

DOI: 10.12264/JFSC2020-0189

北太平洋渔业资源种类目标强度研究进展

田思泉^{1, 2, 3, 4, 5}, 薛铭华¹, 童剑锋^{1, 2, 3, 4, 5}, 王学昉^{1, 2, 3, 4, 5}

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;
4. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306;
5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测试验站, 上海 201306

摘要: 声学方法作为现代渔业资源调查评估方法的重要手段, 在北太平洋渔业资源评估中应用日益广泛。其中, 目标强度对声学调查评估精度影响重大。目前, 已经有许多学者使用不同的方法对北太平洋一些物种的目标强度进行了研究。本文系统梳理了现有的北太平洋主要渔业资源的目标强度及其测量方法, 将其归纳总结为原位测量(*in situ*)、非原位测量(*ex situ*)和模型法, 分析各种方法的优缺点, 并根据调查目标种类、现场调查条件等方面对目标强度测量估算方法的选取提出建议, 以为北太平洋重要经济鱼类目标强度测定工作提供参考, 为北太平洋重要经济渔业资源声学评估提供科学依据。

关键词: 北太平洋; 渔业声学; 目标强度; 渔业资源

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2021)03–0371–09

北太平洋有亲潮(千岛寒流)和黑潮(日本暖流)两大流系, 寒暖流交汇使该海域产生了复杂的涡流和锋面。其独特的海洋环境和地理条件为北太平洋形成优良渔场提供了良好条件, 形成了丰富的渔业资源^[1]。其中据联合国粮农组织统计, 西北太平洋年产量为全球第一^[2]。北太平洋以日本鳀(*Engraulis japonicus*)、鲱(*Clupea pallasii*)、秋刀鱼(*Cololalis saira*)、狭鳕(*Theragra chalcogramma* Pallas)、竹筴鱼(*Trachurus japonicus*)、沙丁鱼(*Sardinops sagax*)、鲑鳟(*Salmo*)、柔鱼(*Ommastrepes bartramii*)、鰹(*Katsuwonus pelamis*)、金枪鱼(*Thunnus*)、鲈(*Scomber japonicus*)等为主要捕捞对象。我国自 20 世纪 90 年代开始在此开展渔业捕捞生产, 主要捕获柔鱼、秋刀鱼和鲈等^[1]。该海域是中国远洋渔业着重开发利用的渔场之一, 亦是

世界远洋渔业的高产海域。

渔业声学调查具有快捷、分辨率高、时空范围广且不对海洋环境与生物资源造成污染或破坏等优点, 为国际上所广泛采用^[3–4]。自 1984 年渔业声学技术引入我国后, 已成功对东海、黄海^[3]和南海^[5]等中国近海渔业资源及南极磷虾(*Euphausia superba*)^[6]资源进行声学评估。而在北太平洋, 应用声学方法极少, 目前仍以网具调查为主。1993 年中国水产科学研究院黄海水产研究所唐启升等^[7]、赵宪勇等^[8]借助“北斗”号渔业资源调查船首次对北太平洋狭鳕资源进行了声学调查评估。国际上曾对该海域的一些种类进行过声学调查, 但近年来声学仪器不断发展进步, 渔业声学调查使用的频率也从窄带独立频率发展到宽带连续频率, 因此可对这里的渔业资源进行更深入的声学

收稿日期: 2020-06-27; 修订日期: 2020-08-03.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901401); 国家自然科学基金项目(41606210); 上海市科技创新行动计划项目(19DZ1207502).

作者简介: 田思泉(1978–), 男, 教授, 研究方向渔业资源评估和管理、渔业海洋学. E-mail: sqtian@shou.edu.cn

通信作者: 童剑锋, 讲师, 研究方向为渔业声学. E-mail: jftong@shou.edu.cn

调查评估,以了解其资源现状。

本文回顾了国内外学者在北太平洋、西北太平洋、白令海、阿拉斯加湾及日本、韩国周边海域进行的目标强度测定研究,归纳总结多种测定方法,旨在为今后北太平洋重要经济鱼类目标强度测定工作提供参考。同时,本文所述方法可为其他海区类似鱼种的目标强度测定提供借鉴。

1 目标强度的描述

1.1 目标强度的定义

声波换能器发射声波后,由于水生生物体各部位声阻抗率与海水不同,声波被生物体接收后会发生散射,其反向散射声信号被接收器接受^[9]。目标强度(target strength, TS)即是反映生物体反射声波强弱的物理量,是利用声学方法对渔业资源评估的重要参数,其定义式为^[8]:

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

式中, TS 为目标强度(单位 dB), σ 为目标的声学散射截面(单位 m^2)。由于当前国内外对北太平洋渔业资源种类目标强度研究较少,因此研究该海域各种水生生物目标强度对于北太平洋渔业资源评估意义重大。

1.2 影响目标强度变化的因素

目标强度值与有无鱼鳔、倾斜角度、长度、行为、生理学特征、水深和换能器频率等因素有关。其中最主要的两个因素为有无鱼鳔与倾斜角度^[10]。

声传播时,其介质密度与鱼体自身密度的差异对于声散射强弱会产生影响。鱼肉与海水密度相差不大,声散射相对较弱;鱼鳔中一般充满空气,密度低于海水,声散射相对较强。据研究,鱼鳔散射能力占整个鱼体的 90%以上,对于无鳔鱼类而言,其平均目标强度比同样大小的有鳔鱼要低 10 dB 左右^[3]。因此有无鱼鳔会对目标强度值产生极大影响。

此外鱼体姿态的倾斜角度也会对目标强度产生很大影响。所谓倾斜角度是指鱼体中轴线相对于声波入射方向的角度。声学评估中换能器发射声波的频率多在 38~200 kHz,声波波长小于或等于鱼体长度,使得鱼体定向散射声波^[11]。因此,

倾斜角度变化会引起散射强度变化,进而影响目标强度的大小。根据于海圆等^[12]对日本鳀的研究,倾斜角度与目标强度密切相关,若忽视倾斜角的变化则会使资源评估结果产生 1/3 以上的误差。

2 目标强度估算方法

现阶段,目标强度的估算方法主要有原位测量(*in situ*)、非原位测量(*ex situ*)和模型法。

2.1 原位测量

原位测量即现场测量是指在海上直接使用科学鱼探仪测量海水中的生物体目标。原位测量在条件允许的情况下可采取对单个目标进行跟踪测量的方式,直接、准确获得其回波信号,从中求出单体鱼的声散射截面 σ ,进而通过方程(1)得到其目标强度值。然而由于实际情况中极少出现可供跟踪的单体目标,大多时候可对目标集群的声信号进行整体采集,接着根据单波束换能器、双波束换能器或分裂波束换能器的不同,分别可使用计数—积分法^[8]、双波束法^[13]或分裂波束法^[14]求得平均声散射截面,继而得到一个平均目标强度值,并以此作为该鱼种的目标强度。现场测量之前或之后,在预定的站位进行生物学样品采集,获取足够样品进行种类组成与鱼体长度分析。根据拖网渔获物中各种鱼的渔获比例及体长范围对回声信号中各种鱼类进行识别,找出目标鱼类并对回声积分进行分配。现场测量是获取目标强度最可靠的方法。

现场测量最重要的原则是确保目标处于自然状态,即自由游动。此外,现场测量有两个限制条件:要求目标鱼类离散分布且组成单一;对鱼类的采样要有代表性,能够充分体现该种类的年龄组成和体长结构等种群特征^[9,15-16]。Traynor 等^[13]在白令海使用双波束换能器测得平均长度 33.6 cm 的狭鳕目标强度为 -38.5 dB,这一结果与 FAO 在其他海域测得狭鳕目标强度值相吻合,表明双波束技术是现场测量的可靠方法。赵宪勇等^[8]测得 38 kHz 时北太平洋狭鳕目标强度为 -34.3 dB,比通常使用的值低 2.6 dB,是因昼夜垂直移动中鳔的形状体积变化及倾斜角不同所致。Hwang 等^[17]使用 38 kHz、120 kHz 换能器及水下摄像机研究

济州岛附近带鱼(*Trichiurus lepturus*)目标强度,发现带鱼在夜晚会以头部朝向海面的方式垂直游动,结合这一情况测得其目标强度在上述频率下分别为-35.7 dB、-41.2 dB。这一结果充分考虑到带鱼在自然状态下游泳角度的变化,以及由此产生的背向散射差异,有助于提高资源评估精度。然而该研究中检测到的样本数较少,两种频率下分别为75、27尾,且主要为受诱鱼灯吸引的上层个体,可能不具有广泛代表性。Guttormsen 等^[18]首次进行了北太平洋毛鳞鱼(*Mallotus villosus*)目标强度的现场测量,在夜间得到平均长度10.0~10.8 cm的毛鳞鱼38 kHz下,目标强度在-48.5~-51.1 dB之间;120 kHz下,在-50.1~-52.6 dB之间。该研究表明对北太平洋毛鳞鱼进行声学评估是可行的,然而由于北太平洋毛鳞鱼存在昼夜分布差异,仅在夜间进行测量仍显不足。除以上研究外,作为北太平洋主要捕捞对象的柔鱼等头足类,其目标强度现场测量仍很缺乏,有待日后补充。

2.2 实验室测量

实验室测量法是将目标鱼放置于实验装置中,用回声探测仪对其进行目标强度测定。根据被测目标所处的环境和状态可分为绳系法和网箱法。

2.2.1 绳系法 绳系法以若干条死亡鱼或被麻醉鱼为研究对象。测量时用细线将单体鱼系住,置于换能器的波束中,通过调整细线改变鱼体倾斜角度,对不同倾斜角下换能器发射和接收的声信号分别处理,研究目标强度随倾斜角的变化。或是在某一固定角度下,使用不同长度、重量的目标或不同频率换能器,研究目标强度同这些变量之间的关系。绳系法能够较好控制目标姿态,适合研究目标强度与倾斜角、体长、体重及频率之间的关系。但由于测量时鱼体处于非自然状态,无法真实反映声波散射情况,会使测量结果产生一定偏差^[10]。Henderson 等^[19]在装满水的容器里使用CTD测量水温和盐度,用绳系法测量了38 kHz、120 kHz时太平洋鳕(*Merluccius productus*)不同倾角下的目标强度,发现两种频率均在-5°时取最大目标强度分别为-33.1 dB、-33.0 dB。该研究将绳系法测量结果分别与原位测量、基尔霍夫

模型结果进行比较,发现同前者不存在显著性差异,而基尔霍夫模型常常高估太平洋鳕的目标强度,因此可以认为在无法进行原位测量时使用绳系法测量太平洋鳕目标强度是较好的选择。Thomas 等^[20]在水中用绳系法对太平洋玉筋鱼(*Ammodytes hexapterus*)幼鱼的目标强度进行研究,由于没有鱼鳔,其目标强度不随深度变化。Yasuma 等^[21]测量了不同倾斜角下白身臂灯鱼(*Stenobrachius leucopsarus*)的目标强度,当鱼体头部略向下时(-5°~8°)目标强度出现峰值,为-55.6 dB~-66.7 dB,平均目标强度-60.4 dB~-69.8 dB。但是在实验中限于条件使用了淡水代替海水,可能会使测定结果出现一些偏差。

2.2.2 网箱法 网箱法是把一条或多条被测鱼放养在用声学透明材料制成的容器中,保证它们自由游动。将网箱置于换能器波束中,同时在网箱周围安装摄像机,实时监控被测鱼的方位和分布,以此测量得到目标强度。网箱法可以较真实反映目标强度的实际情况,有利于研究目标强度与鱼的生理状况、昼夜变化及深度变化之间的关系。该方法测量过程中可控性较差,无法对倾斜角度等进行研究^[10]。Thomas 等^[20]用自制网箱研究了太平洋鲱鱼在4~43 m深度时的目标强度,由于鱼鳔的存在,其目标强度随深度显著变化,深度越深目标强度越小。Kang 等^[22]对日本鳀进行测量,实验中用鱼钩一端贯穿鱼嘴,另一端通过细线与一底部系有重球的垂线相连,以保证鱼体不游出波束覆盖范围。该研究改变了鱼的自然状态,因此其测量结果可能存在误差。

2.3 模型法

模型法是通过建立模型来计算目标强度,有经验统计模型和物理模型(理论模型)。物理模型即理论散射模型,根据声散射理论和研究对象生物学特性将声散射的主要来源,即有鳔鱼的鱼鳔或无鳔鱼的鱼体,近似为规则几何模型,利用计算机模拟计算这些模型的目标强度^[11]。主要有球体模型^[15,23]、椭球体模型^[10]、变形圆柱体模型^[21]、基尔霍夫模型^[10,23]、畸变波玻恩近似模型^[24-25]和有限元法^[26]等。模型法灵活方便,可模拟得到各

种不同情况下的目标强度值, 不受实际测量中场地设施等限制, 非常适用于估算无法进行现场测量的鱼类的目标强度。并且在国内外学者研究下, 模型精度不断提高, 是当前目标强度研究中较主流的方法。部分模型法通常需要对鱼鳔进行建模, 因此要求样品足够新鲜, 而某些种类在捕获过程中其鱼鳔会受到损坏, 这也是模型法的局限所在。

2.3.1 目标强度-体长关系模型 目标强度-体长(TS-L)关系模型是最常用的经验统计模型。主要方法是对多个鱼类样本进行目标强度测量后, 建立起目标强度与体长的经验公式:

$$TS = a \log L + b \quad (2)$$

式中, a 、 b 是回归系数, a 为斜率, b 为截距, 由目标强度测定确定。对于大多数渔业而言, 由于鱼体的声散射截面基本与体长平方线性相关, 因此在渔业声学中(2)式通常用下式表示^[31]:

$$TS = 20 \log L + b_{20} \quad (3)$$

式中, b_{20} 表示斜率为 20 时的截距值。对目标强度-体长关系已知的鱼种而言, 当其体长已知时, 可计算得到相应的目标强度。Sawada 等^[27]使用现场调查数据建立了 70 kHz 下北太平洋秋刀鱼和日本鳀的目标强度经验公式, 分别为 $TS = 20 \log L_F - 67.6$ 和 $TS = 20 \log L_T - 68.3$, L_F 叉长, L_T 全长。Murae 等^[28]结合现场测量和实验室测量针对日本鳀建立了四个经验公式, 每一公式包含的变量不同, 对四个公式进行比较表明, 倾斜角和深度对生物量估算影响很大, 而使用平均分布深度可以减少计算量且不对结果产生较大影响。但这一结论尚需借助不同的数据进行验证。Guttormsen 等^[18]通过现场测量分别建立毛鳞鱼在 38 kHz、120 kHz 下经验公式 $TS = 20 \log L - 70.3$ 、 $TS = 20 \log L - 71.6$, 其结果与各种已发表的模型有较大差异, 因此要谨慎使用某一区域的目标强度值来对另一区域进行研究。

2.3.2 球体模型 Rayleigh 在 20 世纪 80 年代提出的球体模型是最早被用来估算目标强度的物理模型^[15,29]。在低频下, 充有气体的鱼鳔是单条有鳔鱼主要的声散射来源, 球体是描述充气体声散射最简单的模型, 同时将低频状态下的鱼鳔视为

球体能够较为方便的计算目标强度^[23]。因此使用球体模型, 将鱼鳔看作被黏性液体(鱼肉)包裹着的球形气泡^[23], 通过模拟计算得到鱼体的目标强度。由于球体模型不具有反向散射指向性, 因此不能反映角度与目标强度的关系。

2.3.3 椭球体模型 椭球体模型是将鱼体和鱼鳔分别等效成充满液体和气体的椭球体模型, 将椭球体看做沿长轴排列的无数个圆柱体微元, 根据模型公式, 借助鱼体与海水介质的密度对比值 g 、声速对比值 h 可以计算得到目标强度^[10]。该模型可以很好的匹配有鳔鱼类, 虽然无法详细描述鱼体形状, 但在一般情况下结果较准确。Sawada 等^[30]使用椭球体模型计算得到北海道东部眶灯鱼(*Diaphus theta*) 70 kHz 下的理论目标强度为 -55.8 dB。眶灯鱼属于有鳔鱼类, 体形细长, 因此该研究中使用椭球体模型得到的结果较为准确。与原位测量结果的比较也证实了这一点。

2.3.4 变形圆柱体模型 变形圆柱体模型根据鱼的背向和侧面轮廓, 将鱼体形状描述为一系列相邻的、圆盘状圆柱形元素^[31], 比椭球体模型更详细地描述鱼体形状, 可以很好的匹配无鳔鱼类。该模型有使用限制, 要求长短轴之比大于 5, 形状细长, 倾斜角小于 50°^[21]。Yasuma 等^[21]借助椭球体模型和变形圆柱体模型估算了白身臂灯鱼的目标强度, 并与绳系测量值进行比较, 结果非常吻合。Yasuma 等^[32]同样使用这两种模型研究了四种灯笼鱼(*Ceratoscopelus warmingii*、*Myctophum asperum*、*Diaphus garmani* 和 *Diaphus chrysorhynchus*)目标强度随倾斜角变化的情况。Yasuma 等^[31]测定了日本玉筋鱼(*Ammodytes personatus*)的密度对比值 g 和声速对比值 h , 并使用变形圆柱体模型对其目标强度进行研究。从上述研究来看, 椭球体模型和变形圆柱体模型对于灯笼鱼科鱼类具有较好的模拟效果。尽管变形圆柱体模型可以更详细地描述鱼体形状, 但是在不满足其使用条件时, 也可使用精确的椭球体模型。

2.3.5 基尔霍夫模型 高频时对鱼的声散射进行建模较为困难^[23]。Foote^[33]和 Clay^[34]分别根据基尔霍夫近似提出了适用的模型。这些模型能够对

鱼体和鱼鳔进行更好地近似。基尔霍夫模型适用于高频下的建模^[23], 通常用 X 光或解剖方法获得鱼体和鱼鳔的相关信息, 建立它们的二维模型, 然后将鱼体、鱼鳔分割为数个微元, 分别计算每个微元的目标强度, 最后相加得到整体的目标强度^[10]。基尔霍夫模型可以较准确的反映目标强度的情况^[10], 但需仔细测量鱼体鱼鳔形状, 建模过程复杂且计算耗时。Kang 等^[35]使用实测密度对比值 g 和声速对比值 h , 通过基尔霍夫模型计算太平洋褶柔鱼(*Todarodes pacificus*)目标强度并和实验室测定进行比较, 结果相差不大。 g 、 h 值的细微变化会对目标强度估算结果产生较大影响, 而该研究中模型结果与实验室结果的一致性表明使用实测 g 、 h 值建立基尔霍夫模型是估算头足类目标强度的较好方法。Henderson 等^[19]使用该模型对太平洋鳕目标强度进行了研究, 发现这一方法所得结果偏高, 因此应谨慎将该法应用于太平洋鳕目标强度估算中。Gauthier 等^[36]基于此模型对白令海与阿拉斯加湾中上层的毛鳞鱼、太平洋鲱、狭鳕、多线鱼(*Pleurogrammus monopterygius*)和太

平洋细齿鲑(*Thaleichthys pacificus*)的回波特征进行量化, 并根据模型预测, 针对每一物种建立了目标强度-体长经验公式。其中多线鱼和太平洋细齿鲑属无鳔鱼类, 使用基尔霍夫模型所得结果变异性较大, 易在资源评估中产生误差。

2.3.6 畸变波玻恩近似模型 玻恩近似模型可以描述任意形状、角度和频率下非均匀散射体的声散射^[24], 多用于浮游动物目标强度估算^[25]。畸变波玻恩近似模型对玻恩近似模型的相位失配作出补偿, 仅适用于弱散射体^[37]。然而, 当散射引起的衰减明显且不可忽略时, 如密集聚集的浮游动物散射, 传统的畸变玻恩近似模型不能描述其散射特性。Matsukura 等^[38]使用畸变玻恩近似模型估算了北太平洋两种桡足类(*Neocalanus cristatus*、*Neocalanus plumchrus*)目标强度。Simth 等^[24]研究了该模型中各种参数对白令海磷虾(*Thysanoeessa*)资源量估算产生的影响, 强调了应尽量使用实测的密度对比值 g 和声速对比值 h 来进行计算, 这也可为北太平洋浮游生物目标强度计算和资源评估提供参考。

表 1 不同目标强度估算方法之间的比较
Tab. 1 Comparison between different target strength estimation methods

方法 method	适用对象 object	优点 advantage	不足 disadvantage
原位测量 <i>in situ</i>	单一鱼群, 个体分散	直接获得自然状态下 TS 值	所需条件不易满足
绳系法 tethered method	单条鱼	有利于研究 TS 与倾斜角、频率等因子的关系	鱼体处于非自然状态, 无法反映真实情况
网箱法 net-cages method	单条或多条活鱼	较真实反映实际情况, 有利于研究 TS 与昼夜、深度变化的关系	测量过程中可控性较差
目标强度-体长模型 TS-L model	单条鱼或单一鱼群	可通过已有的经验公式, 使用体长数据迅速计算 TS 值	所建立的经验公式往往仅适用于一定海域
球体模型 sphere model	单条鱼	简单, 方便	只能描述低频下鱼的散射特性, 不能反映 TS 与倾角的关系
椭球体模型 prolate spheroidal model	单条鱼	对于有鳔鱼类可获得较精确的结果	无法详细描述鱼体形状, 适用于较规则目标
变形圆柱体模型 deformed cylinder model	单条鱼	对于无鳔鱼类可获得较精确的结果	要求长短轴之比大于 5, 形状细长, 倾斜角小于 50°
基尔霍夫模型 Kirchhoff model	单条鱼	能对鱼体和鱼鳔进行较好的近似, 准确反映 TS 情况	需要详细的形态学特征, 建模复杂, 计算耗时
畸变波玻恩近似模型 distorted wave Born approximation model	浮游动物等弱散射体	可以描述任意形状、角度和频率下非均匀散射体的声散射	仅适用于弱散射体

3 北太平洋渔业资源种类目标强度

本文所述目标强度估算方法中，现场测量和实验室测量法适用于大多数北太平洋渔业资源种类，只是现场测量所需条件较难满足。如柔鱼，使用现场测量法可以获得整个集群的平均目标强度，使用实验室方法可以获得单体目标强度并有助于分析目标强度变化规律，近年来一些学者尝试对其进行基尔霍夫建模^[35]以弥补前两种方法不能对所有频率和体长的个体进行测量的不足。不同的理论模型适用于不同的对象，对于秋刀鱼、鲐鱼、日本鳀等个体细长种类，使用椭球体模型或

变形圆柱体模型可以很好的估算其目标强度^[27]。对于北太平洋大量的浮游生物来说，由于其个体较小、声散射较弱，畸变波玻恩近似模型是首选方式。但是此法需要尽可能使用实测的密度对比值 g 和声速对比值 h 来进行计算，因此当浮游生物种类较多时存在一定难度。国内外有关目标强度测定的研究大多将多种方法综合分析，因此利用不同方法对测量对象的目标强度进行比较研究，对于了解其声散射特征，提高资源评估精度具有重要意义。本文在前述基础上总结了现有的北太平洋主要渔业资源的目标强度及其测量方法如表 2 所示。

表 2 北太平洋渔业资源种类目标强度
Tab. 2 Target strength of fishery resources in the North Pacific Ocean

种类 species	频率/kHz frequency	目标强度/dB TS	测量方法 method
北太平洋狭鳕 <i>Theragra chalcogramma</i> Pallas	38	-34.3	原位测量 ^[8] <i>in situ</i>
带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i>	38 120	-35.7 -41.2	原位测量 ^[17] <i>in situ</i>
毛鳞鱼 <i>Mallotus villosus</i>	38 120	-48.5- -51.1 -50.1- -52.6	原位测量 ^[18] <i>in situ</i>
太平洋鳕 <i>Merluccius productus</i>	38 120	-33.1 -33.0	绳系法 ^[19] <i>tethered method</i>
白身臂灯鱼 <i>Stenobranchius leucopsarus</i>	38	-60.4- -69.8	绳系法 ^[21] <i>tethered method</i>
日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	38 120	-51.6- -43.7 -53.7- -46.7	网箱法 ^[22] <i>net-cages method</i>
眶灯鱼 <i>Diaphus theta</i>	70	-55.8	椭球体模型 ^[30] <i>prolate spheroidal model</i>

4 讨论与展望

获取各种鱼类目标强度值对于资源量评估至关重要。然而当前全球仅对几十种鱼测量了目标强度，北太平洋的数据更是缺乏，远远无法满足资源评估的需要。在获取目标强度的各种方法中，现场测量是最准确、最能反映实际情况的方法，目前已对北太平洋狭鳕、带鱼、毛鳞鱼和太平洋鳕等种类进行了现场测量。未来可以借助相关调查船对北太平洋开展声学走航调查，逐步完成该海域重要渔业资源物种目标强度测量工作，为进一步的资源量评估做好准备。柔鱼等头足类是北太平洋主要捕获对象之一，但是该海域其现场测量数据较少，可考虑借鉴灯光罩网法^[39]将个体聚集在一起，现场测量目标强度。虽然由于头足类

较强的趋光性使得灯光罩网渔获物中柔鱼比例偏高，需要对其数量百分比进行修正，但该方法有效可行，采集到的样本能够较好反映其种群结构。对于一些不易进行现场测量的鱼类也可采用实验室测量，只是该方法实验平台搭建比较困难，研究仅局限在倾斜角、深度和时间等参数。需要注意的是，前述所测得的北太平洋主要渔业资源的目标强度由于受到样本数量、体长范围或采样时间等各种因素的局限，存在一定适用范围，在资源评估中直接引用这些文献所载值容易出现偏差，应以实测值为准。

模型法简单、灵活、低成本，可不受限制地研究各种参数对目标强度的影响，为国际上所广泛使用。今后有必要对北太平洋重要鱼类进行建模，并与现场或实验室测量值进行比较，了解模

型适用性或对模型进行改进。其中密度对比值 g 和声速对比值 h 是大多数物理模型的重要参数, 使用实测 g 、 h 值或使用其他文献记载的值, 是影响资源量估算的关键, 需要对更多物种进行研究以了解 g 、 h 值变化对于评估结果的影响。

理论模型中, 有限元方法是将求解域近似为许多个具有不同大小和形状的有限个离散域组成, 且每个单元彼此相连, 对每个单元给出一个近似解, 然后推导得出整个问题的近似解。该方法适用于求解各种形状目标的声散射问题且精度高, 但随着频率的提高, 计算量呈现指数增长, 因此目前只能应用于较低的频率^[26]。这也是该方法普及率较低的原因。当前对于北太平洋秋刀鱼目标强度的研究多借助于变形圆柱体模型, 该模型在背向散射方面存在一定缺陷, 有限元模型可以较好的弥补这一缺陷, 因此日后对北太平洋秋刀鱼或其他渔业资源目标强度进行研究时也可尝试采用有限元方法, 并同现场或实验室测量值进行比较以对该方法进行验证。

参考文献:

- [1] Tang F H, Yue D D, Xiong M S, et al. Interpretation of Convention on the Conservation and Management of High Seas Fisheries Resources in the North Pacific Ocean and coping strategies from China oceanic fisheries[J]. Fishery Information & Strategy, 2016, 31(3): 210-217. [唐峰华, 岳冬冬, 熊敏思, 等. 《北太平洋公海渔业资源养护和管理公约》解读及中国远洋渔业应对策略[J]. 渔业信息与战略, 2016, 31(3): 210-217.]
- [2] Chen X J. Fishery Stocks and Fisheries[M]. 2nd Edition. Beijing: China Ocean Press, 2017: 460. [陈新军. 渔业资源与渔场学[M]. 第2版. 北京: 海洋出版社, 2017: 460.]
- [3] Zhao X Y, Chen Y Z, Li X S, et al. Acoustic estimation of multi-species marine fishery resources[C]// Proceedings of China's Exclusive Economic Zone and Continental Shelf Investigation and Research Special Academic Exchange Conference. Beijing: China Ocean Press, 2002: 341-353. [赵宪勇, 陈毓桢, 李显森, 等. 多类海洋渔业资源声学评估技术与方法[C]//我国专属经济区和大陆架勘测研究专项学术交流会议论文集. 北京: 海洋出版社, 2002: 341-353.]
- [4] 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.]
- [5] Chen G B, Li Y Z, Zhao X Y, et al. Acoustic assessment of commercial fish resources in the northern waters of South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(4): 445-451. [陈国宝, 李永振, 赵宪勇, 等. 南海北部海域重要经济鱼类资源声学评估[J]. 中国水产科学, 2005, 12(4): 445-451.]
- [6] Wang T, Zhu G P, Tong J F, et al. Acoustic estimation of *Euphausia superba* in the South Orkney Islands in austral spring 2017[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(2): 333-341. [王腾, 朱国平, 童剑锋, 等. 南极南奥克尼群岛 2017 年春季南极磷虾资源声学评估[J]. 中国水产科学, 2019, 26(2): 333-341.]
- [7] Tang Q S, Wang W X, Chen Y Z, et al. Stock assessment of walleye pollock in the North Pacific Ocean by acoustic survey[J]. Journal of Fisheries of China, 1995, 19(1): 8-20. [唐启升, 王为祥, 陈毓桢, 等. 北太平洋狭鳕资源声学评估调查研究[J]. 水产学报, 1995, 19(1): 8-20.]
- [8] 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, 陈毓桢. 狭鳕(*Theragra chalcogramma* Palas)目标强度的现场测定[J]. 中国水产科学, 1996, 3(4): 19-27.]
- [9] Zhang L. Acoustic assessment of fishery resources in the Northwest Pacific Ocean[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2017. [张立. 西北太平洋渔业资源声学评估[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2017.]
- [10] Shang X M. The research on acoustical target strength of yellow croaker, *Pseudosciaena polyactis* and *pomfret*[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2015. [尚晓明. 大黄鱼、小黄鱼和银鲳声学目标强度的研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2015.]
- [11] Wang J M, Sun Y, Bi F Y, et al. Measurement method and application of fish target strength[J]. Scientific and Technological Innovation, 2018(7): 21-23. [王金明, 孙扬, 毕福洋, 等. 鱼类目标强度测量方法及应用[J]. 科学技术创新, 2018(7): 21-23.]
- [12] 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.]
- [13] Traynor J J, Ehrenberg J E. Evaluation of the dual beam acoustic fish target strength measurement method[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 2011, 36(9): 1065-1071.

- [14] MacLennan D N, Simmonds E J. Fisheries Acoustics: Theory and Practice, 2nd Edition[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 1992.
- [15] Zhang J W. Research and application of acoustic target strength with *Sebastiscus marmoratus* from waters around Gouqi Island[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012. [张靖雯. 枸杞岛海域褐菖鲉的声学目标强度研究及其应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.]
- [16] Li B. Target strength measurement of *Sillago sihama* and *Otolithes ruber* based on Kirchhoff ray-mode approximation[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2017. [李斌. 基于基尔霍夫近似模型的多鳞鱈(*Sillago sihama*)和红牙鲷(*Otolithes ruber*)目标强度测量研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2017.]
- [17] Hwang K, Yoon E A, Kang S, et al. Behavioral patterns and *in situ* target strength of the hairtail (*Trichiurus lepturus*) via coupling of scientific echosounder and acoustic camera data[J]. Ocean Science Journal, 2017, 52(4): 563-571.
- [18] Guttormsen M A, Wilson C D. *In situ* measurements of capelin (*Mallotus villosus*) target strength in the North Pacific Ocean[J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(2): 258-263.
- [19] Henderson M J, Horne J K. Comparison of *in situ*, *ex situ*, and backscatter model estimates of Pacific Hake (*Merluccius productus*) target strength[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2007, 64(12): 1781-1794.
- [20] Thomas G L, Kirsch J, Thorne R E. *Ex situ* target strength measurements of Pacific herring and Pacific sand lance[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2002, 22(4): 1136-1145.
- [21] Yasuma H, Takao Y, Sawada K, et al. Target strength of the lanternfish, *Stenobrachius leucopsarus* (family *Myctophidae*), a fish without an airbladder, measured in the Bering Sea[J]. ICES Journal of Marine Science, 2006, 63(4): 683-692.
- [22] Kang D, Cho S, Lee C, et al. *Ex situ* target-strength measurements of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in the coastal Northwest Pacific[J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(6): 1219-1224.
- [23] Zhang B. Research of fish school acoustic scattering model and its simulation[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. [张波. 鱼群声散射模型及其仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.]
- [24] Smith J N, Ressler P H, Warren J D. A distorted wave Born approximation target strength model for Bering Sea *euphausiids*[J]. ICES Journal of Marine Science, 2013, 70(1): 204-214.
- [25] Chu D Z, Ye Z. A phase-compensated distorted wave Born approximation representation of the bistatic scattering by weakly scattering objects: Application to zooplankton[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 106(4): 1732-1743.
- [26] Lu D. Researches on acoustic scattering of elastic target on finite element methods[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014. [卢笛. 基于有限元原理的弹性目标声散射计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.]
- [27] Sawada K, Takahashi H, Abe K, et al. Target-strength, length, and tilt-angle measurements of Pacific saury (*Cololabis saira*) and Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) using an acoustic-optical system[J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(6): 1212-1218.
- [28] Murase H, Kawabata A, Kubota H, et al. Effect of depth-dependent target strength on biomass estimation of Japanese anchovy[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2011, 19: 267-272.
- [29] Li P J. Modeling study on the target strength of *Ceratoscopelus warmingii*[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2016. [李佩杰. 尾明角灯鱼目标强度的模型法研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2016.]
- [30] Sawada K, Uchikawa K, Matsuura T, et al. *In situ* and *ex situ* target strength measurement of mesopelagic Lanternfish, *Diaphus theta* (family *Myctophidae*)[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2011, 19(3): 302-311.
- [31] Yasuma H, Nakagawa R, Yamakawa T, et al. Density and sound-speed contrasts, and target strength of Japanese sandeel *Ammodytes personatus*[J]. Fisheries Science, 2009, 75(3): 545-552.
- [32] Yasuma H, Sawada K, Takao Y, et al. Swimbladder condition and target strength of myctophid fish in the temperate zone of the Northwest Pacific[J]. ICES Journal of Marine Science, 2010, 67(1): 135-144.
- [33] Foote K G. Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 78(2): 688-700.
- [34] 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.
- [35] Kang D, Iida K, Mukai T, et al. Density and sound speed contrasts of the Japanese common squid *Todarodes pacificus* and their influence on acoustic target strength[J]. Fisheries Science, 2006, 72(4): 728-736.
- [36] Gauthier S, Horne J K. Acoustic characteristics of forage fish species in the Gulf of Alaska and Bering Sea based on Kirchhoff-approximation models[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2007, 64(12): 1781-1794.

- ries and Aquatic Sciences, 2004, 61(10): 1839-1850.
- [37] Gastauer S, Chu D Z, Cox M J. ZooScatR - An R package for modelling the scattering properties of weak scattering targets using the distorted wave Born approximation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145: EL102-EL108.
- [38] Matsukura R, Yasuma H, Murase H, et al. Measurements of density contrast and sound-speed contrast for target strength estimation of *Neocalanus* copepods (*Neocalanus cristatus* and *Neocalanus plumchrus*) in the North Pacific Ocean[J]. Fisheries Science, 2009, 75(6): 1377-1387.
- [39] 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. [张俊, 陈国宝, 张鹏, 等. 基于渔业声学 and 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.]

A review of the acoustic target strength of fishery resources in the North Pacific Ocean

TIAN Siquan^{1,2,3,4,5}, XUE Minghua¹, TONG Jianfeng^{1,2,3,4,5}, WANG Xuefang^{1,2,3,4,5}

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. National Distant-Water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai 201306, China;
3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;
4. Key Laboratory Exploitation of Oceanic Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;
5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

Abstract: Acoustic methods are important tools in modern fishery surveys and assessments, and acoustic methods are increasingly used in fishery stock surveys in the North Pacific Ocean. However, the acoustic target strength of fish significantly affects the accuracy of resource estimations determined by acoustic methods. Researchers have studied the acoustic target strength of some species in the North Pacific Ocean using different methods. This paper reviews the existing acoustic target strength of the main fishery resources in the North Pacific Ocean and the methods used to measure this. These methods can be categorized as *in situ* methods, *ex situ* methods, and model estimation methods. We analyzed the advantages and disadvantages of each method and provide suggestions on the selection of different acoustic target strength measuring methods according to the target species, conditions of field surveys, and other factors. This paper provides a reference for acoustic target strength measurement of some commercially important fish species in the North Pacific Ocean and provides a scientific basis for acoustic assessment of fishery stocks in this area.

Key words: North Pacific Ocean; fisheries acoustics; acoustic target strength; fishery resource

Corresponding author: TONG Jianfeng. E-mail: jftong@shou.edu.cn