

淡水水体气泡的声学信号特征与识别研究 ——以乐昌峡水库为例

武 智¹, 李新辉¹, 谭细畅², 李 捷¹, 朱书礼¹, 张迎秋¹

(1. 中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广东 广州 510380;

2. 珠江水资源保护科学研究所, 广东 广州 510611)

摘要:淡水湖泊和水库底部沉积物产生的甲烷(CH_4)常以气泡方式从水中逸出, 由于气泡目标强度(target strength, TS)分布范围与鱼类目标强度高度重合, 导致信号误判而影响数据处理。2017年7月, 使用分裂波束渔探仪Simrad EY60(120 kHz, 200 W)在北江水系乐昌峡水库进行声学探测, 研究不同航速下的信号类别, 为水下气体跟踪、温室气体释放通量、水体底质演变及渔业资源评估提供参考依据。结果显示, 气泡(多数)和鱼类(少数)为乐昌峡水库主要声学散射体, 与鱼类信号的随机性相比, 气泡具有一定的规律性, 一直上升且水平位移较小, 气泡与鱼类在相对游泳速度、垂直方向变化、目标轨迹的垂直变化等变量存在显著差异($P < 0.01$)。气泡在水中的平均上升速度为23.95 cm/s, 95%置信区间为23.17~24.74 cm/s; 平均气泡目标强度为-60.09 dB, 分布范围为-73.82~ -33.29 dB, 半径范围0.20~21.65 mm; 气泡在上升过程中速度逐渐减慢, 半径逐渐减小, 与水深呈显著相关关系($r = 0.99, P < 0.01$)。船速 $< 3 \text{ km/h}$, 回波图能清晰分辨气泡和鱼体信号, 可作为目标运动轨迹识别依据。

关键词:乐昌峡水库; 气体释放; 声学信号; 气泡特征

中图分类号:X827 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)04-0032-08

大气温室气体浓度增加及全球气候持续性变暖引发的一系列生态与环境问题已引起人们对温室气体“源/汇”的广泛关注。水生生态系统作为温室气体重要的源和汇, 对大气环境中温室气体浓度变化具有重要影响(杨平和全川, 2015)。温室气体释放过程具有高度的时空异质性, 释放方式多样, 且释放过程受到诸多因素影响, 导致评估其释放的不确定性增大。自20世纪以来, 温室气体的高强度排放, 导致每年大气中的甲烷(CH_4)浓度以1%的速率增长(Sherwood, 1985)。相较于河流, 水库相对封闭的深水环境和静水特征, 使得水体中的物质更容易汇集、沉积, 生产与分解过程比较活跃(程炳红等, 2012)。有学者认为, 在亚马逊流域, 水电站库区排放的温室气体大于同等发电量的化石燃料碳排放量(Fearnside, 1995)。当前, 主要有气体收集器、视

频/图片和超声探测技术3种方法测量气体排放。前两种方法可以在限定的区域内量化气体释放量, 目前的研究主要集中于池塘、湖泊、水库等静水水体(王洪君等, 2006; Zheng et al, 2011; 杨平等, 2013); 在水生沉积物中, 由于气体排放过程中, 其高度的时空异质性及宏观和微观的间断性, 导致前两种方法无法在大水域内量化气体释放通量, 而声学技术则以其快速、覆盖面积大等优势, 允许对气泡的空间异质性进行无干扰评估(Ostrovsky, 2003; Ostrovsky et al, 2008)。国外相关研究较多, 主要用来评估气泡通量(Ostrovsky et al, 2008)、时空变化(Ostrovsky, 2003)及其固有特征(Veloso et al, 2015)。如Ostrovsky(2009)在有气泡渗透的区域进行鱼类资源评估时, 发现在低船速下, 可通过回波图上轨迹直观分辨鱼和气泡; Weidner等(2018)利用宽带技术对气泡通量进行评估, 并与散射模型比较气泡半径和上升速度, 发现两种方法结果一致。

声学技术最初引入海洋渔业资源研究领域, 由于其快捷、取样率高, 且不损害生物资源等优点, 在世界渔业发达国家迅速得到应用与推广。随着近年来生态系统监测及研究的需求, 目前声学技术已成为观测和掌握渔业资源变动的重要手段, 我国近海

收稿日期:2019-06-12 修回日期:2021-02-25

基金项目:广州市科技计划项目(201707010448);广东省渔港建设和渔业产业发展专项;中国水产科学研究院珠江水产研究所自主创新项目(EC-2019-6)。

作者简介:武智, 1988年生, 男, 助理研究员, 主要从事渔业资源及渔业声学研究。E-mail: wz@prfri.ac.cn

通信作者:谭细畅。E-mail:jimtxc@hotmail.com

和内陆水域鱼类分布为多种类混栖型,因此信号判别一直为渔业声学研究的难点和重点。通过鱼类生态习性研究及对应声学回波的网具采样对比分析,在不同生境条件下较大规模的经济种类可以进行识别(谭细畅等,2009a;2009b),其他混栖种类仍无法鉴别。随着声学技术的进步及仪器设备性能的提高,宽带技术通过对目标散射体频率响应进行信号判别,为解决多种类混栖的识别问题提供可能(Jech et al,2017;Yan et al,2019)。在渔业资源研究中,气泡信号属于“混响”,而在水体温室气体释放研究中,气泡属于主要散射体,因此在不同调查目的下的信号识别显得十分重要。在热带亚热带地区,河流、湖泊、水库众多,植被丰富,大量有机质随水流进入水体;此外,人类活动导致水体富营养化,盛长的藻类不能通过食物链输出,沉积于水底,有机质分解时会排放大量的温室气体(Guerin et al,2006)。因此,分析水底气体释放,也是研究水生态系统状态的手段。目前,国内主要通过收集气体研究水-气界面气体释放通量、变化特征及其影响因素(喻元秀等,2008;李哲等,2014;汪国骏等,2017),对于水体中气泡形态、特征及其时空变化并无研究。本研究首次针对水体声学信号进行分析,探讨水下气体的信号特征、运动规律、识别方法,为研究水下气体跟踪、温室气体释放通量,分析河流、湖泊、水库底质与演变提供一种思路;同时,以期在渔业资源评估中减少信号误判,提高资源评估准确度。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

乐昌峡水利枢纽地处广东、湖南两省交界,下距乐昌市约14 km,位于北江支流武江乐昌峡河段,是以防洪、发电为主,兼顾航运、灌溉等综合利用的大型水利枢纽工程,2009年截流,2013年蓄水至正常水位154.5 m。枢纽集雨面积4 988 km²,坝址多年平均径流量43.61亿m³,多年平均流量138 m³/s。

1.2 数据收集与处理

2017年7月17~18日,使用Simrad EY60对研究区域进行了走航调查,设计航线为“之”字型,具体路线根据江面实际情况进行调整。鱼探仪工作频率120 kHz,功率200 W,-3dB波束宽(beam width)7.0°,脉冲宽度(pulse duration)256 μs。调查船为渔船,长约6 m,换能器垂直向下,吃水深度约0.5 m。船速可分为两个阶段,初始阶段为5~

6 km/h,当发现回波图中存在大量气泡信号时,随即降低船速降至2~3 km/h。根据覆盖率计算公式可知(Aglen, 1983),本次探测覆盖率为8.26。

原始声学数据(.raw)使用声学处理软件Echoview4.9®,该软件可根据目标的距离,通过时变增益(TVG)自动补偿接收到的回波信号(电压),回波计数采用 $40\log_{10}(R)$ TVG。根据气泡特征,最小声学阈值设置为-75 dB(Ostrovsky, 2003)。

气泡与谐振腔相似,在声波作用下近似地作均匀变形,因此相当于一个弹性元件,其尺寸通过后向散射强度计算,其他变量计算公式如下(Greinert & Nutzel, 2004):

$$\sigma_{bs} = 10^{\frac{TS}{10}} \quad ①$$

$$r = \sqrt{\sigma_{bs}} \quad ②$$

$$f_0 = \frac{r}{2\pi} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}} \quad ③$$

$$\delta_s = 2\pi\sigma_{bs} \quad ④$$

$$V_0 = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad ⑤$$

式中: σ_{bs} 为声学散射强度;TS为气泡目标强度; r 为气泡半径; f_0 为小气泡的谐振频率,即共振频率; γ 为气体等压比热的比值,对于标准状态下的空气来说, $\gamma=1.41$; P_0 是作用于气泡的压力; ρ 为介质密度; δ_s 为气泡表面积; V_0 为气泡体积。

2 结果

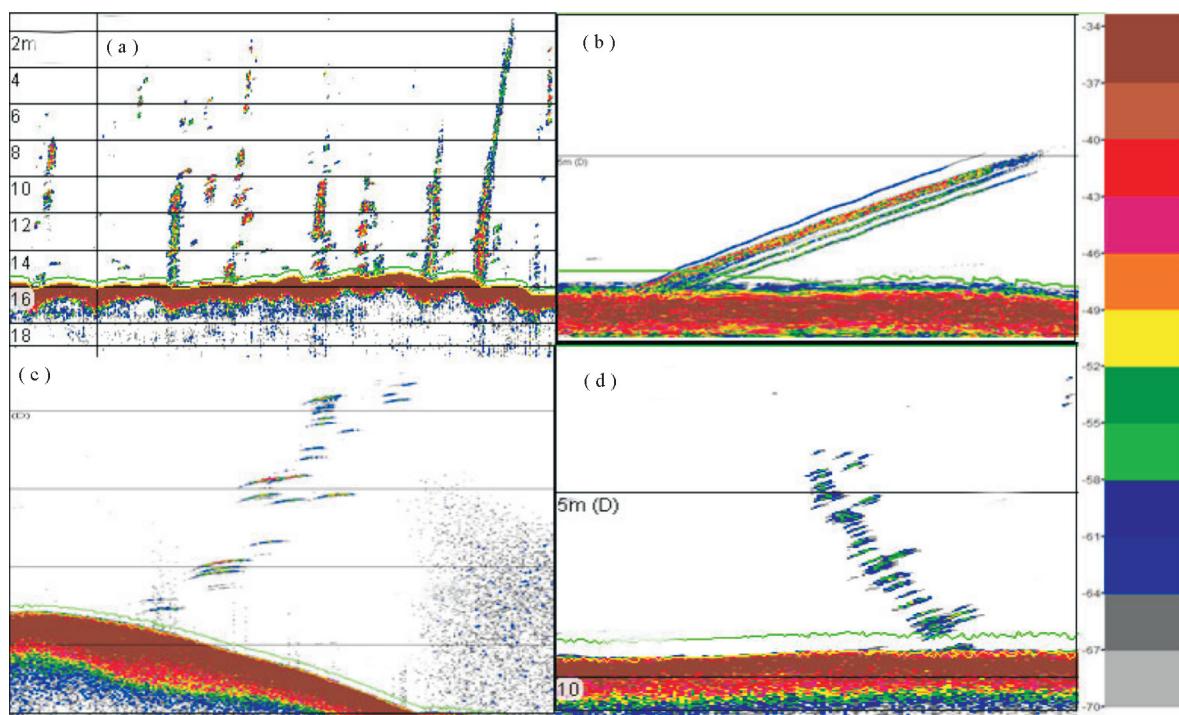
2.1 气泡类型

本次调查中,气泡(少量鱼体回波)是乐昌峡水库中主要的声学散射体。在船速较快、水深较浅时,很难在回波图中区分鱼体与气泡;相反,船速较慢(≤ 3 km/h),在深水层同一目标连续出现的多个脉冲中,则很容易分辨鱼体与气泡(图1)。本次研究主要发现有以下几种气泡类型:

(1)气泡柱(bubble flares或bubble plume),其形状与真实的水泡较为相似(图1-a),沉积物具有较高的CH₄产生速率,气泡呈连续串状;

(2)在船速较慢时,可以清楚地看到气泡从水底产生并逐渐上升的过程(图1-b),此种类型气泡比较少见;

(3)可分辨的单串气泡流,当水流和调查船航行方向相同时,气泡在上升过程中会产生向右倾斜的映像(图1-c);如果两者方向相反,则气泡上升会产生向左倾斜的映像(图1-d)。



(a)气泡柱,船速约为3 km/h;(b)气泡从水底产生并上升,船速约为1 km/h;(c)调查船航行方向与水流方向相同时,气泡流在回波图上向右倾斜;(d)调查船航行方向与水流方向相反时,气泡流在回波图上向左倾斜。

图1 典型气泡声学回波影像

(a) Bubble flares at a survey speed of 3 km/h;(b) Bubbles from sediment rising at low boat speed (1 km/h);(c) Bubbles slanting right on an echogram when the water current and ship are moving in the same direction;(d) Bubbles slanting left on an echogram when current and ship are moving in opposite directions.

Fig.1 Split-beam echogram showing typical hydroacoustic manifestations of rising methane bubbles

2.2 气泡特征

2.2.1 上升速度 气泡在水中的平均上升速度为23.95 cm/s,95%置信区间为23.17~24.74 cm/s($n=360$)。在上升过程中速度逐渐减慢,水底气泡速度大于气泡柱顶端气泡速度。气泡上升速度与气泡目标强度(target strength, TS)呈相关关系($r=0.301, P<0.01$),即气泡TS越大,气泡上升速度越快。

2.2.2 垂直变化 气泡TS范围为-73.82~-33.29 dB,平均TS为-60.09 dB。由图2可见,气泡在上升过程中,TS逐渐减小。为了计算气泡尺寸,假定研究区域气泡在本次调查声学设备频率附近无共振。根据式①和式②转换可知,平均半径为1.657 mm,半径范围0.20~21.65 mm,95%置信区间为0.29~3.02 mm;通过式⑤得气泡平均体积为0.017 mL,范围为0.00014~38.7 mL。将水深每隔2 m划分一个水层,对每一层气泡信号频率分布求平均值。由图3可见,气泡在上升过程中半径逐渐减小,利用Pearson进行相关性分析,可见气泡半径与水深呈显著相关关系($r=0.99, P<0.01$),气泡半

径与水深的回归方程为: $y = 0.0359x + 0.7491$ ($R^2=0.9531$)。根据式③及式④可知,120 kHz的换能器工作频率下,调查水域气泡的共振半径为0.027~0.055 mm。

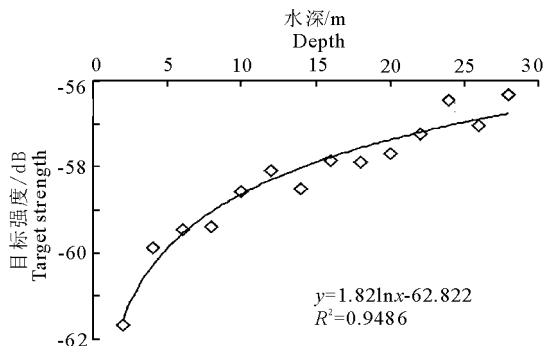


图2 上升过程中气泡目标强度随水深的变化趋势

Fig.2 Average TS of bubbles slightly decreased from the near-bottom to the upper

2.2.3 不同类型气泡目标强度分布 本次监测中,气泡主要有2种类型,即可分辨的单串气泡流(single bubble flare, SBF)和气泡柱(bubble flares, BFS)。图4为两种不同类型气泡目标强度(TS)频率分布,可见其分布走向基本一致,均呈单峰型分

布,SBF平均TS为-60.29 dB,峰值约为-58 dB;BFS平均TS为-56.97 dB,峰值约为-52 dB。

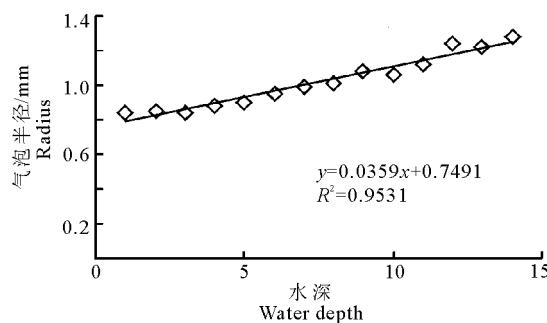


图3 气泡半径与水深的关系

Fig.3 Relationship between bubble radius and water depth

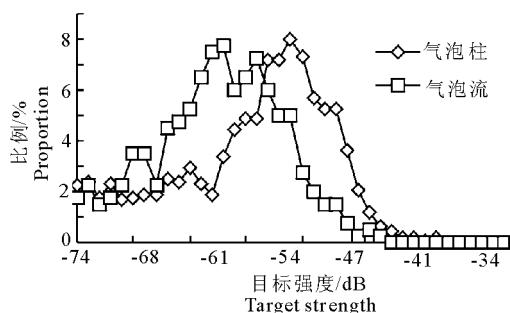


图4 不同类型气泡目标强度的频率分布

Fig.4 TS-frequency distributions of different bubble types

2.3 气泡与鱼类信号差异

船速小于3 km/h时,声学回波映像中鱼体信号与气泡有明显差别。人为选取了165个典型的声学信号(72个气泡信号、93个鱼体信号)进行分析,通过对Echoview输出的变量进行手动处理,剔除描述性的变量,使用SPSS对剩余的22个变量进行方差分析。结果显示,其中12个变量之间存在显著差异($P=0.00$),结合两种信号的特征及各变量表征的意义,选取相对速度、垂直方向变化、目标垂直变化、距离和共计4个变量检验气泡信号(BS)与鱼类信号(FS)之间的差异,统计结果见表1。相对速度是目标水平方向的相对游泳速度,50%鱼类相对速度在1.0~1.5 m/s,50%气泡相对速度在0.8~1.2 m/s;垂直方向变化主要是用来描述信号的迁移方向(-90,90),鱼类垂直方向变化有正有负,50%变化范围为-3°~5°;而气泡垂直方向变化全部为正,50%变化范围为12°~18°,表明气泡一直在上升,而鱼类则无明显规律;目标轨迹的垂直变化为轨迹中第一个信号与最后一个信号的差值,气泡信号全部为负,鱼体则有正有负。距离和是指相邻单体信号之间的距离之和。由于气泡在波束中水平位移较小,因此距离和较小;而鱼类则无明显规律,距离和相对气泡较大(图5)。

表1 不同变量方差检验结果

Tab.1 Variance for each bubble signal

变量	信号类型	均值±标准差	95%置信区间	变异系数	F	P
相对速度/m·s ⁻¹	FS	1.322±0.440	1.231~1.413	0.041	26.560	0.00
	BS	1.030±0.224	0.977~1.082			
垂直方向变化/°	FS	1.278±8.097	-0.398~2.955	109.202	136.197	0.00
	BS	16.111±8.123	14.216~18.007			
目标垂直变化/m	FS	-0.007±0.041	-0.016~-0.001	0.001	73.617	0.00
	BS	-0.053±0.022	-0.058~-0.048			
距离和/m	FS	0.466±0.082	0.407~0.525	0.029	49.913	0.00
	BS	0.221±0.251	0.202~0.241			

3 讨论

3.1 气泡信号与鱼类信号存在显著差异

随着水电站的建设,大量土地被淹没,土壤中的有机碳就会产生并释放大量的CO₂和CH₄,在蓄水的前几年里,排放量很高,大约20年后,排放会趋于稳定,达到接近天然湖泊的排放水平(Diem,2008)。乐昌峡水利枢纽于2009年截流,2013年蓄水至正常水位,水库蓄水淹没了大量植被,底部沉积了大量有机质,加上南方水温较高,有机质分解就会产生大量温室气体。

本次研究结果显示,气泡为乐昌峡水库主要声学散射体,因此推测调查期间该水库处于大量释放温室气体时期,为温室气体的源。Greinert等(2006)通过对孔隙水和天然水合物的气体分析,发现气泡成分99.4%为CH₄;Keller & Stallard(1994)对巴拿马一湖泊研究发现,98%的CH₄通过气泡排放途径进入大气,而CO₂通过气泡排放的比例不到2%;其他相关研究也得出相似结论(Yang et al,2013)。CH₄是通过厌氧降解有机物在沉积物中产生,由于其溶解性低,气泡排放是其进入大气的主要方式(Anderson & Martinez,2015);相较于

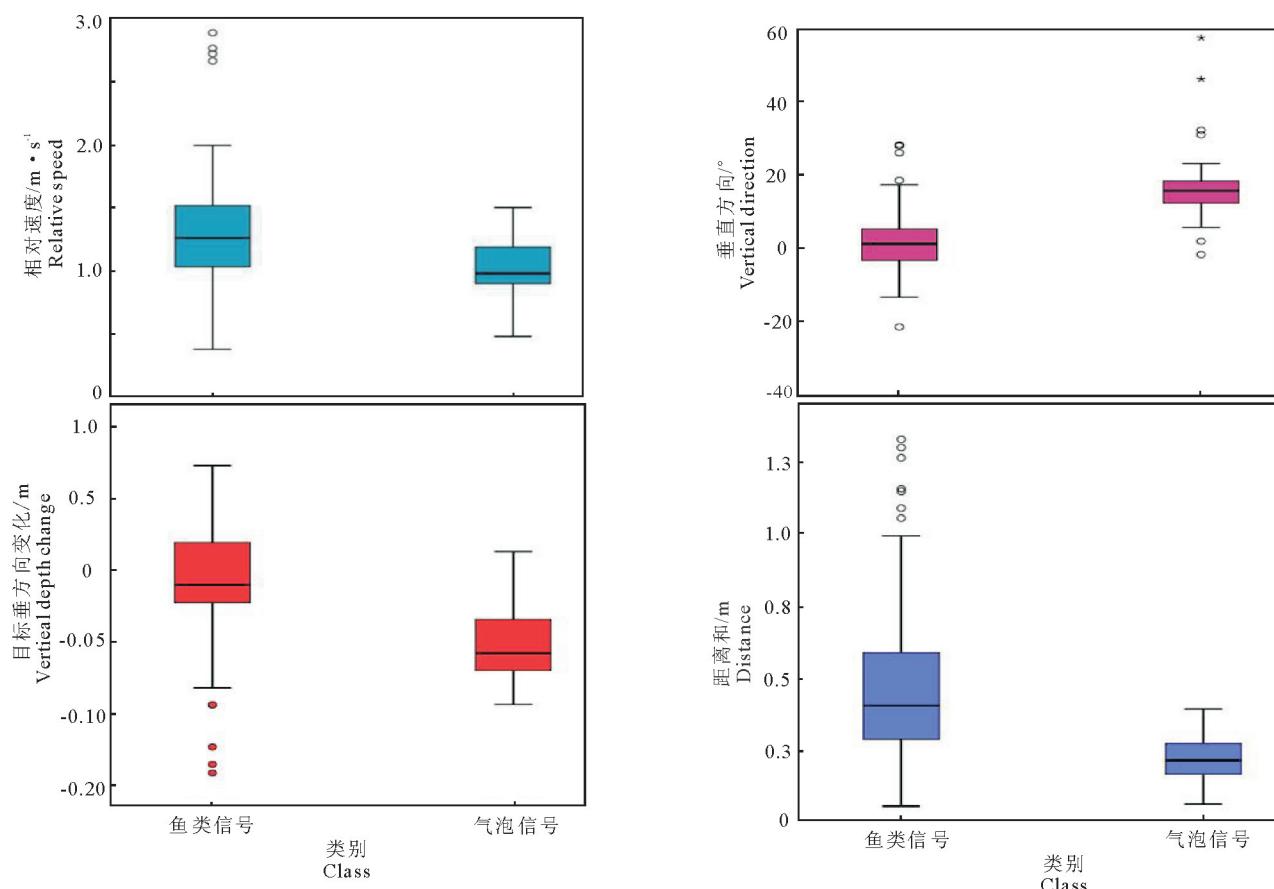


图5 鱼类和气泡信号不同变量的箱形图

Fig.5 Box plots of different parameters used to distinguish fish from bubble signals

CH_4 、 CO_2 因溶解度和液相阻力相对较大,气泡中含有的 CO_2 量较少(杨平和全川,2015)。本研究主要通过声学回波映像来分析气泡特征,并未对其成分进行测定,参考上述资料结果,可认为气泡主要成分一般为 CH_4 。

在本次调查中,共观察到3种气泡类型,对于单体气泡,船速稍快时($>3\text{ km/h}$),气泡特征则与鱼体信号无异;气泡柱和气泡流对船速要求不是很高,由于其散射强度较强,且在回波图中呈现连续串状(图1-a)(DelSontro et al, 2011),不同入射方向的气泡在回波图中显示也不同(图1-c,d)(Veloso et al, 2015)。气泡半径范围为 $0.29\sim 3.02\text{ mm}$,属中等小气泡,气泡在上升过程中半径逐渐减小。与鱼类信号的随机性相比,气泡更具有一定规律性。气泡一直处于上升状态且水平位移较小,因此本研究结果显示鱼类与气泡在相对游泳速度、垂直方向变化、目标轨迹的垂直变化等变量存在显著差异。由于气泡在水平方向移动很少,因此相对游泳速度小于鱼类信号;垂直方向变化主要是用来描述信号的迁移方向($-90, 90$),气泡在上升过程中其倾角一直为

正,而鱼体轨迹则正负皆有;目标轨迹的垂直变化中,气泡为一直上升,因此垂直变化为负,而鱼类目标轨迹是随机的。

3.2 气泡回波映像的主要影响因素

本次调查水域气泡的共振半径为 $0.027\sim 0.055\text{ mm}$,气泡远大于 120 kHz 共振频率气泡半径,对声呐工作不会造成很大影响,表明式①和式②适用于本水体的气泡研究。

气泡在上升过程中,其大小变化主要是由于水压下降及与周围水体进行非对称气体交换时导致体积膨胀/收缩所引起。数值模拟结果显示,气泡生命周期主要取决于其产生的深度、初始尺寸、上升速度、 CH_4 和大气气体浓度、压力及温度等(Leifer & Patro, 2002; Ostrovsky, 2003)。乐昌峡水库 CH_4 气泡属中等小气泡,气泡在上升过程中半径逐渐减小。Ostrovsky(2003)研究表明,体积较小的气泡,其上升时的半径在减小,而大个体气泡情况则相反;Greinert等(2006)研究表明,直径 9 mm 的气泡可以在深海环境中存在 108 min ,上升 $1\ 300\text{ m}$ 左右,在上升过程中半径逐渐减小。大的气泡容易浮起而

消失,小气泡则由于溶解而首先消失,中等气泡存在时间最长,因而相应地有最大的溶度(刘伯胜和雷家煜,2006)。

为验证声学方法评估气泡的有效性,有学者对气泡进行现场实验,证明回波图模式及其线性特征与现场调查结果相似(Polikarpov et al,1989)。在回波图中能否清晰地观察到气泡,取决于船速、影响气泡上升路径的水流、气泡进入波束的方向等(Veloso et al,2015)。利用声学技术进行水体温室气体走航监测时,船速是一个非常重要的因素。研究表明,当船速小于2节时,可显著提高声学数据质量,在回波图上可以清晰地区分出气泡和其他信号,如鱼体、仔鱼、浮游植物、悬浮沉积物(Ostrovsky,2009;Veloso et al,2015)。本研究结果也表明,船速小于3 km/h时,可在回波图中清晰地鉴别出气泡与鱼体。

准确估算气泡的上升速度对于评估气泡通量是非常必要的,气泡的上升速度和高度依赖于气泡大小及气泡的纯度。本研究中,气泡的上升速度为23.17~24.74 cm/s,体积为0.0014~38.7 mL,该结果与Ostrovsky等(2008)的实验结果及Haberman & Morton(1954)的模型结果一致,这也意味着声学技术可用于我国亚热带地区气泡上升速度现场测定、气泡体积预测及气泡释放通量评估。

3.3 气泡产生及其对资源评估的影响

除了热带和亚热带地区,在中国纬度较高的北方地区,水体声学监测中也发现有气泡渗出现象(张赞等,2014)。水库作为温室气体的源,排放大量气泡,大坝下游下泄水中碳的释放问题也值得关注(Guerin et al,2006),且不同季节气泡排放存在显著差异(Kone et al,2010);另外,在风浪的情况下,水中会产生大量的气泡,在水面表层形成一个气泡层,其厚度、层中所含气泡的浓度及层中气泡半径的大小取决于当时的水文条件(刘伯胜和雷家煜,2006)。除了波浪破碎在水中产生气泡外,船只的尾流中也含有大量气泡。

目前声学技术已广泛应用于我国内陆渔业资源调查与评估,由于无法对单体信号进行自动分类,数据解析及分类很大程度上取决于研究者的经验。本研究中,气泡的TS分布范围在-73.82~-33.29 dB(图4),基本覆盖了我国淡水鱼类TS分布区间(武智等,2018;孔德平等,2019)。气泡广泛存在于淡水水库及湖泊中,且具有高度异质性,这意味着在进行渔业资源声学调查中,气泡作为“混响”,很可能被错

判为鱼体信号,尤其是在船速较快时。目前内陆水域渔业资源调查船速均大于3 km/h(中华人民共和国农业农村部,2019),在此船速下,单体气泡与鱼体信号很难分辨。数据处理时会出现信号误判,导致资源评估结果偏大,尤其是在温室气体排放较大的水体;反过来讲,评估鱼类尺寸及资源量的方法同样可以应用于气泡量化研究中,且具有快速、覆盖面广等优势。在不同调查目的下,气泡可能属于“混响”亦或是目标信号(Simmonds & MacLennan,2008)。因此,在利用声学技术进行调查时,根据不同目标提前进行调查设计至关重要。

参考文献

- 程炳红,郝庆菊,江长胜,2012.水库温室气体排放及其影响因素研究进展[J].湿地科学,10(1):121~128.
- 孔德平,秦涛,范亦农,等,2019.邛海鱼类资源与空间分布的水声学调查探究[J].水生态学杂志,40(1):22~29.
- 李哲,张呈,刘靓,等,2014.三峡水库澎溪河CO₂、CH₄气泡释放通量初探[J].湖泊科学,26(5):789~798.
- 刘伯胜,雷家煜,2006.水声学原理[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,196~202.
- 谭细畅,史建全,张宏,等,2009a.EY60回声探测仪在青海湖鱼类资源量评估中的应用[J].湖泊科学,21(6):865~872.
- 谭细畅,李新辉,林建志,等,2009b.基于水声学探测的两个广东鲂产卵群体繁殖生态的差异性[J].生态学报,29(4):1756~1762.
- 汪国骏,胡明春,王雨春,等,2017.蓄水初期三峡水库草堂河水-气界面CO₂和CH₄通量日变化特征及其影响因素[J].湖泊科学,29(3):696~704.
- 王洪君,王为东,卢金伟,等,2006.太湖湖滨带秋、冬季CH₄排放特征及其影响因素初步研究[J].湿地科学,4(1):21~28.
- 武智,李捷,朱书礼,等,2018.基于水声学的北江石角水库鱼类资源季节变动及行为特征研究[J].中国水产科学,25(3):674~681.
- 杨平,全川,何清华,等,2013.闽江口鱼虾混养塘水-气界面温室气体通量及主要影响因子[J].环境科学学报,33(5):1493~1503.
- 杨平,全川,2015.淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素的研究进展[J].生态学报,35(20):6868~6880.
- 喻元秀,刘丛强,汪福顺,等,2008.洪家渡水库溶解二氧化碳分压的时空分布特征及其扩散通量[J].生态学杂志,27(7):1193~1199.
- 中华人民共和国农业农村部,2019. SC/T 9429~2019.淡水渔业资源调查规范:河流[S].北京:中国农业出版社.

- 张贊, 蔣丹清, 汤勇, 等, 2014. 基于声学测量方法的大伙房水库鱼类资源季节变动特征[J]. 南方水产科学, 10(6): 12-19.
- Aglen A, 1983. Random errors of acoustic fish abundance estimates in relation to the survey grid density applied [J]. FAO Fisheries Report-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 300:293-298.
- Anderson M A, Martinez D, 2015. Methane gas in lake bottom sediments quantified using acoustic backscatter strength[J]. Journal of Soils and Sediments, 15(5): 1246-1255.
- DelSontro T, Kunz M J, Kempter T, et al, 2011. Spatial heterogeneity of methane ebullition in a large tropical reservoir[J]. Environmental Science & Technology, 45(23): 9866-9873.
- Diem T, 2008. Methane dynamics in oxic and anoxic aquatic systems[D]: ETH Zurich.
- Fearnside P M, 1995. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of 'greenhouse' gases[J]. Environmental Conservation, 22(1): 7-19.
- Greinert J, Nutzel B, 2004. Hydroacoustic experiments to establish a method for the determination of methane bubble fluxes at cold seeps[J]. Geo-Marine Letters, 24(2): 75-85.
- Greinert J, Artemov Y, Egorov V, et al, 2006. 1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080 m in the Black Sea: Hydroacoustic characteristics and temporal variability[J]. Earth & Planetary Science Letters, 244(1): 1-15.
- Guerin F, Abril G, Richard S, et al, 2006. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers[J]. Geophysical Research Letters, 33(21): 493-495.
- Haberman W L, Morton R K, 1954. An Experimental Study of Bubbles Moving in Liquids[J]. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 121(80): 227-250.
- Jech J, Lawson G, Lavery A, 2017. Wideband (15-260 kHz) acoustic volume backscattering spectra of Northern krill (*Meganyctiphanes norvegica*) and butterfish (*Peprilus triacanthus*)[J]. ICES Journal of Marine Science, 74: 2249-2261.
- Keller M, Stallard R F, 1994. Methane Emission by Bubbling From Gatun Lake, Panama[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 99(D4): 8307-8319.
- Kone Y J M, Abril G, Delille B, et al, 2010. Seasonal variability of methane in the rivers and lagoons of Ivory Coast (West Africa)[J]. Biogeochemistry, 100(1/3): 21-37.
- Leifer I, Patro R K, 2002. The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: A review and sensitivity study[J]. Continental Shelf Research, 22(16): 2409-2428.
- Ostrovsky I, 2003. Methane bubbles in Lake Kinneret: Quantification and temporal and spatial heterogeneity [J]. Limnology and Oceanography, 48(3): 1030-1036.
- Ostrovsky I, McGinnis D F, Lapidus L, et al, 2008. Quantifying gas ebullition with echosounder: the role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake [J]. Limnology and Oceanography-Methods, 6(2): 105-118.
- Ostrovsky I, 2009. Hydroacoustic assessment of fish abundance in the presence of gas bubbles[J]. Limnology and Oceanography-Methods, 7(4): 309-318.
- Polikarpov G G, Egorov V N, Nezhdanov A I, et al, 1989. The phenomenon of active gas escapes from mounts on the slope of the western Black Sea[C]//Dokl Akad Nauk USSR:13-16.
- Sherwood R F, 1985. Methane and chlorocarbons in the earth's atmosphere[J]. Origins of Life and Evolution of Biospheres, 15(4): 279-297.
- Simmonds J, MacLennan D N, 2008. Fisheries acoustics: theory and practice[M]. Oxford: John Wiley & Sons: 294-396.
- Veloso M, Greinert J, Mienert J, et al, 2015. A new methodology for quantifying bubble flow rates in deep water using splitbeam echosounders: Examples from the Arctic offshore NW-Svalbard[J]. Limnology and Oceanography-Methods, 13(6): 267-287.
- Weidner E, Weber T, Mayer L, et al, 2018. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux[J]. Continental Shelf Research, 173:104-115.
- Yang L, Lu F, Wang X, et al, 2013. Spatial and seasonal variability of CO₂ flux at the air-water interface of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Environmental Sciences, 25(11): 2229-2238.
- Yan N, Mukai T, Yamamoto J, et al, 2019. Acoustic characteristics of three bladderless fishes[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 146(4): 2965-2965.
- Zheng H, Zhao X, Zhao T, et al, 2011. Spatial-temporal variations of methane emissions from the Ertan hydroelectric reservoir in southwest China[J]. Hydrological Processes, 25(9): 1391-1396.

Acoustic Signal Features and Recognition of Bubbles in Fresh Water: A Case Study in Lechangxia Reservoir

WU Zhi¹, LI Xin-hui¹, TAN Xi-chang², LI Jie¹, ZHU Shu-li¹, ZHANG Ying-qiu¹

(1. Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of
Fishery Science, Guangzhou 510380, P.R.China;

2. Institute of Pearl River Water Resource Protection, Guangzhou 510611, P.R.China)

Abstract: Substantial quantities of methane (CH_4) can be produced in freshwater lake sediments and it is released as bubbles due to low water solubility. During hydroacoustic surveys, the target strength (TS) of bubbles strongly overlaps with that of fish and the signals can be misclassified during data processing of fishery resource surveys. In this study, Lechangxia reservoir was selected as a case study, and the bubble signals collected during hydroacoustic surveys were analyzed, focusing on signal features, motion rules and signal recognition. The objectives were to provide a reference for acoustic signal recognition and fishery resource assessment as well as for research on tracing and measurement of greenhouse gases released from bottom sediments. Acoustic surveys were conducted in Lechangxia reservoir on July 17 and 18 of 2017 using a Simrad EY60 echo sounder. A 120 kHz split beam downward-looking echosounder was used to collect different signals not resonating with the sonar frequency at different speeds. A slow ship speed ($<3 \text{ km/h}$) significantly enhanced the quality of data and the ability to discriminate between bubbles and fish, based on differences in echogram trajectory. Analysis of the echogram indicated that gas bubbles (majority) and fish (minority) were the two primary echo-reflecting objects in the survey area. Significant differences were observed between fish and bubbles for several parameters: movement speed, vertical direction change and track change with depth ($P < 0.01$). Bubbles were more regular and kept rising with a small horizontal displacement compared with fish. The average ascension speed of bubbles was 23.95 cm/s and the 95% confidence interval was 23.17–24.74 cm/s ($n = 360$). The average TS of the bubbles was -60.09 dB , ranging from -73.82 to -33.29 dB , and the radius ranged from 0.20 mm to 21.65 mm. The speed and radius of the bubbles decreased as bubbles ascended and the correlation with the water depth was significant ($r = 0.99, P < 0.01$). At a cruising speed of $<3 \text{ km/h}$, the bubbles and fish could be recognized clearly from the echogram and used to identify the target signal. Combing the results of our study with those from previous studies, it was concluded that bubbles are highly heterogeneous and exist widely in freshwater reservoirs and lakes, and that surveys should be designed based on the intended purpose when using acoustic technology. Hydroacoustic measurements provide a means of distinguishing the bubbles released in bottom sediments of lakes and reservoirs from fish and this should be considered when quantifying methane ebullition and fish abundance in aquatic systems.

Key words: Lechangxia reservoir; greenhouse gas emission; hydroacoustic signal recognition; bubbles feature