

doi: 10.12131/20190269

文章编号: 2095-0780-(2020)04-0114-07

• 研究简报 •

基于声学标签系统的鱼类运动轨迹监测技术

黄月群^{1,2}, 蔡德所^{1,2,3}, 宋晓红¹, 蒋萍萍¹, 黄寿琨¹

(1. 桂林理工大学/广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 3. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 声学标签监测技术是声波监测技术的一种主动识别方法, 其通过接收、处理移植或捆绑于鱼类身上的声学标签发射的声波信号来获得鱼类二维、三维运动轨迹, 具有原位观察、定位准确、数据处理简单和数据连续性好等优点。文章介绍了声学标签监测技术的组成及工作原理, 并根据异常数据的不同特点总结了一套完整的数据去噪、清洗的处理方法, 该法可快速得到鱼类的二维、三维运动轨迹。通过实例分析了鱼类运动轨迹的分布情况以及变化规律。根据鱼类在不同水生态环境中的运动行为响应情况, 可以直接或间接判断水中污染物或有毒物质对鱼类的潜在影响以及实际毒性, 为渔业养殖水质环境评价、水质监测及预警、水生态健康评价以及水生态修复效果评价的研究提供参考依据。

关键词: 声波监测技术; 声学标签系统; 数据清洗; 运动轨迹

中图分类号: X 835

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on monitoring technology of fish motion trajectories based on Acoustic Tag System

HUANG Yuequn^{1,2}, CAI Desuo^{1,2,3}, SONG Xiaohong¹, JIANG Pingping¹, HUANG Shoukun¹

(1. Guilin University of Technology/Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin 541004, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: Acoustic tag monitoring technology, an active identification method of acoustic detection technology, can obtain 2D and 3D motion trajectories of fish by receiving and processing the acoustic signals emitting from acoustic tags which are transplanted or tied to fish. It has the advantages of *in-situ* observation, accurate positioning, simple data processing and good data continuity. The paper introduces the composition and working principle of acoustic tag monitoring technology. A complete data processing method of denoising and cleaning is proposed according to the different characteristics of abnormal data. With this method, the real-time 2D and 3D motion trajectories can be quickly obtained. The distribution of fish motion trajectories and changing rules are analyzed by an example. According to the behavioral response of fish in different water ecological environments, the potential effects and actual toxicity of pollutants or toxic substances in water can be judged directly or indirectly. It provides the references for water quality assessment in aquaculture, monitoring and early warning of water environment, health evaluation of aquatic ecological, as well as evaluation of aquatic ecological restoration.

Key words: Acoustic monitoring technology; Acoustic Tag System; Data cleaning; Motion trajectories

收稿日期: 2019-12-31; 修回日期: 2020-02-10

资助项目: 广西自然科学基金联合资助培育项目(2019GXNSFAA245058); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA281022)

作者简介: 黄月群(1976—), 女, 博士, 高级实验师, 从事鱼类行为监测技术及水生态评价研究。E-mail: 66295574@qq.com

鱼类运动轨迹监测技术主要有视觉监测技术和声波监测技术。视觉监测技术以视频、图片观察和手工记录为主^[1-7],可以在鱼类不受干扰的情况下较好地对其行为进行观察、记录和分析,但后期数据处理难度较大、误差大且监测数据连续性差。早期的研究主要是对鱼类的行为特征进行观察和描述,基本处于“定性”分析阶段,很难得到鱼类运动行为响应的量化指标。声波监测技术分为被动声学法和主动声学法两种^[8]:被动声学法是通过鱼类发出的声波特征进行探测和识别^[9];主动声学法是通过声波设备接收鱼类的回波信号并进行分析和识别,具有受水域环境影响小、应用范围广泛等优势,是当今国内外研究和应用最为广泛的一种方法^[10]。目前,声波监测技术应用最广泛的有鱼探仪,采用鱼探仪对水域鱼类资源的丰度^[11-16]、时空分布情况^[17-21]和活动规律^[22-23]等方面的研究已取得了很多成果,但该技术仅对鱼群的种类、大小和距离进行探测,无法准确定位到鱼类的位置及其运动轨迹。

声学标签系统 (Acoustic Tag System, ATS) 是声波监测技术的一种被动声学法,根据鱼类个体大小和研究周期选择合适的声学标签 (Acoustic tag, 也称声学信号发射器) 类型和参数对鱼类运动轨迹进行监测^[24],已逐步成为鱼类行为学研究最主要的手段。目前,国外对声学标签系统的应用研究成果主要有鱼类资源的丰度评估^[25]、鱼类的游泳模式^[26]、栖息地特征评价^[27-29]、鱼类的产卵场地^[30]、鱼类的生存情况^[31]、鱼类的行为差异^[32]、鱼类行为模型^[33]等。我国仅有环境变化对鱼类行为的影响^[34-35]和水利工程建设对鱼类洄游能力^[36-37]等相关方向的研究成果报道。

声学标签系统主要用于江河湖库、海洋、大坝、河口海岸、船闸码头等的鱼类运动轨迹监测,并通过鱼类运动行为响应情况评估鱼类的丰度、种群结构、生理行为、迁徙及栖息地变化等,但应用在水生态环境对鱼类行为产生影响等方面的研究成果相对较少。因此,可将声学标签监测技术在鱼类运动行为学的应用与养殖、生态学、声学、数学模型以及计算机仿真技术等学科相结合,进行多学科的交叉利用与研究。

1 声学标签监测技术

1.1 声学标签系统的组成

声学标签系统由硬件和软件 2 个部分组成。硬件部分由声学标签信号接收器、水听器、标签激活器、标签、标签检测器和电脑组成,软件部分包括 Tag Programmer (用于激活及休眠标签)、Acoustic Tag (用于原始数据收集及存储) 和 Mark Tags (用于原始数据文件中的环境噪音和标签回声信息处理) 3 个模块。

1.2 声学标签系统的工作原理

声学标签系统采用 4 个水听器 (Hydrophone, 简称为 H_1 、 H_2 、 H_3 和 H_4) 接收移植或捆绑于鱼类身上的声学标签发射出来的声波,通过数据线传输到信号终端处理器进行信号处理,最后经计算机终端去噪处理后即可得到鱼类的二维、三维行为轨迹坐标。

1.3 声学标签系统的操作方法

声学标签系统的具体操作方法为:

1) 水听器布设。将水听器下端固定于 2 个不同平面 (图 1),并设置水听器底部的三维坐标及相关参数。水听器的坐标可根据监测目的选择大地坐标或相对坐标进行设置。4 个水听器监测的水域范围一般为 0.5 km。如监测范围为河流等线状水域可进行多个水听器线状布设;如监测范围为大水域网可根据水域情况布设多个水听器,最多可布设 16 个,或将水听器固定于监测船进行监测,如果监测船更换位置需要重新设置水听器坐标。

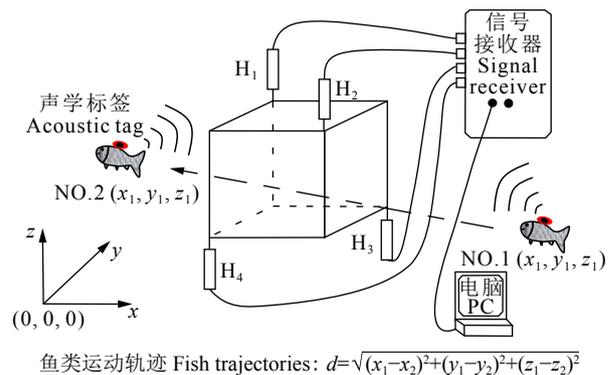


图1 鱼类运动轨迹监测原理

Figure 1 Monitoring principle of fish motion trajectory

2) 采用标签激活器对声学标签进行唯一编码 (即发射频率) 激活,并用标签检测器检测是否激活成功。编码根据声波信号的发射频率进行设置,设置范围一般为 1 000 ~ 6 000 Hz。可根据实际情况需要选择编码大小,如设置的发射频率为 3 000 Hz 即每 3 s 可获得 1 个声波信号,1 个信号代表 1 个轨迹点。每 1 h 为一组数据计,一组数据有 1 200 个轨迹点,一年可监测到的轨迹点约 $1\,051.2 \times 10^4$ 个。

3) 将已激活的声学标签捆绑或移植于试验鱼身上,水听器将接收到声学标签发射出来的声波信号并通过信号线传输至信号处理器,在 PC 终端便可实时监控鱼类的二维、三维运动轨迹 (图 2)。

4) 采用数据处理软件 Mark Tags 模块对采集的原始信号进行去噪处理即可获得鱼类二维、三维运动轨迹坐标。

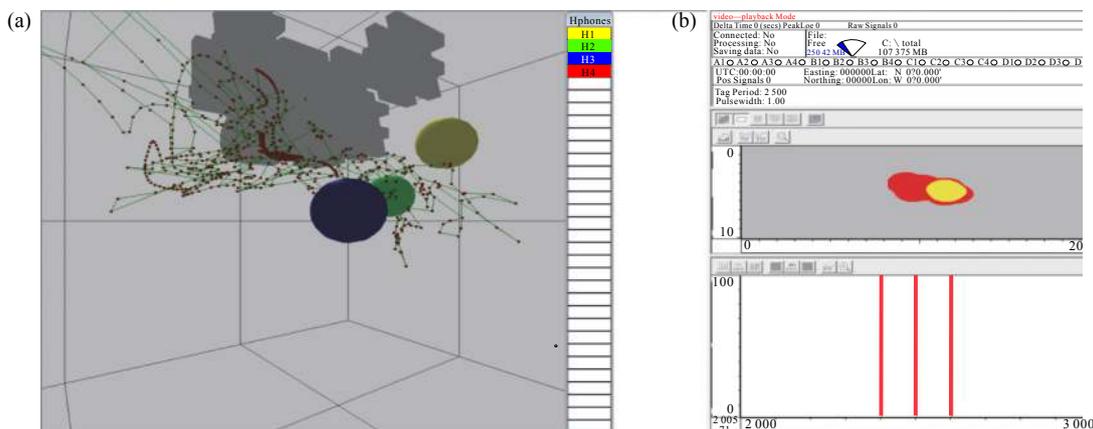


图2 实时监测的鱼类三维 (a)、二维 (b) 运动轨迹

Figure 2 3D (a) and 2D (b) motion trajectories of fish in real-time

2 鱼类运动轨迹数据处理方法

在数据监测过程中，除了接收到这些具有特定发射频率的标签发射的声波信号之外，还会接收到其他噪声的声波信号 (图 3)，或者接收的信号不连续，这些信号数据通常被称为“异常数据”。由于异常数据的存在导致监测到的原始轨迹数据杂乱无序 (图 2)，很难从这些庞大的试验数据中获取隐藏于其中的信息和数据变化规律。如果对这些原始数据直接进行分析，得到的结果将是不准确甚至是错误的。因此，在数据分析，首先要对这些杂乱无序的大数据

进行处理，对原始的运动轨迹数据进行去噪、清洗，转换成简洁、高效的鱼类二维、三维行为轨迹数据 (图 4)，最后加载到数据库中。

监测到的异常数据类型主要有 4 类：噪声值、缺失值、异常值 (离群值) 和重复值。数据清洗过程通常是将重复和多余的数据筛选后清除、将缺失的数据补充完整、将错误的数据纠正或删除，最后整理可用的数据库，为数据挖掘和分析的准确性奠定基础。以下是根据不同异常数据类型采用不同的数据清洗方法。

2.1 噪声值

在采集声学标签声波信号的同时也会接收到其他噪声声波的信号 (图 5)，通过数据处理软件 Mark Tags 模块设置相关的去噪参数，或者添加噪声过滤器即可对采集到的原始信号进行去噪和过滤处理，得到声学标签的声波信号 (图 6)。

2.2 缺失值

缺失值的清洗方法有删除法、均值插补法、热卡填补法、最近距离决定填补法、回归填补法、多重填补方法、K-最近邻法、有序最近邻法和基于贝叶斯的方法等。根据

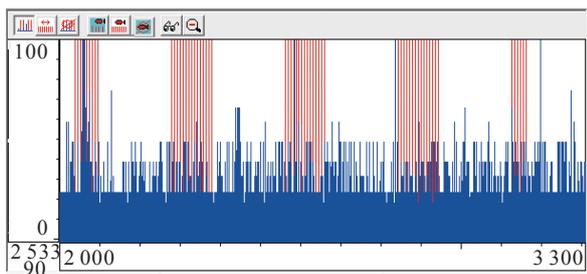


图3 接收到的原始声波信号

Figure 3 Original acoustic signal received

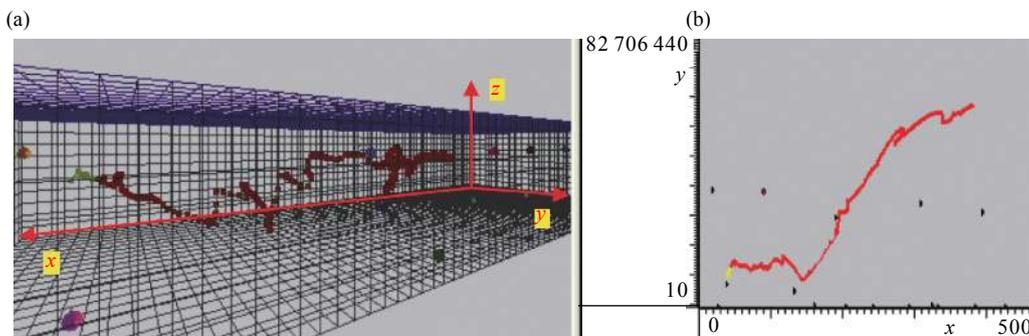


图4 去噪处理后鱼类三维 (a)、二维 (b) 运动轨迹

Figure 4 3D (a) and 2D (b) motion trajectories of fish after denoising

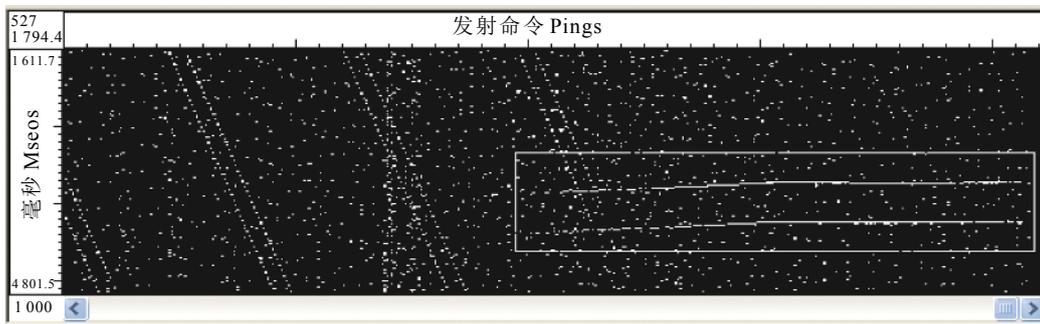


图5 原始信号

Figure 5 Original signals

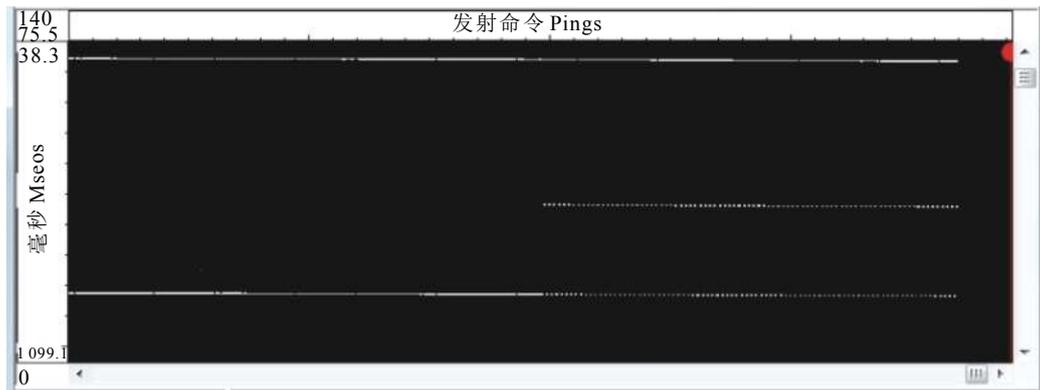


图6 去噪处理后的声学标签信号

Figure 6 Acoustic tag signals after denoising

数据的缺失程度选择不同的清洗方法, 其中删除法方法适用于数据比较多且缺失值的数量占整个数据的比例相对较小的情况, 可以直接将缺失值删除掉, 是一种最简单有效的方法。

在鱼类运动轨迹数据采集过程中, 会出现由于环境客观条件造成信号无法获取而导致轨迹缺失的情况, 可通过均值插补法进行插补(图 7), 但某个时间段的缺失值较多则不再进行插补。如设置的声波信号发射频率为 3 s, 若信号中断时间超过 10 s 时将不再进行插补(图 8)。采用数据处理软件的 Mark Tags 模块过程中即可实现缺失值的自动插补。

2.3 异常值(离群点)

异常值清洗方法主要有统计分析法、3 σ 原则、箱型图分析等, 其中统计分析法是一种常用的简单方法。对数据库进行简单的筛选和统计, 分别对鱼类运动轨迹三维坐标的 x 、 y 、 z 值进行排序, 取数据的最大值和最小值来判断是否超出取值范围, 若超出该范围则作删除处理。鱼类运动轨迹坐标应出现在水域内如 a 点, 如果轨迹点如 b 点出现在水域外则显然不合常理, 此为异常值, b 点坐标应被删除(图 9)。

2.4 重复值

对于数据重复值的判断主要采用排序与合并的方法。重复值的检测方法主要有 2 个步骤: 首先将数据库的数据按一定规律排序, 然后通过比较相邻数据的相似情况来检测数据是否重复。对鱼类的三维运动轨迹重复值进行统计, 通过判断鱼类在某处的重现性来获得鱼类的运动行为规律以及对栖息场所的偏好等信息。

要从这些庞大的数据中获得鱼类重现频率较高的轨迹坐标, 需要采用数据查询语言对数据进行查询以获取有用的数据信息。数据查询语言 Frequency 函数是统计各区间段数值频率的一个函数, 其结构为 Frequency(Data_array 和 bins_array), 其中 Data_array 是用于判断的数组或者数据区域, 而 bins_array 是用于输出结果数据的分割点。其查询步骤为: 输入函数 Frequency→设定参数 data_array 和 bins_array→选择输出结果的单元格区域→按 F2 键输入函数公式→按“Ctrl+Shift+Enter”可返回一个数组。

为获得鱼类的运动轨迹分布情况, 可将轨迹坐标分别投影在 xy 平面和 xz 平面上即可得到轨迹散点图。散点图在大数据分析中的作用尤为明显, 其可以展示数据的分布和聚合情况。通过散点图中散点的疏密程度和变化趋势来

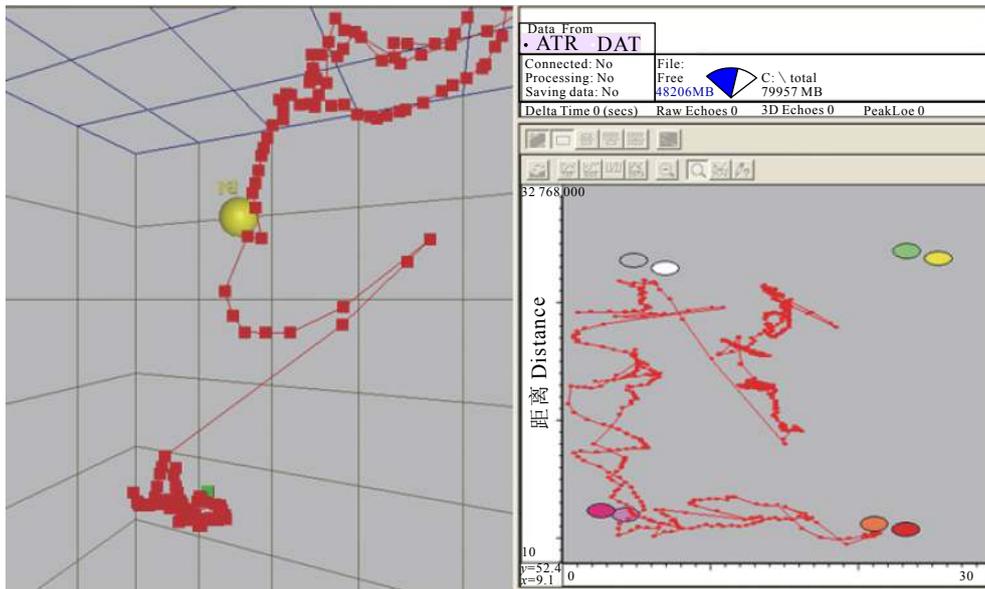


图7 对缺失值进行均值插补后鱼类运动轨迹

Figure 7 Fish trajectories after mean interpolation of missing values



图8 鱼类运动轨迹缺失值插补

Figure 8 Interpolation of missing values of fish trajectories

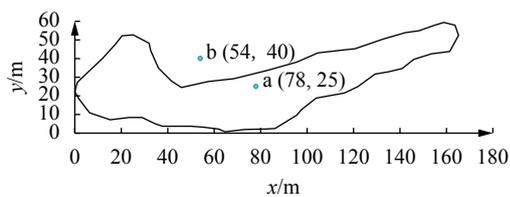


图9 鱼类运动轨迹点的正常值和异常值

Figure 9 Normal and abnormal value of fish motion trajectories

获得鱼类运动行为规律，轨迹越密集说明鱼类出现的频率越高。

3 声学标签系统的应用实例

实测水域为某高校校园的景观湖，水域面积为 $5.3 \times 10^3 \text{ m}^2$ ，水深为 1.6~2.5 m，湖内修建有景观亭 (图 10)。湖内水源的主要补给来源为天然降水和校内污水处理站的中水补给，湖中有鲤 (*Cyprinus carpio*)、鲫 (*Carassius auratus*) 等湖泊常见鱼种。景观湖为封闭水域，自净能力较差，水



图10 水域概况

Figure 10 Waters overview

中的氮 (N)、磷 (P) 营养元素长期积累容易导致水体的富营养化，尤其是在夏季，气温高容易导致水质恶化，严重影响景观湖的生态功能和景观效果。

由于春、夏季水域生态环境变化较大，因此对鱼类在春、夏季的运动行为轨迹进行了监测。发现春、夏两季鱼类的运动轨迹变化明显 (图 11, 图 12): 春季到夏季，在水平方向上鱼类离污染源的的距离越大，垂直方向上鱼类由底层往表层迁移。引起鱼类运动行为发生变化的主要原因除了水温外，还与水中溶解氧 (Dissolved oxygen, DO) 含量和藻类死亡释放的毒素如微囊藻毒素的分布有关。夏季水温高，日照充足，加上 N、P 营养物质的不断输入，湖内藻类及其他浮游生物迅速繁殖并消耗水中大量的氧气 (O_2) 导致水中 DO 含量不断下降，且得不到及时补充，致使 O_2 收支不平衡，藻类死亡并释放衍生污染物。说明鱼类运动行为发生改变主要与水环境因子有关，通过评价鱼类运动行

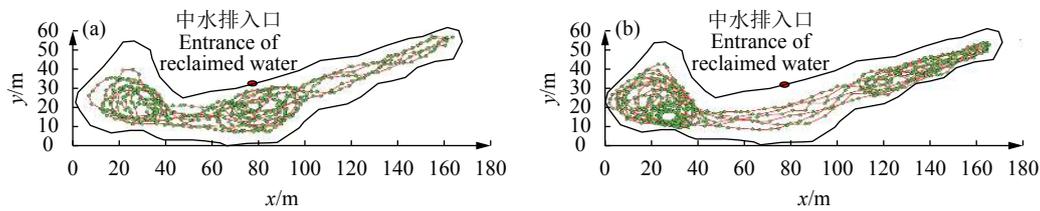


图11 春季 (a) 和夏季 (b) 鱼类运动轨迹在水平面的分布情况

Figure 11 Distribution of fish motion trajectories in horizontal direction in spring (a) and summer (b)

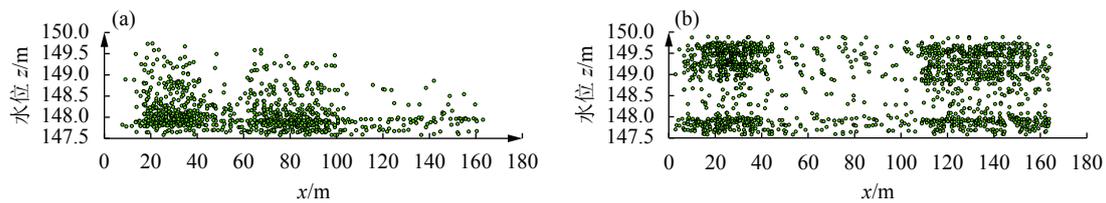


图12 春季 (a) 和夏季 (b) 鱼类运动轨迹在水深方向的分布情况

Figure 12 Distribution of fish motion trajectories in vertical direction in spring (a) and summer (b)

为与水环境因子的相关性, 可为养殖水质及水生态健康评价等提供参考依据。

4 应用前景

目前, 鱼类声学标签监测技术多应用于江河湖库和海洋等鱼类丰度、种群结构等方面的研究。采用该技术对自然水域环境中鱼类的运动行为轨迹进行实时监测, 可为研究水利工程建设对鱼类洄游能力、产卵以及栖息地的影响, 鱼类在生境变化过程的行为响应, 鱼类毒理性行为响应, 鱼类行为水质监测系统建设, 水生态环境健康评价以及水生态修复效果评价等提供科学的依据, 是一种实时有效、快速的先进技术。

此外, 根据鱼类对不同养殖水质环境的行为响应可为水产养殖提供重要的指导信息^[38-39]。目前, 该声学标签监测技术在水产养殖业的应用较少, 具有广泛的应用前景。如通过研究鱼类的运动轨迹变化规律, 掌握鱼类的栖息场所, 指导人工繁殖和幼鱼培育, 可以提高幼鱼的成活率和质量; 此外, 鱼食投放和污染物的排入会引起水质的改变, 鱼类如果表现出逃避行为, 且大多数都集中在洁净水的一端, 表明水质遭受到污染。因此, 通过连续测定鱼类的运动轨迹, 对比鱼类当前运动轨迹与历史运动轨迹的变化, 可实现渔业养殖水质环境的实时在线监测和预警, 为提高水产养殖的产量和质量提供可靠的科学依据。

利用声学标签监测技术对鱼类运动行为轨迹进行 24 h 监测, 获得鱼类的实时三维运动轨迹坐标并进行相关的数据分析及应用, 是一种先进的技术手段。与其他监测技术相比, 声学标签监测技术具有原位观察、数据处理方法简

单、可 24 h 实时监控鱼类的二维、三维运动轨迹等优势。但该技术是通过接收鱼类身上声学标签发送的声波信号来确定鱼类的位置, 在数据监测过程中可能会出现鱼类死亡、声学标签丢失和标签电量不足等情况, 因此需要技术人员及时对监测数据进行实时监控和数据处理分析, 以保证监测数据的连续性和准确性。

参考文献:

- [1] KANG I J, MOROISHI J, NAKAMURA A, et al. Biological monitoring for detection of toxic chemicals in water by the swimming behavior of small freshwater fish[J]. J Fac Agr Kyushu U, 2009, 54(1): 209-214.
- [2] 王丽娜, 方景龙. 基于视频理解的活体鱼水质监测实验 [J]. 杭州电子科技大学学报, 2010, 30(6): 36-38.
- [3] 徐盼麟, 韩军. 基于视频的水箱内鱼类运动行为观测系统 [J]. 湖南农业科学, 2011(19): 140-142.
- [4] 江丹丹, 桂福坤. 基于视频图像的鱼类运动行为轨迹追踪 [J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2015, 34(2): 112-118.
- [5] 范伟康. 基于鱼群行为分析的水质监测系统研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015: 13-14.
- [6] 余祥瑞. 基于双摄像机视频的生物水质预警系统的研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2017: 5-6.
- [7] 颜鹏东, 谭均军, 高柱, 等. 基于视频跟踪的竖缝式鱼道内鱼类运动行为分析 [J]. 水生生物学报, 2018, 42(2): 250-254.
- [8] 于铭, 杨士莪. 被动式渔探仪开发设计与试验研究 [J]. 应用声学, 2007, 26(4): 231-238.
- [9] 于铭, 杨士莪, 牟冬英. 被动式渔探仪的信号检测与方位估计 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(1): 147-151.
- [10] STANTON, TIMOTHY K. 30 years of advances in active bioacoustics: a personal perspective[J]. Meth Oceanogr, 2012,

- s1/2: 49-77.
- [11] GODLEWSKA M, SWIERZOWSKI A. Hydroacoustical parameters of fish in reservoirs with contrasting levels of eutrophication[J]. *Aquat Living Resour*, 2003, 16(3): 167-173.
- [12] EVERSON I, TAABU M A, KAYANDA R. Acoustic estimates of commercial fish species in Lake Victoria: moving towards ecosystem-based fisheries management[J]. *Fish Res*, 2013, 139: 65-75.
- [13] 武智, 谭细畅, 李新辉, 等. 珠江首次禁渔西江段鱼类资源声学跟踪监测分析[J]. *南方水产科学*, 2014, 10(3): 24-28.
- [14] 武智, 李新辉, 李捷, 等. 红水河岩滩水库鱼类资源声学评估[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(3): 20-25.
- [15] SZCZUCKA J, HOPPE T, SCHMIDT B, et al. Acoustical estimation of fish distribution and abundance in two Spitsbergen fjords[J]. *Oceanologia*, 2017, 59(4): 585-591.
- [16] 张翔, 沈蔚, 童剑锋, 等. 基于 DIDSON 双频识别声纳技术的青草沙水库鱼类资源量评估[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(4): 561-569.
- [17] CONTI S G, MAURER B D, ROUX P, et al. Acoustical monitoring of fish behavior in a tank[J]. *J Acoust Soc Am*, 2004, 116(4): 2489-2489.
- [18] 张赞, 蔺丹清, 汤勇, 等. 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*, 2014, 10(6): 12-19.
- [19] 孙明波, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等. 基于水声学方法的天目湖鱼类季节和昼夜空间分布研究[J]. *生态学报*, 2015, 23(9): 5597-5605.
- [20] 连玉喜, 叶少文, 黄耿, 等. 三峡库区香溪河鱼类资源水声学探测效果的昼夜差异研究[J]. *水生生物学报*, 2015, 39(5): 1041-1045.
- [21] 李斌, 陈国宝, 于杰, 等. 海南陵水湾口海域不同季节鱼类资源声学探查[J]. *水产学报*, 2018, 42(4): 544-555.
- [22] 郭杰. 航道整治透水框架群对鱼类集群影响的水声学探测[J]. *水生生态学杂志*, 2015, 36(5): 29-35.
- [23] 马燕芹, 司纪锋. 基于水声技术的黄海近海鱼类活动定点监测研究[J]. *渔业现代化*, 2016, 43(4): 70-75.
- [24] EHRENBERG J E, STEIG T W. A study of the relationship between tag-signal characteristics and achievable performances in acoustic fish-tag studies[J]. *ICES J Mar Sci*, 2009, 66(6): 1278-1283.
- [25] 王志超, 陈国宝, 曾雷. 基于声学标志和无线跟踪方法的鱼类行为研究[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(2): 51-59.
- [26] STEIG T W, TIMKO M A. Innovative techniques for analyzing the three-dimensional behavioral results from acoustically tagged fish[J]. *J Acoust Soc Am*, 2005, 117(4): 2367-2367.
- [27] SEMMENS B X. Acoustically derived fine-scale behaviors of juvenile Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) associated with intertidal benthic habitats in an estuary[J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 2008, 65(9): 2053-2062.
- [28] SKALSKI J R, STEIG T W, HEMSTROM S L. Assessing compliance with fish survival standards: a case study at Rock Island dam, Washington[J]. *Environ Sci Policy*, 2012, 18: 45-51.
- [29] 李荣辉. 鱼类栖息迁徙习性及其监测技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013: 75-94.
- [30] ABAID N, PORFIRI M. Collective behavior of fish shoals in one-dimensional annular domains[C]. *Riverside: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010 American Control Conference, Riverside: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010: 63-68.*
- [31] SCHULTZ A A, KUMAGAI K K, BRIDGES B B. Methods to evaluate gut evacuation rates and predation using acoustic telemetry in the tracy fish collection facility primary channel[J]. *Anim Biotel*, 2015, 3(1): 1-9.
- [32] HOLLO T, WATSON B M, JOHNSTON S V, et al. Behaviour of growth hormone transgenic coho salmon *Oncorhynchus kisutch* in marine mesocosms assessed by acoustic tag telemetry[J]. *J Fish Biol*, 2017, 90(4): 1660-1667.
- [33] ROMINE J G, PERRY R W, JOHNSTON S V, et al. Identifying when tagged fishes have been consumed by piscivorous predators: application of multivariate mixture models to movement parameters of telemetered fishes[J]. *Anim Biotel*, 2014, 2(1): 3.
- [34] 黄月群, 蔡德所, 李明泉, 等. 大坝泄水对鱼类洄游能力的影响研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(8): 74-80.
- [35] CAI D S, LI R H. Research on fish habitat based on acoustic fish tracking system[J]. *JCIT*, 2012, 7(23): 195-201.
- [36] HUANG Y Q, CAI D S, LI M Q, et al. Influence of changes in dissolved oxygen content on fish behavioral trajectories during water eutrophication[J]. *Appl Ecol Env Res*, 2018, 17(1): 653-666.
- [37] 赵方旭. 不同水力条件下鱼类运动行为轨迹特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016: 48-55.
- [38] KRISTIANSEN T S, FEMO A, HOLM J C, et al. Swimming behavior as an indicator of low growth rate and impaired welfare in Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.) reared at three stocking densities[J]. *Aquaculture*, 2004, 230(1/2/3/4): 137-151.
- [39] MCFARLANE W J, CUBITT K F, WILLIAMS H, et al. Can feeding status and stress level be assessed by analyzing patterns of muscle activity in free swimming rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum)[J]. *Aquaculture*, 2004, 239(4): 467-484.