

浒苔声反射特征的实验测定

赵宪勇¹,倪汉华²,刘永利³,李娇¹,石晓天²,栾杨¹,徐皓²,王鲁民³,关长涛¹,汤涛林²,黄健²

(1. 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室 中国水产科学研究院 黄海水产研究所,山东 青岛 266071; 2. 农业部渔业装备与工程重点开放实验室 中国水产科学研究院 渔业机械仪器研究所,上海 200092; 3. 中国水产科学研究院 东海水产研究所,上海 200090)

摘要:以2008年夏季在中国黄海中南部海域引起绿藻暴发的主要种类浒苔(*Enteromorpha prolifera*)为研究对象,在消声水池内利用经过校正的、工作频率为70 kHz的Simrad EY500回声探测—积分系统对其声反射特征进行测定,根据浒苔的回声积分等测定值建立了浒苔声反射强度与浒苔密度关系的定量表达式。实验结果显示,浒苔是有效声散射体,其体积反向散射强度(S_v , dB)与浒苔密度(ρ , g/m^3)之间的关系为 $S_v=17.31g\rho-95.9$,与鱼类目标强度和体长关系具有类似的表述模式。结果证实渔业声学原理和现行渔业声学仪器、方法同样适用浒苔的探测,水声技术可成为下沉浒苔快速监测的有效手段。实验同时显示,浒苔的声散射特征具有其特殊的复杂性,这可能与可通过光合作用产生气体(氧气)有关。因此,若欲利用声学方法对下沉浒苔资源进行定量评估调查,需对浒苔的生理生化特征进行同步观测研究。[中国水产科学, 2009, 16(6): 905-913]

关键词: 浒苔; 声反射特征; 体积反向散射强度; 浒苔密度

中图分类号: Q94

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2009)06-0905-09

2008年6月初黄海中南部海域发生大规模浒苔(*Enteromorpha prolifera*)暴发事件^[1-2],大量浒苔向青岛近海和沿岸漂移,并在7月初发生下沉现象。为避免因浒苔下沉、死亡诱发水质恶化而引起重大环境灾害,作为浒苔应急处理工作的一部分,课题组于2008年7月10-11日开展了底拖网捕捞调查,并尝试利用Simrad EY500便携式海洋生物资源回声探测—积分系统对下沉浒苔进行了声学探测与搜寻。经结合拖网资料分析,取得了下沉浒苔的声学映像线索,为探讨下沉浒苔的快速监测方法提供了一个充满希望的研究方向。

水生生物资源的定量声学调查是20世纪60年代才逐渐发展完善起来的,主要是利用声波对水下生物进行回声探测^[3-4]。该方法采用走航式脉冲探测与积分技术,沿调查航线对换能器之下的全水层

生物资源进行准连续回声观测,具有快捷、取样率大而不以破坏生物资源为代价等优点,已成为渔业资源调查的一个重要方法^[5]。起初,该方法主要应用于鱼类,因此其相应的学科称为渔业声学^[6]。

渔业资源的声学调查是建立在回声积分值与所探测鱼类密度呈线性关系的基础上的^[7]。为实现鱼类资源的定量评估,需要了解鱼类的声学特性,亦即鱼类对声波的散射特征与有效反射能力(其中描述后者的参量称为目标强度),以进行回声积分值与生物量密度之间的转换^[6,8]。因此调查对象声学特性的研究^[9-10]是开展生物资源声学调查的前提。

随着理论与技术的不断发展,声学探测研究的对象从起初的鱼类逐渐向浮游生物拓展,并派出浮游动物声学^[6]。至于利用声学方法对大型海藻进行研究,近年也有应用尝试^[11-12]与实验报道^[13],但应

收稿日期: 2008-12-04; **修订日期:** 2009-06-11.

基金项目: 国家科技支撑计划项目课题“浒苔快速、高效清除技术及其工程化配套设施(2008BAC49B03)”;农业部黄渤海渔业资源环境重点野外科学观测试验站和山东省泰山学者工程专项共同资助。

作者简介: 赵宪勇(1965-),男,研究员,主要从事渔业声学与渔业资源学研究. E-mail: zhaoxy@yfsri.ac.cn

用对象多为海底着生的大规模藻床^[11-12],且有关其定量关系尚未见报道,无以借鉴。为建立下沉浒苔的快速监测方法,本研究小组在水池内对浒苔进行了声学实验测定研究,旨在了解浒苔对声波的反射特征,确定浒苔回声信号与生物量的转换系数,为下沉浒苔的声学探测与生物量评估提供基础依据。

1 材料与方 法

1.1 实验设备与装置

浒苔的声学实验测定于2008年7月16日至7月20日在中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所的消声水池内进行,水池规格为6 m×7 m×6 m。水池内充满淡水。水下实验装置如图1所示。

实验沿水池的宽向(7 m)水平进行。水声换能器安装于铝合金拖翼之上,紧贴池壁悬挂,换能器中心位于水面之下2.8 m处。换能器表面垂直面向另一侧池壁。实验时浒苔置于一特制单丝尼龙网袋之内,放置于换能器与对面池壁之间、距对面池壁约2 m处;因此浒苔网袋距换能器表面约5 m。

1.1.1 声学仪器及其校正 实验用声学仪器为Simrad EY500 分裂波束式回声探测—积分系统,由

收发主机、笔记本电脑和换能器3部分组成。笔记本电脑装有控制软件(V5.31),同时具有映像显示和数据存储功能。换能器型号为ES70-11,即分裂波束式,工作频率为70 kHz,半功率角为11°。

为消除不同介质条件(水温、盐度等)对声波传播以及换能器性能的影响^[6],确保浒苔回声信号强度的客观性,实验前首先对声学仪器进行了校正。Simrad EY500的校正采用标准球方法进行^[14-15]。所用标准球为直径32.1 mm的特制铜球,已知目标强度为-39.1 dB。换能器目标强度增益(TS Transducer Gain)的校正采用声轴法进行,体积反射强度增益(Sv Transducer Gain)的校正采用积分法进行。声学仪器校正结果及主要仪器参数设置见表1。

水银温度计读数显示,水池内实验水层(深2.5 m~3.5 m)的水温为22~23℃;因此水下声速约为1490 m/s^[14],淡水对声能的吸收系数约为1 dB/km^[6,16]。

实验用换能器的有效工作面为矩形,长边为0.13 m。根据换能器波束近场与远场临界距离(R_b , m)算式^[6]:

$$R_b = a^2 / \lambda, \quad (1)$$

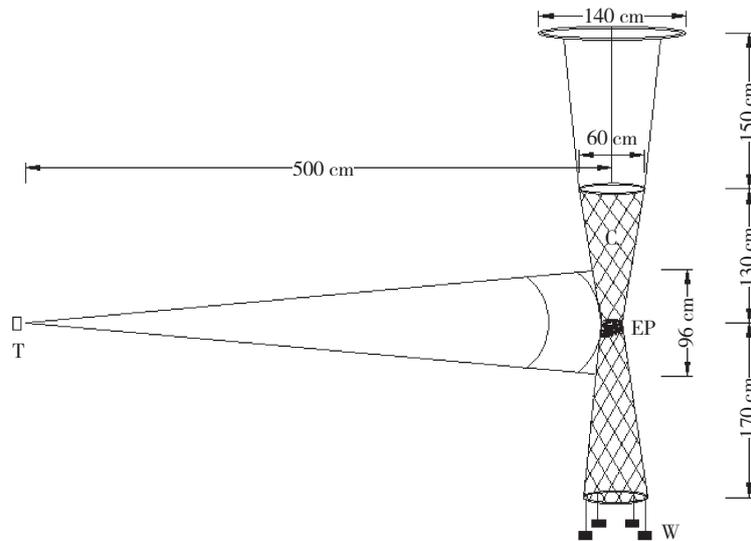


图1 浒苔声学测定实验装置演示图

T: 换能器; C: 网袋; EP: 浒苔; W: 沉子。

Fig. 1 Illustration of experimental setup for acoustic measurements of *Enteromorpha prolifera*

T: Transducer; C: Cage; EP: *Enteromorpha prolifera*; W: Weights.

式中 a 代表换能器的最大边长, λ 代表声波的波长; 可得 R_0 为 0.79 m。因此浒苔网袋离换能器

的距离(约 5 m)远远大于 $2R_0$ 的最小有效测定距离^[6]。

表 1 Simrad EY500 回声探测—积分系统(V5.31) 浒苔测定用参数设置

Tab. 1 Simrad EY500 echosounder (V5.31) parameter settings for *Enteromorpha prolifera* measurements

参数 Parameter	设置 Settings	单位 Unit
脉冲间隔 Ping interval	1	s
脉冲宽度 Pulse duration	Medium/0.6	ms
带宽 Band width	Wide/7.0	kHz
最大发射功率 Maximum transmitting power	50	W
量程 Range	10	m
吸收系数 Absorption coefficient	1.0	dB/km
换能器双程等效立体角 2-Way beam angle	-20.6	dB
换能器目标强度增益 TS transducer gain	21.15	dB
换能器体积反射强度增益 Sv transducer gain	20.90	dB
换能器纵向半功率角 Alongship 3 dB beam width	11.0	degree
换能器横向半功率角 Athwardship 3 dB beam width	11.0	degree
声速 Sound velocity	1490	m/s

1.1.2 浒苔网袋装置的构造 浒苔测定用网袋(图 1)由一拉直长 3.5 m、宽 2.2 m 的长方形单丝尼龙网片制成。尼龙丝直径为 0.2 mm; 网目拉直长度为 45 mm。网片沿长向卷成圆筒, 在离一端 1.5 m 处(以下简称“上端”)以同质网片做一圆形隔断, 将网筒分割成两半。网筒两端以直径为 60 cm 的园铁丝圈(以下简称“网圈”)支撑; 所有接缝均以 0.15 mm 的单丝尼龙线联结。如此形成的网袋将给出均匀(稳定)且强度较小的回声信号。

实验时, 将网筒上端的网圈以 3 根 154 cm(系后长度)聚乙烯网线等间距系缚于一直径为 140 cm 的、由 PVC 管制做的浮圈上, 网筒下端的网圈则缚以 4 个小型沉子(图 1)。如此下水后, PVC 管圈浮于水面, 网筒则拉直下垂呈纺锤型, 隔断附近网筒的直径为 10~15 cm。在本实验所用浒苔质量范围内, 浒苔的多寡对网筒的直径无显著影响。隔断处离水面的深度约 2.8 m, 与换能器基本处于同一水平面。

1.2 浒苔的采集与处理

实验用浒苔共有 2 批, 分别于 2008 年 7 月 16 日和 7 月 19 日采自青岛沿岸浒苔打捞船的卸载地, 挑选新鲜浒苔以塑料袋包扎, 置于泡沫箱内空运至

实验地(上海)。为预防温度过高引起浒苔腐败, 泡沫箱内同时置放冰瓶若干。浒苔在采集后 6 小时左右即运抵实验场所, 状况良好(仍为活体)。浒苔运抵后, 用于当天测定的先置于盛有淡水的水桶之中, 其余部分冷藏于冰箱之中(约 5℃)备用。

测定前将浒苔在水中轻轻摆洗, 去除杂物(个别端足类浮游动物和其他海草), 置于带孔眼的塑筐内沥水至浒苔提起后不自行滴水, 再将下部轻柔挤水后以电子天平称重, 精度为 1 g。称量实验结果显示, 如此处理的浒苔质量约为刚运抵实验地、未经淡水浸泡浒苔质量的 2 倍, 多次试验结果基本相同, 因此所测浒苔质量按称量质量的 50% 计。

浒苔称重后置于水中, 轻轻搅摆使其分散后静置, 以避免气泡裹存其中。

1.3 声学测定与数据采集

1.3.1 分组设计 为分析回声积分值与浒苔密度之间的关系, 对浒苔分不同质量组进行回声测定。测定由中等密度开始, 向低、高密度扩展; 密度梯度及最大、最小测定质量根据实测回声强度情况而定。另外, 实验中还专门对空网的声反射特征进行了测定, 以扣除浒苔测定时来自网袋的声反射贡献。

1.3.2 浒苔的入水与定位 测定装袋时将浒苔从水中整体捞起,沿网袋装置的下网圈张口装至网筒中部隔断处,以聚乙烯细绳将浒苔下面的网筒缠绕一圈后勒紧,以防浒苔在下水过程中散落。装有浒苔的网袋装置下水沉落稳定后,再将细绳的一端松开,轻缓、断续地拽动另一端直至细绳完全抽出。此时浒苔因自身浮力聚集于网筒隔断下方。调整固定PVC浮圈的绳索,同时通过EY500观察浒苔回波信号,直至浒苔位于换能器波束声轴。

1.3.3 数据采集 浒苔(包括网袋)的声学映像数据直接存于笔记本电脑硬盘供回放、分析之用。测定时积分时长为2 min,即对120次回波信号进行积分,其平均值通过电脑的串行口以RS232信号线接存至另一台电脑,所用通信软件为PROCOMM®(V2.4, Datastorm Technologies Inc., 1986)。

由于浒苔刚下水时易带入气泡而影响测定结果,且下水前期浒苔似乎存在一段状态调整过程以致回波信号不甚稳定,因此待浒苔下水1 h后才进行数据采集。另外实验前期曾发现浒苔入水过久(12 h之后发现)会出现下沉现象,因此数据采集在浒苔下水后4 h即行终止。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 浒苔回声信号与生物量定量关系参数的选择 若要利用声学方法对水生生物资源进行定量评估,需建立回声信号与目标生物之间某种量的关系,以实现二者之间的转换。在鱼类资源调查中,这种定量关系可用鱼类个体目标强度与鱼类体长经验公式来表示^[6]。然而,由于浒苔纤细、易碎,难以象鱼类那样以个体计量,因此无法建立传统形式的浒苔目标强度关系式,而是需要选择其他适宜的定量参数进行研究。

在渔业声学已有参量中,体积反向散射系数(Volume backscattering coefficient)是描述单位水体生物回声信号强弱的参数^[7],而密度则是描述单位水体生物量的参数,二者之间具有“单位水体”这一共同的度量基础。因此选择浒苔密度和体积反向散射系数分别作为描述浒苔和回声信号的参量,以

确定浒苔生物量声学评估中的转换系数。

1.4.2 浒苔密度的计算 所测浒苔密度的计算公式为:

$$\rho = w/V \quad (2)$$

式中, ρ 为浒苔密度(g/m^3), w 代表所测浒苔质量(g), V 代表浒苔所在水体的体积(m^3)。需要说明的是,此处所谓“浒苔所在水体的体积”是指包络浒苔的声脉冲波束所占据的水体体积^[6],而非浒苔自身的体积,也非波束中网袋的体积。

水下声脉冲信号宽度($\Delta R, \text{m}$)的计算公式为:

$$\Delta R = c\tau/2 \quad (3)$$

式中, c 为声速(m/s), τ 为脉冲宽度。根据表1给出的 c 、 τ 数据可得 ΔR 为0.45 m,大于浒苔网袋的直径(10~15 cm);本实验所用换能器的半功率波束角为 11° ,在实验距离约5 m处的波束直径为0.96 m,也大于浒苔网袋的直径;因此水下声脉冲可以将所测浒苔完全包络其中。据此,式(2)中 V 即水下声脉冲信号的取样体积,可由下式计算^[6]:

$$V = c\tau\psi R^2/2 \quad (4)$$

式中, ψ 为换能器的等效立体角(立体弧度, sr),是表1中换能器双程等效立体角(Ψ, dB)的线性表达形式,即 $\psi = 10^{0.1\Psi}$; R 为浒苔离换能器的距离(m)。

1.4.3 体积反向散射系数的计算 本实验采集的数据为“海里面积反向散射系数(Nautical Area-Backscattering Coefficient)”^[17],亦即海洋渔业资源声学评估中所谓的“积分值”^[8],它与体积反向散射系数之间的关系为^[18]:

$$s_A = 4\pi(1852)^2 \int_{z_1}^{z_2} s_v^* dz \quad (5)$$

式中, s_A 代表海里面积反向散射系数(以下简称积分值),单位 $\text{m}^2/\text{nmile}^2$; s_v^* 代表积分水层内不同深度处的体积反向散射系数,单位 m^2/m^3 ; z_1 、 z_2 分别代表积分水层上下边界,单位m。

令 s_v 代表积分水层内的平均体积反向散射系数,则式(5)简化为:

$$s_A = 4\pi(1852)^2 s_v Z \quad (6)$$

式中 Z 代表积分水层的厚度(m)。

对本实验而言, $Z = \Delta R$ 。由式(3)、式(6)可得:

$$s_v = 2s_A / 4\pi(1852)^2 c\tau \quad (7)$$

1.4.4 体积反向散射系数与浒苔密度的关系 由于浒苔的声学特征不像鱼类目标强度那样已有较为完善的理论基础^[6]和丰富的实践经验^[9-10,19],因此未对浒苔密度与浒苔体积反向散射系数之间的函数关系进行提前限定,而是根据统计软件提供的各种平滑函数进行探索,在物理意义明确、合理的前提下,选择拟合最好的函数关系。所用统计分析软件为 SYSTAT[®] (V10.2, SYSTAT Software Inc., 2002)。

2 结果与分析

2.1 空网的声反射强度特征

图 2 展示了空网回声积分值的实验测定结果。从图中可以看出,尽管各测定结果(120 次脉冲的平均值)间存在一些波动,但总体基本稳定。为确保所选数据是网袋处于声轴附近时的测定结果,同时考虑到网袋回波信号的固有变化(见讨论部分),因此

根据图 2 选取 5 个最大积分值做为空网回声反射的有效测定数据,并取其均值作为空网的回声积分值,结果为 62.3 m²/nmile²。

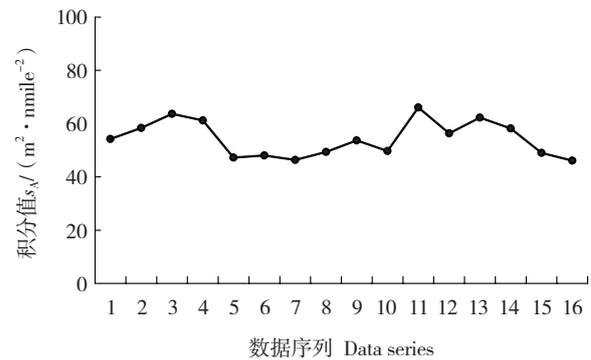


图 2 空网的回声测定原始数据(120 次脉冲平均值)

Fig. 2 Raw acoustic measurements of the empty cage

2.2 浒苔的声反射强度特征

共对 7 个质量组浒苔的回声积分值进行了测定,实验测定的基本信息见表 2。

表 2 浒苔声学测定的基本信息与结果
Tab. 2 Results from acoustic measurements of *Enteromorpha prolifera*

浒苔质量 /g Mass	测定组号 Group no.	测定日期 Date	测定时间 time	距离 /m Distance	积分值 / (m ² · nmile ⁻²) s_A
38	7*	2008-07-20	20:50-22:55	5.00	1606.9 (±15.9)
50	3	2008-07-19	18:30-21:00	4.90	327.5 (±5.4)
70	4	2008-07-20	09:30-11:25	4.95	311.9 (±2.8)
100	2	2008-07-19	16:00-18:15	4.80	1125.5 (±11.1)
150	1	2008-07-19	12:00-15:30	5.00	1470.1 (±28.2)
160	5	2008-07-20	12:30-15:00	4.95	2096.5 (±62.9)
250	6*	2008-07-20	15:20-19:00	4.95	12011.3 (±71.7)

注:“*”表示该组数据未用于最终数据分析;表中积分值为“平均值(±标准误差)”,其中空网的贡献已扣除。

Note:“*” indicates the data was not used for final analysis; s_A is expressed as “mean (±SE)”, where the contribution of empty cage has been excluded.

前 5 组实验(表 2)观测显示,浒苔回波信号的强度存在不规则性周期变化。图 3 显示了浒苔回声积分数据的典型变化动态,其最大值为最小值的 2.2 倍,变化幅度远较空网信号(图 2)的变化大。基于空网测定结果中同样的考虑,每组实验选取 5 个最大值做为浒苔的有效测定数据,结果见表 2。

实验进行至第 6 组时出现异常现象。如图 4 所

示,浒苔回波信号不再如前 5 组那样进行周期性变化,而是在下水 1 h 后呈持续增大趋势,难以确定有效实验数据,且其积分值非常高,已脱离前 5 组实验形成的基本趋势。第 7 组实验情况类似。在此不对这 2 组实验数据做进一步处理,但表 2 给出了实验观测到的 5 个最大值的平均值,供比较参考。

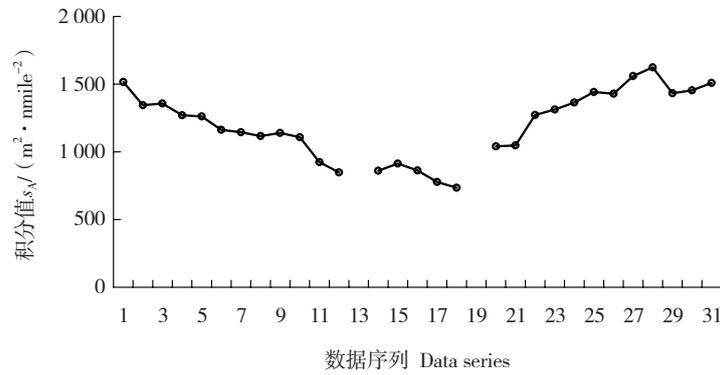


图3 浒苔回声测定数据的典型变化动态
同一组浒苔(150 g)的3组回声积分数据

Fig. 3 Typical variations of the acoustic measurements of *Enteromorpha prolifera*
Three subsets of s_A from the same group of *Enteromorpha prolifera* (150 g) are shown

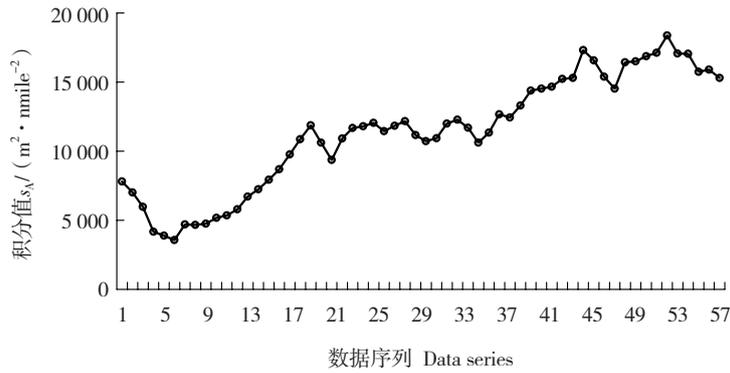


图4 浒苔回声测定数据的异常变化动态
同一组浒苔(250 g)回声积分值随时间的推移而持续增大的数据

Fig. 4 Abnormal changes of the acoustic measurements of *Enteromorpha prolifera*
The data show that the s_A of one group of *Enteromorpha prolifera* (250 g) increases with time

2.3 浒苔体积反向散射系数与密度的关系

前5组实验结果(表2)生成的浒苔体积反向散射系数与浒苔密度之间的关系如图5所示,其中的线性回归($R^2=0.939, P=0.007$)和幂函数回归均可较好地描述二者之间的关系。但线性回归不经过原点,即当浒苔密度为零时积分值并不为零(实为负数),是不合理的。因此选择幂函数对浒苔体积反向散射系数与浒苔密度的关系进行描述,公式如下:

$$s_v = a\rho^\beta \tag{8}$$

式中, a 和 β 均为关系系数。

对式(8)两边取常用对数得:

$$\lg s_v = \beta \lg \rho + \lg a \tag{9}$$

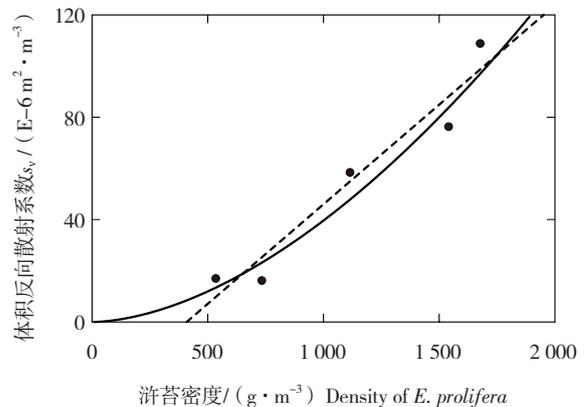


图5 浒苔体积反向散射系数与浒苔密度散点图
图中实线为幂函数拟合曲线,虚线为线性回归线

Fig. 5 Scatterplot of s_v vs. density of *Enteromorpha prolifera*
Solid line is the fitted power curve, dashed line is the linear regression line

以式(9)对前5组实验数据进行线性回归得:

$$\lg s_v = 1.73 \lg \rho - 9.59 \quad (R^2 = 0.895, P = 0.010) \quad (10)$$

$$s_v = 2.56 \times 10^{-10} \rho^{1.73} \quad (11)$$

式中 s_v 代表浒苔的体积反向散射系数 (m^2/m^3), ρ 代表浒苔的密度 (g/m^3)。

3 讨论

3.1 浒苔声反射强度的动态特征

3.1.1 回声信号的波动 从图2至图4可以看出,无论是空网(图2)还是装有浒苔的网袋(图3、图4),其回波信号均存在一定的波动。这种波动可能源自两个方面。一是复杂声散射体回波信号的固有波动。无论空网袋还是盛有浒苔的网袋,其回声信号均由网袋(及其中浒苔)不同部分的回波叠加而成。本实验所用声波的频率为70 kHz,其波长很小(2.13 cm),因此构成网袋的网线相对换能器的距离或浒苔之间的距离略有变动即会引起回波信号各组份间相位差的变化,从而引起叠加信号强度的变化。因此以资源评估为主要目的时,渔业声学更加关注平均场^[6-8],而非单个取样数值。这也是本实验选择若干(5个)时段的回声积分值进行平均的缘故。

引起回波信号波动的另外一个原因推测是换能器波束的指向性与浒苔网袋低频摆动的综合影响。由于浒苔相互缠绕,无法使其随机分布于整个脉冲波束内,因此实验选择将浒苔置于声轴,对其最大反射信号进行测定。由于实验所用换能器波束较窄(11°),具有很强的指向性^[6],且测定距离较近(5 m),因此回波信号的强度对浒苔网袋相对声轴的位置较为敏感。本实验所用水池内存有几条实验用鱼。这些鱼类在对盛有浒苔的网袋实施攻击后或游过网袋附近时,可能引起网袋的摆动,从而改变浒苔与声轴的相对位置,造成回波信号的波动(鱼类进入波束时可从映像上看出,因此选择后的测定数据不受鱼的影响)。这也是本实验选择最大回声积分值的缘故。而实验选择5个数值的平均值则是既要保证网袋位于声轴、又要兼顾回波信号固有波动的综合考虑结果。事实上数据处理过程中还对4个最大、3个最大

以及在5个最大值中取中间3个值等方案进行了比较(通过 R^2 和 P 值),几种方案的结果相近,而选取5个数值的拟合效果最好。

3.1.2 回声信号的“异常”现象 从表2和图4可以看出,第6、7组浒苔的回声信号(积分值)明显强于前5组浒苔,其信号变化趋势也明显“异常”。其确切原因尚不清楚。这可能与浒苔自身的生理、生化特性有关。

浒苔藻体呈管状^[1,20],当光合作用强盛时管内会充满气体(氧气,黄海水产研究所叶乃好和毛玉泽,私人交流),从而成为强的声散射体;而当光合作用长时间中止或衰弱后,管内气体减少,声散射强度则相应变弱。因此作为声探测对象,浒苔的回波信号强度可能随其生理活动状态(如光合作用)的不同存在较大幅度的变化;第6、7组的实验结果也可能是浒苔处于另一种生理活动状态的正常现象。环境条件(如光照强度)及生理生化状态(如藻体管内的气体含量)同步观测将有助于全面揭示浒苔的声反射特征。

3.2 浒苔体积反向散射强度与密度的关系

渔业声学数据的取值范围经常涉及多个量级,因此常以分贝值表示,其中体积反向散射系数 s_v 的分贝表示形式 S_v (dB) 称为体积反向散射强度,二者的换算关系为:

$$S_v = 10 \lg s_v \quad (12)$$

将式(10)两边乘以10得:

$$S_v = 17.31 \lg \rho - 95.9 \quad (13)$$

由式(13)可以看出,浒苔体积反向散射强度与浒苔密度的关系式和鱼类个体目标强度(TS, dB)与体长(L , cm)经验关系^[7]: $TS = a \lg L + b$,具有相同的表达模式,表明浒苔的声反射特征在经验模式上与鱼类是相似的,因此渔业声学的基本理论同样适用于浒苔的声学调查与评估。

黄、东海海洋生物资源声学调查评估中,积分阈,亦即参与积分的回声信号的最低体积反向散射强度为 -80 dB ^[8]。据此,由式(13)可得,海上可探测的最低浒苔密度(ρ_{\min})为 $8.3 \text{ g}/\text{m}^3$ 。为去除较弱信

号的视觉干扰从而取得理想的映像判别效果,映像显示的回声信号的最低体积反向散射强度一般设置为 -70 dB(该参数仅对映像显示有效,积分阈仍为 -80 dB)。因此,为获得清晰可辩的映像显示,海上浒苔的 ρ_{\min} 为 31.3 g/m^3 。以上是根据前 5 组实验结果做出的预测。若出现类似第 6、7 组浒苔实验的情况,海上调查对浒苔密度的要求则会大幅降低。

需要指出的是,以上关于海上浒苔探测的 ρ_{\min} 值是以式(13)为基础的,因此式(13)回归系数的准确性直接影响 ρ_{\min} 值的估算。而式(13)回归系数的准确性则取决于式中两参量测定的准确性。本实验测定前严格按目前国际最新通用技术对声学仪器进行了校正,有关海、淡水的盐度以及水温等声传播介质的理化特性差异因素也已包括其中^[14],因此式(13)中主要取决于仪器性能的 S_v 的观测误差以及咸、淡水的差异可以忽略不计。而实验中的主要误差可能是与浒苔密度估算有关的浒苔称重误差。

本实验所用浒苔来自海洋环境。为使浒苔尽快“适应”淡水,实验时提前将其置于淡水,因此称重前浒苔的沥水程度直接影响浒苔质量称量结果的准确性。本实验以基本无水的浒苔质量为基准(1.2),因此还存在“沥水”浒苔质量与“无水”浒苔质量的转换系数(50%)问题,这给浒苔质量的确定增加了一个不确定因素。更加“标准化”的称重方法将有助于提高实验结果的准确性。

4 结论

(1) 浒苔是有效声散射体,利用现行海洋生物资源声学调查仪器设备可对其进行有效声学探测。

(2) 浒苔的体积反向散射强度与浒苔密度的关系为 $S_v=17.31g \rho-95.9$,与鱼类个体目标强度和体长关系具有相似的表达模式,因此可以利用渔业声学理论与方法对其资源进行定量调查与评估。

(3) 浒苔的声散射特征可能因其自身生理生化特性而具有其特殊性,浒苔生理生化特征的深入研究与同步观测将有助于进一步了解与揭示浒苔声散射的定量特征。

致谢: 黄海水产研究所黄滨、高淳仁、董登攀参与了浒苔的采集,东海水产研究所黄洪亮、王磊、李灵智参与了网袋的制作,渔业机械仪器研究所湛志新参与部分实验测定,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 张晓雯,毛玉泽,庄志猛,等. 黄海绿潮浒苔的形态学观察及分子鉴定[J]. 中国水产科学,2008,15(5): 822-829.
- [2] 叶乃好,张晓雯,毛玉泽,等. 黄海绿潮浒苔(*Enteromorpha prolifera*)生活史的初步研究[J]. 中国水产科学,2008,15(5): 853-859.
- [3] Forbes S T, Nakken O. Manual of methods for fisheries resource survey and appraisal. Part 2: The Use of acoustic instruments for fish detection and abundance estimation [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Man Fish Sci, No. 5. 1972.
- [4] 赵宪勇,金显仕,唐启升. 渔业声学及其相关技术的应用现状和发展前景 [A]. 99' 海洋高新技术发展研讨会论文集 [C]. 北京: 海洋出版社,2000: 55-62.
- [5] Gunderson D R. Surveys of fisheries resources [M]. New York: John Wiley & Sons,1993.
- [6] Simmonds E J, MacLennan D N. Fisheries Acoustics: theory and practice 2nd ed [M]. Oxford: Blackwell Science,2005.
- [7] Foote K G. Linearity of fisheries acoustics, with additional theorems [J]. J Acoust Soc Am,1983,73: 1932-1940.
- [8] 赵宪勇,陈毓楨,李显森,等. 多种类海洋渔业资源声学评估技术与方法探讨 [J]. 海洋学报,2003,25(增刊1): 192-202.
- [9] Foote K G. Fish target strengths for use in echo integrator surveys [J]. J Acoust Soc Am,1987,82: 981-987.
- [10] 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.
- [11] Butler A, Jernakoff P. Seagrass in Australia: Strategic review and development of an R & D plan [M]. Hobart: CSIRO Publishing. 1999.
- [12] McCarthy E M, Sabol B. Acoustic characterization of submerged aquatic vegetation: military and environmental monitoring applications [Z]. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. 2000,3: 1957-1961.
- [13] Molero A C, Carbó R. Acoustic methods for Gelidium seaweed detection [J]. Bol Inst Esp Oceanogr,1999,15(1-4): 325-336.
- [14] Foote K G, Knudsen H P, Vestnes G, et al. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide [M]. Int Coun Explor Sea Coop Res Rep,1987, No. 144.

- [15] Ona E. Methodology for target-strength measurements: with special reference to in situ techniques for fish and micronekton [M]. ICES Coop Res Rep, 1999, No. 235.
- [16] Francois R E, Garrison G R. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contributions and equation for total absorption [J]. J Acoust Soc Am, 1982, 72: 1 879–1 890.
- [17] MacLennan D N, Fernandes P G, Dalen J. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics [J]. ICES J Mar Sci, 2002, 59: 365–369.
- [18] Knudsen H P. The Bergen integrator: an introduction [J]. J Cons Int Explor Mer, 1990, 47: 167–174.
- [19] Zhao X, Wang Y, Dai F. Depth-dependent target strength of anchovy (*Engraulis japonicus*) measured in situ [J]. ICES J Mar Sci, 2008, 65: 882–888.
- [20] 王晓坤, 马家海, 叶道才, 等. 浒苔 (*Enteromorpha prolifera*) 生活史的初步研究 [J]. 海洋通报, 2007, 26 (5): 112–116.

Acoustic backscattering property of *Enteromorpha prolifera*

ZHAO Xian-yong¹, NI Han-hua², LIU Yong-li³, LI Jiao¹, SHI Xiao-tian², LUAN Yang¹, XU Hao², WANG Lu-min³, GUAN Chang-tao¹, TANG Tao-lin², HUANG Jian²

(1. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fishery Resources, Ministry of Agriculture; Key Laboratory for Fishery Resources and Eco-environment, Shandong Province; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China; 3. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: Experimental measurements on the acoustic backscattering properties of *Enteromorpha prolifera* were conducted in an anechoic tank with a calibrated, 70 kHz, Simrad EY500 echosounder; and a quantitative expression for the relationship between acoustic backscattering strength and density of *Enteromorpha prolifera* was established based on those relevant measurements, including echo integrals. The experiment shows that *Enteromorpha prolifera* is an effective sound scattering target; and that the relationship between volume backscattering strength (s_v , dB) and density of the organism (ρ , g/m^3) can be expressed as $S_v=17.31g\rho-95.9$, which is in line with the target strength to length relation of fish in terms of model expression. These findings indicate that the principles of fisheries acoustics as well as the current acoustic instrumentation and methodology can also be used for *Enteromorpha prolifera* detection, and that hydroacoustics can be used as an available and effective technique for rapid monitoring of submerged *Enteromorpha prolifera*. The experiment also shows that the acoustic scattering property of *Enteromorpha prolifera* is characterized with special complexity, which is likely to be connected with gas (oxygen) production property of the organism during photosynthesis process. Therefore, if acoustic method is to be used for quantitative assessment of submerged *Enteromorpha prolifera*, the physiological and biochemical characteristics of *Enteromorpha prolifera* need to be observed concurrently. [Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16 (6): 905–913]

Key words: *Enteromorpha prolifera*; acoustic backscattering property; volume backscattering strength; density of *Enteromorpha prolifera*