.00 dB, min NPL=0.7 dB, max NPL=1.8 dB, MIA=0.8°。③活体鸢乌贼单体平均TS的最大值和最小值分别为-48.6 dB和-63.63 dB, 其对应鸢乌贼的胴长(ML/cm)分别为25.2 cm和12.4 cm, 鸢乌贼TS与其ML的关系为 $TS=34.22 \lg ML-98.23$ (N=16, $R^2=0.603$)。本实验首次尝试利用绳系控制法海上现场测量活体鸢乌贼的目标强度, 为今后继续深入研究鸢乌贼声学散射特性积累了资料, 亦能为其他头足类或鱼类目标强度的海上现场测量提供参考。

关键词: 鸢乌贼; 渔业声学; 目标强度; 绳系控制法; 单体目标探测

中图分类号: S 951

文献标志码: A

鸢乌贼(*Sthenoteuthis oualaniensis*)隶属于头足类(Cephalopoda)、枪形目(Idiosepiida)、柔鱼科(Ommastrephidae)、鸢乌贼属(*Sthenoteuthis*), 广泛分布于印度洋和太平洋的热带和亚热带海域, 其中在中国南海海域不但分布广泛, 而且现存资源量丰富, 是当前及今后一段时间内南海海外最具开发潜力的大洋性渔业资源^[1-4]。

当前中国南海北部近海渔业资源因过度捕捞及海洋生物栖息地退化等原因严重衰退, 而南

海外海鸢乌贼等大洋性渔业资源却利用不足^[4-6]。为推动鸢乌贼等大洋性渔业资源的合理利用, 近年来中国综合采用多种手段对南海鸢乌贼等大洋性渔业资源做了系统调查, 初步建立了南海大洋性渔业资源声学—灯光罩网评估技术, 该技术已成为南海大洋性渔业资源评估的基本方法^[7-10]。然而, 由于渔业声学在中国南海大洋性渔业资源中应用时间较短, 资料积累和技术储备尚很薄弱, 鸢乌贼、黄鳍金枪鱼(*Thunnus alb-*

收稿日期: 2018-06-10 修回日期: 2018-10-12

资助项目: 国家重点研发计划(2018YFC1406502); 农业农村部财政专项(NFZX2018); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2017YB19)

通信作者: 陈作志, E-mail: zzchen2000@163.com

acares)、鳀(*Katsuwonus pelamis*)等主要渔业种类的声学散射特性研究不足,且目标强度(target strength, TS)的研究方法仅限于现场测定。因此,亟需采用不同方法对主要鱼类的TS作比较研究以提高资源评估精度^[11-14]。

目标强度是描述单个目标对声波反射能力的物理量,是渔业资源声学评估中由声学积分值计算生物资源量的关键参数,其准确性直接影响渔业资源声学评估的精确度^[15-16]。TS的研究方法包括实测法和理论模型法,其中实测法可以分为现场测定法、绳系控制法和网箱控制法^[17]。我们曾利用现场测定法对鸢乌贼TS作过研究,并取得了很好的结果^[18]。在前期研究的基础上,本实验首次尝试利用绳系控制法对海上现场手钓采集的活体鸢乌贼单体的TS进行逐尾测量,旨在掌握鸢乌贼单体TS的分布规律和变化特征,为系统了解鸢乌贼声学散射特性和提高鸢乌贼资源声学评估精度提供基础数据。

1 材料与方 法

1.1 实验时间、地点和船只

实验时间为2017年9月28—29日夜间20:00—次日03:00,地点为南海北部外海18°42.9'N、113°05.5'E附近的深海海域。实验船只为灯光罩网渔船“桂北渔80208”,总吨位421 t,船长43.6 m,船宽7.6 m,吃水4.1 m。实验过程中船只主机关闭,放置海锚,以1 kn的速度漂流。

1.2 鸢乌贼生物样品采集和处理

鸢乌贼生物样品由手钓现场采集。钓具型号为SE-58型,钓线直径为0.470 mm。手钓采样于渔船左舷进行,为减小集鱼灯光照对右舷实验中鸢乌贼行为的影响,实验中仅打开左舷5盏集鱼灯诱集鸢乌贼(1 kW/盏)。本实验分别对22尾活体和3尾死亡鸢乌贼样品的TS进行了测量,其中1尾活体样品在实验过程中丢失。

鸢乌贼生物样品采集出水后,立即被置于预先装满海水的圆柱形容器中,容器高50 cm,直径40 cm。在容器中,尽可能快地用直径为0.3 mm的尼龙线环系于头和躯干的结合部,该操作既要保证鸢乌贼样品不会从系环逃脱,又要保持系环适度的松弛以尽可能降低其对样品的伤害。首先将样品和容器一起移至船舷,然后将

样品从容器中取出放入海中,再移至探鱼仪波束下。

1.3 鸢乌贼单体目标强度数据采集

鸢乌贼单体TS海上绳系控制法测量装置(图1)。系于鸢乌贼样品颈部的尼龙线连接于系有铅坠的主线,主线为直径0.6 mm的尼龙线。系缚鸢乌贼的支线长为0.55 m,支线与主线的接点距离铅坠1.5 m。TS测量时鸢乌贼样品尽可能置于换能器正下方。

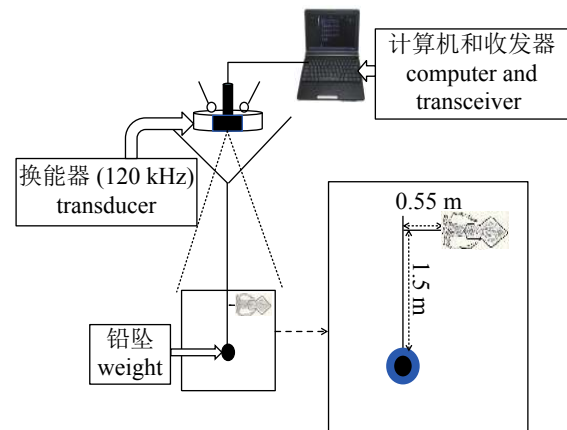


图1 鸢乌贼目标强度绳系法测量示意图

Fig. 1 Sketch of target strength measurement of tethered purpleback flying squid (*S. oualaniensis*)

鸢乌贼单体TS数据由Simrad EY60(120 kHz)分裂波束科学探鱼仪采集,表1为换能器的主要参数。TS测量之前,根据国际通用标准目标法^[19,20],利用直径23 mm的标准铜球对科学鱼探仪进行现场校正。

每个鸢乌贼样品单体TS测量完毕后,随即用YSI Pro Plus(USA)现场测定7.5 m水深处的环境指标,包括温度、盐度、溶解氧等6项,以分析环境指标是否发生明显变化及其对鸢乌贼行为及TS的可能影响。

1.4 鸢乌贼单体目标的探测及其参数的选择和优化

鸢乌贼单体TS声学数据由软件Echoview 6.1(Myriax Software Pty Ltd, TAS, Australia)进行分析。基于前期研究结果,本实验将体积反向散射强度(volume backscattering strength, S_v)和TS阈值分别定为-76 dB和-70 dB^[7-8, 18]。鸢乌贼单体TS数据分析的主要步骤:①利用Echoview软件中新变

表 1 Simrad EY60 科学鱼探仪 120 kHz 换能器的主要参数

Tab. 1 Main parameters of EY60 scientific echosounder with 120 kHz transducer		
参数 parameter	120 kHz 换能器 120 kHz transducer	单位 unit
换能器型号 transducer type	ES120-7C	
发射功率 transmitted power	500	W
纵向波束宽度 alongship 3 dB beam width	7.00	(°)
横向波束宽度 athwartship 3 dB beam width	7.00	(°)
波束等效立体角 equivalent beam angle	-21.0	dB
换能器增益 transducer gain	27.00	dB
吸收系数 absorption coefficient	0.046	dB/m
测量深度 range	50	m
脉冲间隔 ping interval	1	s

量构建功能, 以 TS 原始脉冲数据 (TS raw pings) 和角位置原始脉冲数据 (angular position raw pings) 为运算元, 创建分裂波束法的单目标探测变量 (single target detection - split beam, method 2); ② 根据鳶乌贼单体所处的深度、回波映像的变化、TS 值的大小来确定分析鳶乌贼单体 TS 的上下深度边界, 利用 Echoview 软件数据分类功能将确定的鳶乌贼单体目标声学映像定义为“可分析区域数据” (analysis region data) 以待分析, 该步骤应尽可能确保所有鳶乌贼单体 TS 数据均被选择, 又要将非鳶乌贼单体的回波信号排除, 因此需要仔细辨识, 其中月牙形或波浪线形的单目标轨迹是判别鳶乌贼单体回波信号的基本线索^[21]; ③ 将单目标探测映像中的 TS 值提取输出, 分析其分布特征, 并计算平均 TS。鳶乌贼单体目标探测和 TS 分析中部分参数设置见表 2。

单体目标探测中, 参数的选择对探测结果有重要影响^[22-23]。为分析参数变化对鳶乌贼单体目标强度测量结果的影响, 本实验以胴长最小 (10.8 cm) 的活体鳶乌贼单体 TS 数据为对象, 在控制其他参数不变情况下, 分别单独改变脉冲长度决定水平 (pluse length determination level, PLDL/dB)、最小标准脉宽 (min normalized pluse length, min, NPL)、最大标准脉宽 (max normalized pluse length, max NPL)、短轴角度最大标准偏差 (maximum standard deviation of minor-axis angles, MIA) 和长轴角度最大标准偏差 (maximum standard

表 2 鳶乌贼单体目标探测和 TS 分析中的参数设置

Tab. 2 Setting of some parameters concerning single target detection and TS analysis for <i>S. oualaniensis</i>		
参数 parameter	设置 setting	单位 unit
单目标探测方法 single target detection method	split beam - method 2	
目标强度阈值 TS threshold	-70	dB
脉冲长度确定水平 pluse length determination level	6.00	dB
最小标准脉宽 min normalized pluse length	0.7	
最大标准脉宽 max normalized pluse length	2.0	
最大波束补偿 max beam compensation	4	dB
最大相位偏差 maximum phase deviation	4	
短轴角 minor-axis angles	0.8	(°)
长轴角 major-axis angles	0.8	(°)

deviation of major-axis angles, MAA) 等参数, 分析以上各参数的变化对鳶乌贼单体目标强度测量结果的影响, 以确定最优的参数设置 (表 2)。

1.5 鳶乌贼单体平均目标强度的计算

鱼类 TS 的一般定义:

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

式中, σ_{bs} 是鱼体的后向散射截面 (backscattering cross-section, m^2), 可以理解为鱼体对入射声波产生散射的等效面积^[15]。

每尾鳶乌贼单体的平均 TS 的计算方法: 首先将该单体所有单目标回波的 TS (TS_i) 转化为线性值, 得到声散射截面 (σ_i), 然后计算所有后向散射截面的平均值 ($\frac{\sum_i^n \sigma_i}{n}$), 对平均声散射截面取以 10 为底的对数, 即得到该鳶乌贼单体的平均 TS (\overline{TS}), 其详细计算公式:

$$\sigma_i = 10^{TS_i/10} \quad (2)$$

$$\overline{TS} = 10 \lg \left(\frac{\sum_i^n \sigma_i}{n} \right) \quad (3)$$

鳶乌贼 TS 与胴长的关系通过方程^[24]:

$$TS = a \lg (ML) + b \quad (4)$$

进行拟合, 式中 a 和 b 是待求常数。利用 Microsoft Excel 2013 和 Matlab R2014a 进行数据计算和统计分析, 探讨鳶乌贼 TS 与 ML 的分布图以及 TS 与 $\lg ML$ 的线性关系。利用 Kruskal-Wallis 和 Jonckheere-Terpstra 非参数检验比较鳶乌贼单体之间

TS分布的差异。统计检验显著性水平均设为0.05。不同检验方法结果均显著时，差异才视为显著。

2 结果

2.1 鸢乌贼样品胴长组成

25尾鸢乌贼样品均属于中型群个体，其胴长范围和平均胴长分别为10.8~25.2 cm和(15.9±3.58)cm，其中22尾活体样品的胴长范围和平均胴长分别为10.8~25.2 cm和(15.5±3.65)cm，3尾死亡样品的胴长范围和平均胴长分别为17.6~20.2 cm和(18.6±1.16)cm(表3)。鸢乌贼样品优势胴长组包括10.5~14.5 cm和14.5~18.5 cm，均占样品总数的40%。鸢乌贼样品胴长极差较大(14.4 cm)，这有利于更全面地反映TS与胴长的关系(图2)。但实验未能采集到10 cm以下的鸢乌贼样品，导致无法分析小型鸢乌贼个体的TS，也是鸢乌贼手钓采样的一个不足之处。

2.2 鸢乌贼单体目标探测参数的选择与优化

PLDL设定范围为2~30 dB。随着PLDL增加，所探测到的鸢乌贼单体目标的数量呈先增加后减少的变化特征，并在PLDL=6 dB时达到峰值，而平均TS则呈单调增加趋势(图3-a)。参考头足类TS相关文献^[18, 25]，本研究将PLDL定为6 dB。

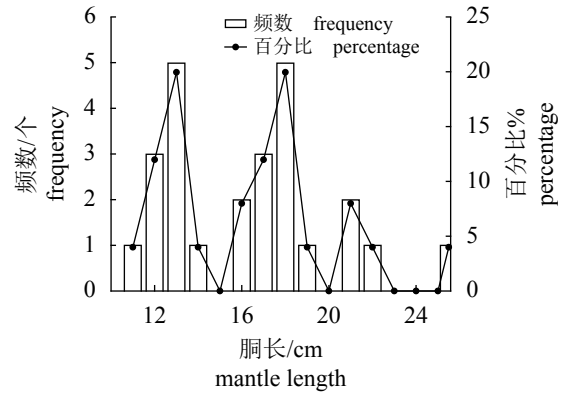


图2 鸢乌贼样品胴长分布

Fig. 2 Mantle length distribution of *S. oualaniensis* specimens

Min NPL和max NPL设定范围分别为0.1~1.4和0.8~2.5(图3-b, c)。当单体目标回波的脉冲长度介于min NPL和max NPL之间时，则该单脉冲信号被识别为单体信号。随着min NPL增加，单体目标的数量呈单调减少，而平均TS则出现多个极大值和极小值点。在min NPL<0.7范围内，平均TS呈明显的上升趋势；当min NPL=0.7时，单体目标数量和平均TS均处于理想水平。与min NPL=0.7时的平均TS相比，虽然min NPL=1.1时的平均TS比前者增加了0.28 dB并达到峰值，但后者单体目标数量急剧下降，且目标数量与平均

表3 鸢乌贼样品胴长和状态

Tab. 3 Mantle length (ML) and activity of *S. oualaniensis* specimens

样品 specimen	胴长/cm ML	备注 remarks	样品 specimen	胴长/cm ML	备注 remarks
1	11.7	鲜活样品，取回仍存活	14	12.2	样品活性低
2	12.7	鲜活样品，取回仍存活	15	11.4	鲜活样品，取回仍存活
3	18.3	将死样品，取回仍存活	16	17.9	死亡样品
4	17.3	鲜活样品，取回死亡	17	15.8	鲜活样品，取回死亡
5	12.2	活性较低，取回死亡	18	13.0	鲜活样品，取回仍存活
6	17.6	死亡样品	19	20.4	鲜活样品，取回仍存活
7	17.0	鲜活样品，不久后丢失	20	17.7	鲜活样品，测量中丢失
8	13.9	样品取回过程中丢失	21	20.2	鲜活样品，取回仍存活
9	10.8	取回过程中样品丢失	22	12.0	死亡样品
10	18.0	样品丢失	23	25.2	鲜活样品，取回仍存活
11	21.4	鲜活样品，取回仍存活	24	15.9	鲜活样品，取回死亡
12	16.2	鲜活样品，取回死亡	25	16.3	鲜活样品，取回仍存活
13	12.4	鲜活样品，取回死亡			

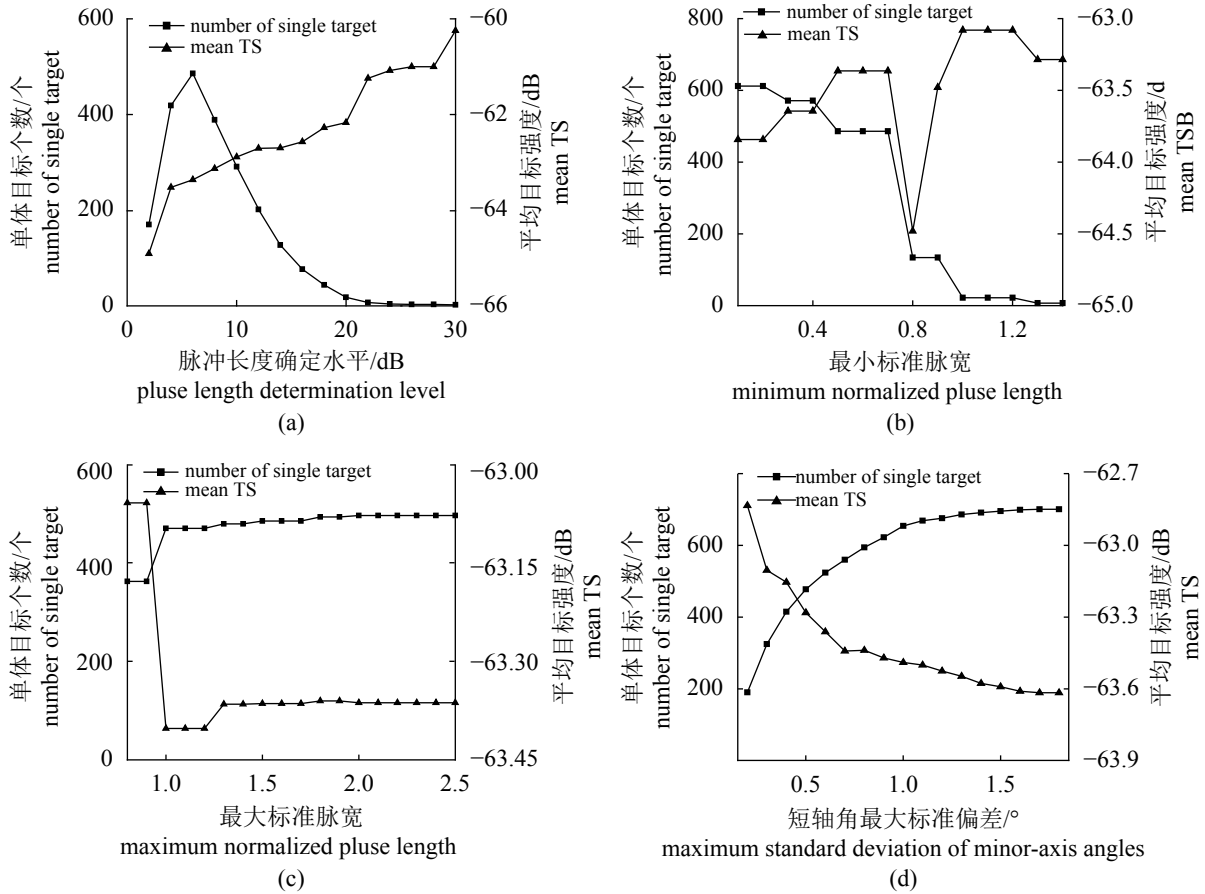


图3 鳶乌贼单体目标数量及其平均TS随探测参数的变化

(a)脉冲长度确定水平, (b)最小标准脉宽, (c)最大标准脉宽, (d)短轴角度最大标准偏差

Fig. 3 Variation of single target number and their mean TS for *S. oualaniensis* versus single-target detection parameters

(a) pluse length determination level (PLDL), (b) min normalized pluse length (min NPL), (c) max normalized pluse length (max NPL), (d) maximum standard deviation of minor-axis angles (MIA)

TS呈明显背离趋势, 因此, 本实验将min NPL定为0.7(图3-b)。当max NPL<1.2时, 单体目标的数量随max NPL的增大而增加, 但平均TS却随之减小; 当1.2<max NPL<1.8时, 单体目标的数量略有增加, 但非常缓慢, 而平均TS则基本保持稳定, 因此, 本实验将max NPL定为1.8(图3-c)。

MIA与MAA协同变化, 本实验将其定为相同值, 仅分析MIA变化对单目标探测的影响(图3-d)。随着MIA的增大, 单体目标数量增加, 但平均TS则随之减小; 当MIA>1.8°时, 二者基本不再变化。综合考虑单体目标数量和平均TS值并参考已有研究^[18], 本实验将MIA和MAA均定为0.8°。

2.3 鳶乌贼单体声学映像

鳶乌贼单体的体积反向散射强度(S_v)映像结果显示, 通过分析 S_v 映像, 基本确定12~14 m水

层的声学映像即是鳶乌贼单体的映像; 6 m以浅水层的声学映像是海水表面扰动和换能器近、远场效应所产生的映像; 15~16.5 m水层的声学映像则是铅坠的回波信号(图4)。鳶乌贼单体的单目标探测映像结果显示, 通过限定分析水层, 仅显示鳶乌贼单体的回波, 用于探测和追踪其单体目标, 然后输出所有单体目标TS以进一步分析其变化规律(图5)。

2.4 鳶乌贼单体目标强度的变化规律

由21尾(共22尾活体样品, 1尾测量过程中丢失)鳶乌贼活体样品的目标强度分布可知, 活体鳶乌贼单体平均TS的最大值和最小值分别为-49.95 dB和-68.90 dB, 其相应胴长分别为25.2 cm和12.2 cm, 而胴长最小样品(10.8 cm)的平均TS为-61.98 dB(图6)。第6尾(ML=17.0 cm, 平均

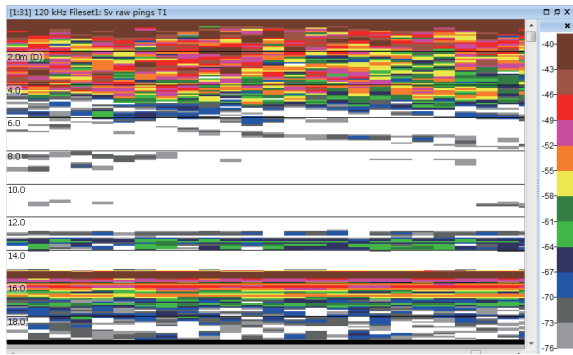


图4 鳇乌贼单体体积反向散射强度声学映像

Fig. 4 Volume backscattering strength (S_v) echogram of single *S. oualaniensis*

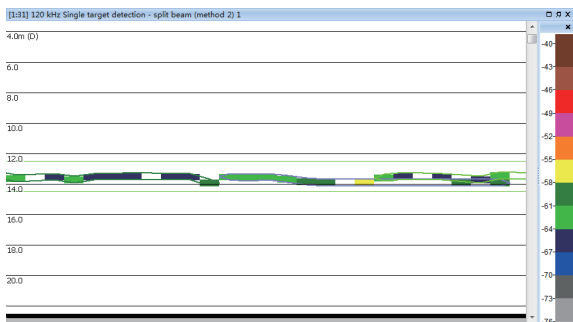


图5 鳇乌贼单目标探测映像

Fig. 5 Single target detection echogram of *S. oualaniensis*

TS=-66.57 dB)、第9尾(ML=21.4 cm, 平均TS=-56.22 dB)、第11尾(ML=12.4 cm, 平均TS=-68.42 dB)和第12尾(ML=12.2 cm, 平均TS=-69.01 dB)样品单体回波数量N分别只有26、24、13和14个, 明显偏少, 其原因包括实验中样品丢失而导致声学回波信号采集时间短、样品运动活性低或无运动活性, 导致无法采集到有效的单体目标运动轨迹(表3)。

第19尾样品(ML=25.2 cm, N=288, 平均TS=-53.30 dB)目标强度极差最大, 为27.95 dB(-69.70~-41.75 dB)。胴长相同或非常接近的鳇乌贼单体TS分布的双样本非参数检验显示, 第11尾(ML=12.4 cm, N=13, 平均TS=-68.42 dB)与第12尾(ML=12.2 cm, N=14, 平均TS=-69.01 dB)鳇乌贼单体TS分布无显著差异(Mann-Whitney检验, $P>0.05$; Kolmogorov-Smirnov Z检验, $P>0.05$); 第14尾(ML=15.8 cm, N=786, 平均TS=-65.87 dB)与第20尾(ML=15.9 cm, N=376, 平均TS=-65.47 dB)鳇乌贼单体TS分布有显著差异

(Mann-Whitney检验, $P<0.01$; Kolmogorov-Smirnov Z检验, $P<0.01$); 第16尾(ML=20.4 cm, N=58, 平均TS=-61.71 dB)与第18尾(ML=20.2 cm, N=58, 平均TS=-60.11 dB)鳇乌贼单体TS分布没有显著差异(Mann-Whitney检验, $P>0.05$; Kolmogorov-Smirnov Z检验, $P>0.05$)。

2.5 鳇乌贼目标强度与胴长的关系

选取其中16尾单体目标强度频率分布较好的鳇乌贼单体, 对其平均TS和ML进行回归分析, 鳇乌贼TS与其ML的关系: $TS=34.22 \lg(ML)-98.23$ (N=16, $R^2=0.603$) (图7)。

3 讨论

3.1 鳇乌贼单体探测参数的选择

单体目标检测中, 对于每一个单脉冲回波信号, 脉冲长度决定水平(PLDL)像一个“门槛”, 只有位于PLDL线之上的点才被进行角度标准偏差的判别^[21]。若脉冲信号角度标准偏差小于最大标准偏差(MIA, MAA), 则该信号被保留, 否则被剔除。PLDL设定既要考虑探测单体目标的数量, 亦需要根据研究对象的声学散射能力, 保证探测单体的TS分布和均值处于合理范围内, 如TS分布是否属于正态分布。单体目标回波信号的脉冲长度只有介于min NPL和max NPL之间, 该单体回波才能被识别, 因此, min NPL越小或max NPL越大即二者的差值越大, 单体目标数量越多。但随着单体目标数量增加, 其平均TS会随之变化, 因此, 单体目标数量并非越多越好, 还需要兼顾平均TS值的大小^[21-22]。

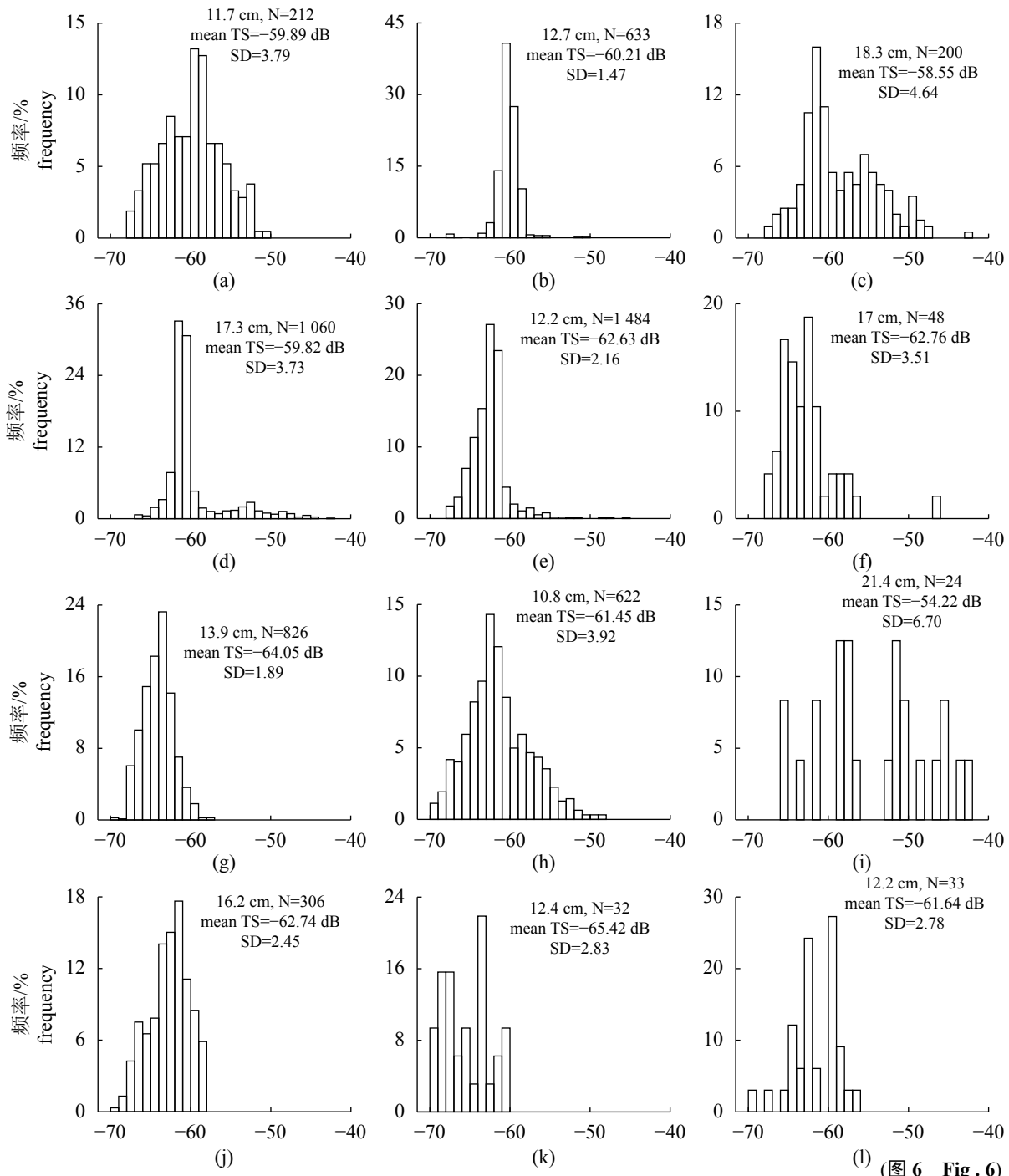
由于个体尺寸、声学散射特征、密度组成等因素甚至非自然环境中的差异, 根据不同的研究对象或测量环境, 参数设置一般会有所不同, 如Josse等^[26]现场测定黄鳍金枪鱼和鳀TS时将min NPL、max NPL和最大相位偏差分别定为0.8、1.8和2.0, 而Zhang等^[18]现场测定鳇乌贼TS时, 将min NPL、max NPL和最大相位偏差分别定为0.75、1.50和4.0。本实验从控制单一变量的角度分析了鳇乌贼单体目标探测效果与参数选择的关系, 同时综合考虑不同参数对鳇乌贼单体目标的数量和平均TS值的大小, 将鳇乌贼单体目标探测参数设为PLDL=6.00 dB, min NPL=0.7 dB、max NPL=1.8 dB、MIA=0.8°。然

而, 各参数对单体目标探测的影响可能并不是孤立的, 因此, 多个参数同时改变对单体目标探测的协同效应尚需继续研究。

3.2 影响鸢乌贼单体目标强度变化的因素

影响鸢乌贼TS的因素很多, 如鸢乌贼在水中的方位及其与声波的入射角度、样品活性、行为变化、目标胴长、生理状态(如性腺成熟度和胃饱满度)、声波频率等^[27-30]。本实验胴长最大

的鸢乌贼个体的TS最小值和最大值相差27.95 dB, 胴长最小的鸢乌贼个体的TS最小值和最大值相差17.16 dB, 而其他19尾鸢乌贼单体TS最小值和最大值之差均介于9.6 dB和28.0 dB之间。胴长相同或相近的个体, 其TS分布和均值却存在明显差异, 如第4、11和12尾(图6)。由此可见, 鸢乌贼单体TS值波动范围很宽, 这与TS随机分布性有关^[17]。实验中, 6尾鸢乌贼样品入水时为鲜



(图 6 Fig. 6)

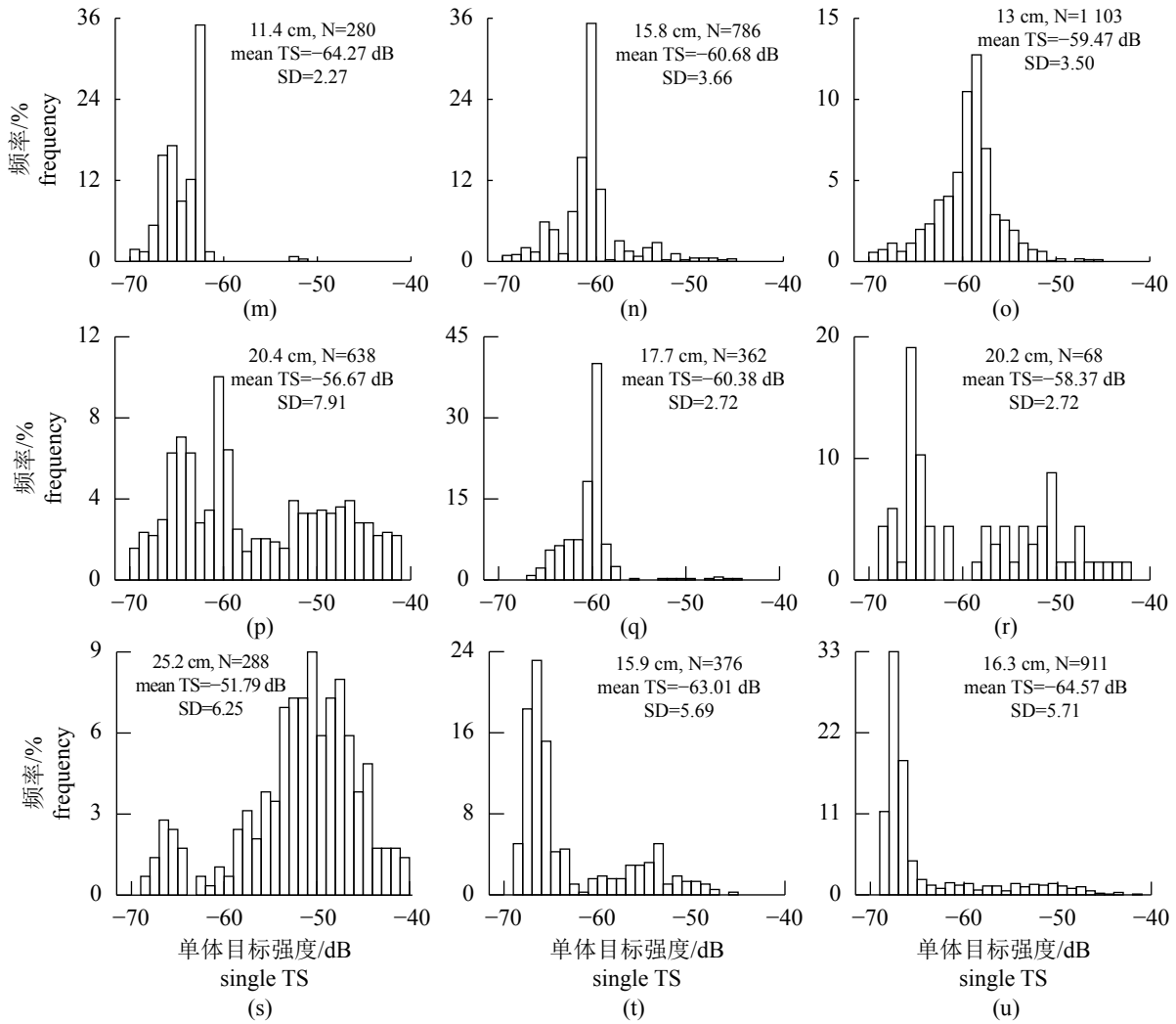


图 6 21尾鳮乌贼单体目标强度值频率分布直方图

(a)~(u)分别表示第1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25尾鳮乌贼 (对应表3)

Fig. 6 Frequency distribution histogram of single TS from 21 specimens

(a)~(u) represent the 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25 tail *S. oualaniensis*, respectively (corresponding table 3)

活, 但取回之后已经死亡。由于死亡样品身体柔软无力, 内部结构也可能发生变化, 且失去游泳能力后, 其身体(头—尾方向)可能会垂直水面而导致与入射声波的夹角明显减小, 从而导致TS降低。

本实验多数鳮乌贼单体TS呈正态分布或接近正态分布(图6), 符合对其TS正态分布的预期; 但个别鳮乌贼单体TS明显呈现非正态分布或单体回波极少, 如图6中的第11、12、13、20、21尾样品和表3中的第7、13尾样品, 其原因包括样本丢失而导致单体TS数据采集不足, 或样本活性降低甚至死亡而导致其姿态和TS分布异常。以上异常数据均不被用于拟合鳮乌贼TS与胴长的关系。

3.3 鳮乌贼目标强度测量方法的差异性

中国学者采用原位现场法(*in situ*)研究南海鳮乌贼的声学目标强度^[14]。Zhang^[31]利用Simrad EK500(38 kHz)探鱼仪和手钩采样(25尾样品)现场测量南海鳮乌贼的TS, 基于非线性约束因子算法归纳其TS与ML之间的关系: $TS_{38\text{ kHz}} = 22.71 \lg ML - 77.1$ ($ML: 10\sim 32\text{ cm}$), 但就现场法而言, 生物样品数量显得不足。杨权等^[7]利用Simrad EY60 120 kHz探鱼仪和灯光罩网采样, 采用现场法对南海鳮乌贼的研究表明, 其平均TS与平均ML的关系: $\overline{TS}_{120\text{ kHz}} = 21.23 \lg \overline{ML} - 82.48$ ($\overline{ML}: 10.4\sim 14.2\text{ cm}$)。该实验通过灯光罩网采集鳮乌贼样品, 解决了鳮乌贼TS在现场法测量中生物样品

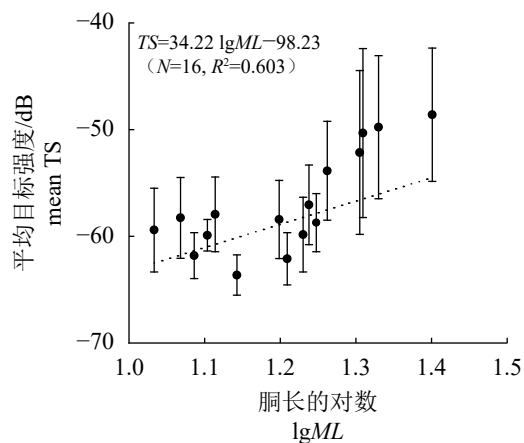


图7 鳶乌贼平均目标强度与胴长的关系

Fig. 7 Relationship between mean TS and ML of *S. oualaniensis*

不足和代表性不强的问题。Zhang等^[18]利用Simrad EY60探鱼仪和灯光罩网采样对南海鳶乌贼TS的现场研究表明, 灯光诱集而导致的鳶乌贼密度升高会产生明显的重叠回波问题, 即鳶乌贼单体现场TS会随着鳶乌贼密度的升高而升高, 在考虑并尽量克服重叠回波的基础上, 得到鳶乌贼平均TS与平均ML的关系:

$$\overline{TS}_{70\text{kHz}} = 19.13 \lg \overline{ML} - 77.84 (\overline{ML} : 7.5 \sim 25 \text{ cm});$$

$$\overline{TS}_{120\text{kHz}} = 26.68 \lg \overline{ML} - 88.00 (\overline{ML} : 7.5 \sim 25 \text{ cm}).$$

综合以上研究发现, 随着声波频率增大, 鳶乌贼TS呈升高趋势。

现场法测量鳶乌贼TS的主要优势是目标处于自然状态下, 受到的人为干扰少, 测量结果一般可以直接应用于资源声学评估^[17]。由于该方法以整个鳶乌贼群体为对象, 得到的是平均TS和平均ML, 所以难以有效研究鳶乌贼单体的声学散射特性。绳系控制法通过分析鳶乌贼单体TS变化规律, 有助于了解其单体的声学散射特征, 但由于受到人为因素的控制, 实验过程中其行为可能发生异常变化, 以致得到的TS数据可能与自然状态下的实际值存在差距。因此, 利用不同方法对鳶乌贼TS作比较研究, 无论是对提高资源评估精度, 还是了解其声学散射特征均有重要意义。

本实验是首次尝试海上受控法测量活体鳶乌贼的TS, 为今后深入研究鳶乌贼声学散射特性和提高鳶乌贼资源声学评估精度积累了资料, 亦能为其他头足类或鱼类目标强度的海上现场测量提供参考。实验期间, 由于风浪较大,

未能利用网箱对鳶乌贼样品进行隔离, 也未能成功安装水下摄像机, 因此, 无法监测鳶乌贼的运动状态。实验完毕后, 某些取回的鳶乌贼样品的部分身体组织存在明显被啃食的痕迹, 推测实验中样品遭受其他鱼类或鳶乌贼的攻击。因此, 该系统尚有改进之处, 以提高鳶乌贼TS海上控制法研究的效果。

参考文献:

- [1] Roper C F E, Sweeney M J, Nauen C E. FAO species catalogue. Vol. 3. Cephalopods of the world. An annotated and illustrated catalogue of species of interest to fisheries[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1984: 377.
- [2] 陈新军, 刘必林, 王尧耕. 世界头足类[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 312-314.
Chen X J, Liu B L, Wang Y G. Cephalopods of the world[M]. Beijing: Ocean Press, 2009: 312-313(in Chinese).
- [3] 张俊, 陈国宝, 张鹏, 等. 基于渔业声学和灯光罩网的南海中南部鳶乌贼资源评估[J]. 中国水产科学, 2014, 21(4): 822-831.
Zhang J, Chen G B, Zhang P, et al. Estimation of purpleback flying squid (*Sthenoteuthis oualaniensis*) resource in the central and southern South China Sea based on fisheries acoustics and light-falling net[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(4): 822-831(in Chinese).
- [4] 邱永松, 张鹏. 南海大洋性渔业资源开发利用对策建议[C]//热带海洋科学学术研讨会暨第八届广东海洋湖沼学会、第七届广东海洋学会会员代表大会论文及摘要汇编. 湛江: 广东海洋湖沼学会, 广东海洋学会, 中国海洋学会热带海洋分会, 2013: 199-203.
Qiu Y S, Zhang P. The south China sea ocean fishery resources development and utilization countermeasures[C]// The Paper and the Assembly of Tropical Marine Science Conference, Also Known as the Eighth Guangdong Ocean Lake Marsh Society, the Seventh Guangdong Ocean Society Member Congress. Zhanjiang: Guangdong Institute of Oceanology and Limnology, Guangdong Marine Society, Tropical Ocean Chapter of the Chinese Society of Oceanography, 2013: 199-203(in Chinese).
- [5] 张魁, 廖宝超, 许友伟, 等. 基于渔业统计数据的南海

- 区渔业资源可捕量评估[J]. *海洋学报*, 2017, 39(8): 25-33.
- Zhang K, Liao B C, Xu Y W, *et al.* Assessment for allowable catch of fishery resources in the South China Sea based on statistical data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(8): 25-33(in Chinese).
- [6] Teh L S L, Witter A, Cheung W W L, *et al.* What is at stake? Status and threats to South China Sea marine fisheries[J]. *Ambio*, 2017, 46(1): 57-72.
- [7] 杨权, 李永振, 张鹏, 等. 基于灯光罩网法的南海鳶乌贼声学评估技术研究[J]. *水产学报*, 2013, 37(7): 1032-1039.
- Yang Q, Li Y Z, Zhang P, *et al.* Acoustic survey of the *Sthenoteuthis oualaniensis* resources in the South China Sea based on light falling-net[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(7): 1032-1039(in Chinese).
- [8] 张俊, 陈作志, 陈国宝, 等. 南海鳶乌贼水声学测量和评估相关技术研究[J]. *南方水产科学*, 2014, 10(6): 1-11.
- Zhang J, Chen Z Z, Chen G B, *et al.* Hydroacoustic detection and estimation techniques of squid *Sthenoteuthis oualaniensis* in the South China Sea[J]. *South China Fisheries Science*, 2014, 10(6): 1-11(in Chinese).
- [9] 张俊, 张鹏, 陈作志, 等. 南海海外洋鳶科鱼类资源量及其分布[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(4): 38-48.
- Zhang J, Zhang P, Chen Z Z, *et al.* Biomass and distribution of carangoid fish resources in the offshore South China Sea[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(4): 38-48(in Chinese).
- [10] 李斌, 陈国宝, 郭禹, 等. 南海中部海域渔业资源时空分布和资源量的水声学评估[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(4): 28-37.
- Li B, Chen G B, Guo Y, *et al.* Hydroacoustic assessment of spatial-temporal distribution and biomass of fishery resources in the central South China Sea[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(4): 28-37(in Chinese).
- [11] 贾晓平, 李永振, 李纯厚, 等. 南海专属经济区和大陆架渔业生态环境与渔业资源[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-674.
- Jia X P, Li Y Z, Li C H, *et al.* The fishery ecological environment and fishery resources in exclusive economic zone and continental shelf of South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-674(in Chinese).
- [12] 李永振, 陈国宝, 赵宪勇, 等. 南海北部海域小型非经济鱼类资源声学评估[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2005, 35(2): 206-212.
- Li Y Z, Chen G B, Zhao X Y, *et al.* Acoustic assessment of non-commercial small-size fish resources in the northern waters of South China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 2005, 35(2): 206-212(in Chinese).
- [13] 刘世刚. 基于灯光罩网法的南海黄鳍金枪鱼声学评估技术研究[D]. 大连海洋大学, 2015.
- Liu S G. Hydroacoustic estimation techniques of the south sea yellowfin tuna based on light falling-net[D]. Dalian: Dalian ocean university, 2015(in Chinese).
- [14] 张俊, 邱永松, 陈作志, 等. 南海海外洋渔业资源调查评估进展[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(6): 118-127.
- Zhang J, Chen Z Z, Qiu Y S, *et al.* Progress in the investigation and assessment of oceanic fishery resources in the offshore South China Sea[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(6): 118-127(in Chinese).
- [15] Maclellan D N. Acoustical measurement of fish abundance[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, 87(1): 1-15.
- [16] 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.
- 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(in Chinese).
- [17] Simmonds J, Maclellan D. Fisheries acoustics: theory and practice[M]. 2nd ed. Oxford: Blackwell Publishing company, 2005: 218-232.
- [18] 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.
- [19] Simrad. Simrad ER60 scientific echo sounder software reference manual[M]. Norway: Simrad Maritime AS Kongsberg, 2008: 19-31.
- [20] 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.
- Chen G B, Li N N, Chen P M, *et al.* Target strength measurements of pearl-spotted spinefoot (*Siganus orator*

- min*) in the South China Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(6): 1293-1299(in Chinese).
- [21] Higginbottom I, Woon S, Schneider P. Hydroacoustic data processing for standard stock assessment using echoview: technical manual[M]. Hobart: Myriax Software Pty Ltd Publication, 2009: 1-137.
- [22] 汤勇, 古澤昌彦. 单体鱼目标散射强度(TS)的三维平均方法[C]// 中国声学学会2006年全国声学学术会议论文集. 厦门: 中国声学学会, 2006.
- Tang y, Guz C Y. Three-dimensional average method for scattering intensity (TS) of single fish target[C]// Proceedings of the 2006 national conference on acoustics of the Chinese acoustical society. Xiamen: Chinese acoustical society, 2006.
- [23] Sawada K, Furusawa M, Williamson N. Conditions for the precise measurement of fish target strength *in situ*[J]. *The Journal of the Marine Acoustics Society of Japan*, 1993, 20(2): 73-79.
- [24] Foote K G. On representing the length dependence of acoustic target strengths of fish[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1979, 36(12): 1490-1496.
- [25] Benoitbird K J, Gilly W F, Au W W L, *et al.* Controlled and *in situ* target strengths of the jumbo squid *Dosidicus gigas* and identification of potential acoustic scattering sources[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 123(3): 1318-1328.
- [26] Josse E, Bertrand A. *In situ* acoustic target strength measurements of tuna associated with a fish aggregating device[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2000, 57(4): 911-918.
- [27] O na E. Physiological factors causing natural variations in acoustic target strength of fish[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1990, 70(1): 107-127.
- [28] 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.
- [29] Yoon E, Kim K, Lee I, *et al.* Target strength estimation by tilt angle and size dependence of rockfish (*Sebastes schlegeli*) using ex-situ and acoustic scattering model[J]. *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, 2017, 53(2): 152-159.
- [30] Pérezarjona I, Godinho L M C, Espinosa V. Numerical simulation of target strength measurements from near to far field of fish using the method of fundamental solutions[J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2018, 104(1): 25-38.
- [31] Zhang Y. Fisheries acoustic studies on the purpleback flying squid resource in the South China Sea[D]. Taipei, China: Taiwan University Institute of Oceanography, 2005.

Target strength measurements of tethered live purpleback flying squid (*Sthenoteuthis oualaniensis*) at sea

WANG Huanhuan^{1,2}, ZHANG Jun¹, CHEN Zuozhi^{1*}, TANG Yong²,
SUN Mingshuai¹, HUANG Jiaying¹, QIU Yongsong¹

(1. Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

2. School of Marine Technology and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: Knowledge of target strength (TS, dB) is essential for accurate assessment of fish abundance using acoustic methods. In order to investigate acoustic scattering characteristics of purpleback flying squid *Sthenoteuthis oualaniensis*, 25 squid specimens were collected by jig in the open sea in the northern South China Sea in September 2017 near geographical position 18°42.9'N 113°05.5'E. The TS of 25 specimens were measured respectively one by one using Simrad EY60 split-beam scientific echosounder with 120 kHz and self-made tethering-controlling device. In this paper, we primarily explored the impact of different parameters on the single target detection for *S. oualaniensis*, and the parameters included pluse length determination level (PLDL, dB), min normalized pluse length (min NPL), max normalized pluse length (max NPL) and maximum standard deviation of minor-axis angles (MIA). Then we analyzed comprehensively the stochastic nature of single TS which was highly variable, and concluded the mathematical regression relation between TS of *S. oualaniensis* and mantle length (*ML*, cm). The results showed: (1) As the PLDL increased, the number of single target of squid detected increased firstly and then decreased, and the number was the largest when PLDL was 6 dB, while the average TS of all single targets increased monotonously. With increase of min NPL, the number of single squid target decreased; in the range of min NPL<0.7, the average TS of all single targets presented increasing obviously. When the max NPL was less than 1.2, the number of single squid target increased as the max NPL increased, but the average TS decreased; when the max NPL fell between 1.2 and 1.8, the number of single squid target presented increasing slowly, but the average TS remained relatively stable. As the MIA increased, the number of single squid target increased, but the average TS decreased; (2) In this study, the optimum parameters settings of single target detection were as follows: PLDL=6.00 dB, Min NPL=0.7 dB, Max NPL=1.8, MIA=0.8°; (3) The maximum and minimum values of the average single TS of live *Sthenoteuthis oualaniensis* specimens were respectively -48.6 dB and -63.63 dB, and the corresponding mantle length of *Sthenoteuthis oualaniensis* were respectively 25.2 cm and 12.4 cm. The mathematical regression relation between *TS* of *Sthenoteuthis oualaniensis* and mantle length (*ML*) was concluded as follows: $TS=34.22 \lg (ML)-98.23$ ($N=16$, $R^2=0.603$). This TS measurement was the first attempt to investigate the acoustic scattering characteristic and TS of live *S. oualaniensis* using tethering controlling method at sea by field work. The results of this paper not only accumulated important information and experience for further investigating the acoustic scattering characteristics and improving the acoustic estimation precision of *S. oualaniensis*, also provided the reference for measuring TS of other squids or fishes by tethering method at sea.

Key words: *Sthenoteuthis oualaniensis*; fisheries acoustics; target strength; tethering controlling method; single target detection

Corresponding author: CHEN Zuozhi. E-mail: zzchen2000@163.com

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2018YFC1406502); Finance Special Project of Ministry of Agriculture and Rural Affairs (NFZX2018); Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund (2017YB19)