



运用超声波标志法分析水槽养殖条件下大黄鱼行为特性

宋 炜^{1,2}, 殷雷明³, 陈雪忠¹, 王 磊¹, 刘永利¹,
王永进¹, 马凌波¹, 王鲁民^{1*}

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266237;

3. 大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为了解养殖大黄鱼的行为特征, 于2018年8月27日至28日利用超声波标志法, 对4尾大黄鱼使用体内植入法进行24 h行为跟踪, 获得了水槽中养殖大黄鱼昼夜垂直运动深度及水平位置数据。结果显示: ① 垂直运动, 实验鱼在不同时间段的平均运动深度依次为(0.89±0.51) m (18:00—24:00)、(0.73±0.50) m (次日0:00—6:00)、(1.04±0.50) m (次日6:00—12:00)、(1.00±0.45) m (次日12:00—18:00), 总体活跃深度为0.50~1.25 m; ② 水平运动, 根据水槽水平区域划分可知, 实验鱼在水槽壁周围出现的次数约(159.0±9.5)次, 占总体数据约27%, 非绕壁运动区域出现次数约(489.0±12.5)次, 占总体数据约73%, 说明实验鱼主要集中于水槽内部进行无规则运动, 偶尔出现绕壁运动。本实验首次运用超声波标志跟踪法研究了水槽养殖条件下大黄鱼的行为特性, 旨在为分析养殖大黄鱼运动行为和活动状态提供理论依据和数据支持。

关键词: 大黄鱼; 超声波标志; 水槽实验; 行为

中图分类号: S 965.3

文献标志码: A

大黄鱼(*Larimichthys crocea*)为中国重要海水经济鱼类, 主要养殖产地分布于福建、广东和浙江等, 具有较高的经济价值和文化价值^[1]。大黄鱼的主要养殖方式为传统普通网箱养殖、大型深水抗风浪网箱养殖、工程化围栏放养等^[2]。目前关于大黄鱼行为学监控技术主要包括被动声学技术^[3]、多波束声学探测技术^[4]及计算机视觉技术^[5]等, 而使用超声波标志技术研究大黄鱼水槽内空间运动行为(运动轨迹、速度)特征, 未见报道。

超声波标记技术是目前广泛应用于水下生物行为学研究的电子标记遥测技术, 20世纪50年代中期, 国外生态研究工作者使用该方法应用于研究自然环境中水下生物的个体行为和分布。目前, 我国关于超声波标记的研究较少, 应用

范围也相对有限。危起伟等^[6]使用超声波遥测技术研究长江中华鲟(*Acipenser sinensis*)在葛洲坝下江段的位置分布, 以实现中华鲟鱼类资源的保护。王志超等^[7]则研究紫红笛鲷(*Lutjanus argentimaculatus*)和黑鲷(*Sparus macrocephalus*)在湾口海域的分布, 从而实现对增殖放流和海洋牧场建设效果方面的评估。随着工业化循环水养殖的发展, 养殖小水体环境下的鱼类行为学研究受到广泛关注, 郭禹等^[8]在实验室条件下使用小型声学标记研究了花尾胡椒鲷(*Plectorhinchus cinctus*)昼夜活动轨迹和行为分布规律, 为小型超声波标志应用于鱼体跟踪研究奠定了基础。本实验基于超声波标志跟踪法研究了水槽养殖大黄鱼的行为特性, 通过对大黄鱼运动深度及位

收稿日期: 2018-12-17 修回日期: 2019-03-22

资助项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2017HY-ZD0606); 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0303-4); 现代农业产业技术体系专项(CARS-47-G25)

通信作者: 王鲁民, E-mail: lmwang@ecsf.ac.cn

置跟踪测量, 计算出大黄鱼的游泳距离变化, 其研究结果可为今后浅海围栏放养大黄鱼的行为监控和养殖管理提供可行的理论依据和数据支持。

1 材料与方 法

1.1 实验槽及实验鱼

本实验于2018年8月27日至28日, 在福建宁德大黄鱼某养殖基地进行, 养殖水槽长×宽×深规格约8.7 m×8.2 m×1.9 m。随机选取4尾生长状态良好, 体表无损伤, 体长为(30.50±1.25) cm, 体质量为(460.50±15.56) g的大黄鱼作为实验鱼。参照Moore等^[9]的方法, 手术前在水桶内加入丁香酚[2-甲氧基-4-(2-丙烯基)苯酚]麻醉剂对实验鱼进行麻醉, 使用手术刀在实验鱼腹部泄殖孔前端约1~2 cm切开一个长约2 cm的切口, 将消毒后的超声波发射器从切口中植入, 而后使用皮肤缝合器对实验鱼伤口进行缝合消毒, 最后放入水槽, 进行24 h昼夜跟踪。为了研究大黄鱼在养殖水槽的昼夜运动规律, 实验结果分为18:00—24:00、次日0:00—6:00、次日6:00—12:00、以及次日12:00—18:00几个时间段进行分析。

为进一步分析实验鱼在水槽中的运动规律, 将水槽垂直和水平区域进行划分。其中, 定义水下深度1.2~1.8 m为底层, 0.6~1.2 m为中水层, 0.0~0.6 m为表层; 同时, 实验鱼出现绕壁运动的位置定义为B区, 非绕壁运动位置定义为A区(以4个接收机水下位置作为参考点)(图1)。

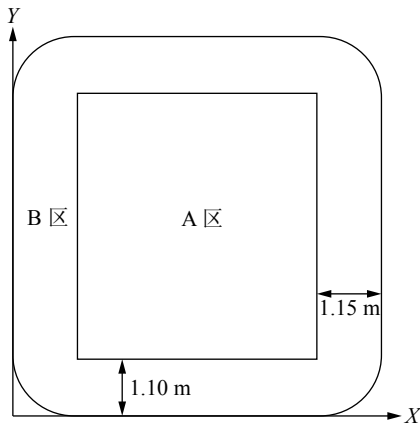


图1 水平分布分区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal distribution

1.2 超声波标志跟踪系统

采用有线式4信道超声波标志跟踪系统(FRX-

<http://www.sxuebao.cn>

4002型, FUSION, 日本)对实验鱼进行跟踪。超声波标志使用同一公司的FPX-1030型自带压力(深度)传感器小型标志, 发射频率为60 kHz, 外观尺寸长约35 mm, 直径约为10 mm(图2), 声源级155 dB, 电池寿命在1 s发射间隔时为2 d。使用31 bit的M序列伪随机编码对发射声波进行相位调制编码, 设置发射周期发射声波, 编码信号通过接收机匹配滤波后识别, 最多可同时跟踪24个目标, 标志发射脉冲声波间隔可以使用磁铁开关计数调整, 本次实验设置的脉冲发射间隔为1 s。

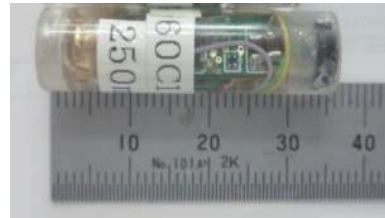


图2 FPX-1030型60 kHz超声波标志

Fig. 2 FPX-1030 type of ultrasonic Pinger with 60 kHz

标志跟踪接收单元包括由4个水听器组成的阵列和接收器(图3), 水听器通过数据线与接收器连接, 再通过USB数据线将接收器和笔记本电脑连接, 接收器通过专用软件实时接收来自4个水听器的数据, 并以.CSV文件格式储存在电脑中, 数据文件按每小时自动分割。本次实验将4个水听器放置在选定区域4个角的水下1.8 m处, 组成矩形阵列, 阵列长为8.70 m, 宽为8.20 m。

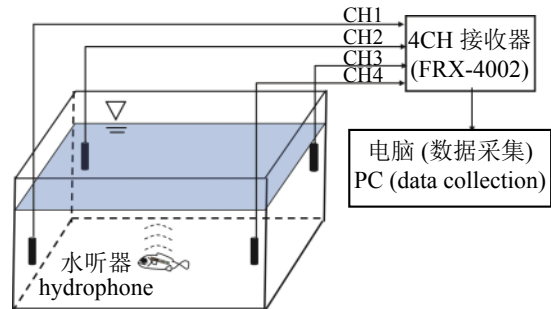


图3 FRX-4002型有线式(4信道)超声波标志跟踪系统示意图

Fig. 3 FRX-4002 type of ultrasonic Pinger tracking system (4 channels)

1.3 数据分析

实验鱼的深度信息由标志自带压力(深度)传感器测得, 并通过双脉冲方式发射给接收系统。

深度(d)的模型计算公式:

$$d = a(t - b) \tag{1}$$

式中, a 、 b 为压力传感器的深度模型拟合系数, 由厂家实际进行的压力测定结果给出, t 为数据文件中实测双脉冲之间的时间间隔。

水平位置是根据长基线测位法(long base line, LBL)结合最小二乘法计算测得, 利用同一时刻超声波标志发射的声波脉冲信号到达4个水听器的时间差来计算, 并使用SPSS 20对实验鱼在指定区域出现频率进行显著性分析。

2 结果

2.1 实验鱼的垂直运动行为

经过24 h养殖水槽大黄鱼行为跟踪实验, 获取大黄鱼垂直运动数据。通过外科手术植入信标志的大黄鱼放入养殖水槽以后, 均表现出反复且较大幅度的上浮、下潜行为。

跟踪的实验鱼在植入标志后2 h左右逐渐趋于稳定, 但是活动较少, 下潜幅度及频率逐渐降低, 且长时间稳定在水下0.50~1.25 m; 次日早晨6点以后再次出现大幅度的上下浮动运动。随后, 实验鱼活动趋于分散, 活跃于不同的水层, 无明显的规律(图4)。

本次24 h跟踪实验期间, 大黄鱼的垂直运动结果如图5所示。4尾实验鱼在不同时间段的平均运动深度依次为(0.89±0.51) m、(0.73±0.50) m、(1.04±0.50) m、(1.00±0.45) m, 总体活跃深度为0.50~1.25 m。针对4尾实验鱼分布频率进行数据统计, 18:00—24:00, 实验鱼在各个水层均有活动, 平均运动深度为(0.89±0.51) m, 此时最小深度为0.03 m(浮于水面), 最大深度为1.79 m(沉底); 次日0:00—6:00, 实验鱼主要在表层游动, 出现频率约49%, 平均深度为(0.73±0.50) m, 最小深度为0.02 m(浮于水面), 最大深度为1.76 m(沉底); 6:00—12:00, 实验鱼主要在底层游动, 出现频率约43%, 平均深度为(1.04±0.50) m, 最小深度为0.03 m(浮于水面), 最大深度为1.79 m(沉底); 12:00—18:00, 实验鱼集中在中水层游动, 出现频率为42%, 平均深度为(1.00±0.45) m, 最小深度为0.04 m(浮于水面), 最大深度为1.79 m(沉底)。从24 h的垂直分布分析, 水槽养殖大黄鱼的活动范围较广, 但是总体趋向

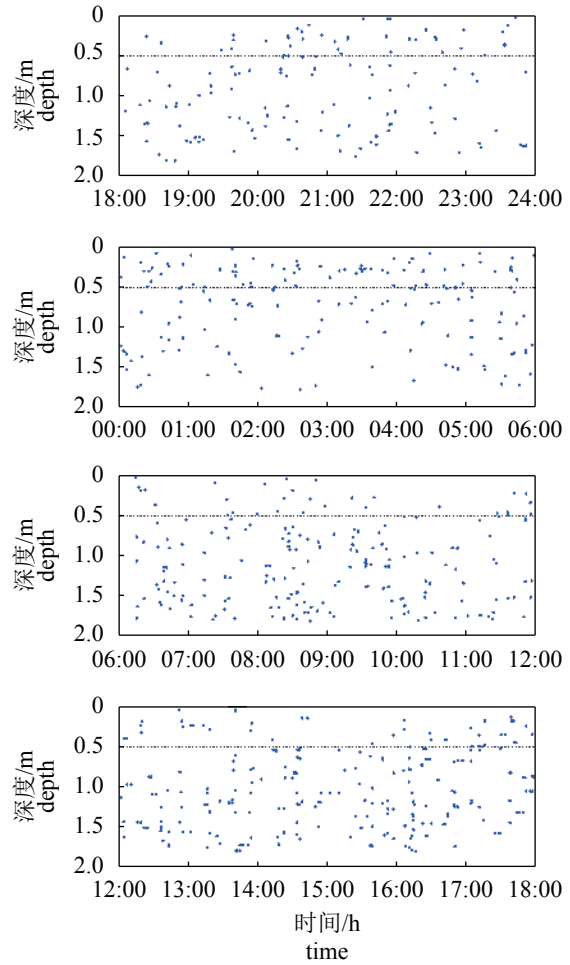


图4 1尾实验鱼24 h垂直运动轨迹示意图

Fig. 4 Scheme of implanted group in 24 h for vertical movement trace of one test fish

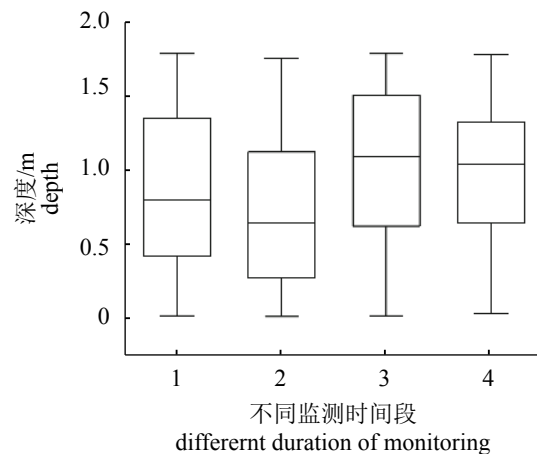


图5 4尾大黄鱼24 h垂直运动平均深度结果

Fig. 5 Results of vertical movement depths of four *L. crocea* for 24 h on average

1. 18:00—24:00, 2. 0:00—6:00, 3. 6:00—12:00, 4. 12:00—18:00

于在中水层活动。

2.2 实验鱼的水平运动行为

实验鱼水平位置数据通过计算机处理后，统计分析跟踪期间的位置数据，图中散点的密集程度反映被标记实验鱼的出现密度，越密集的位置表示实验鱼出现的频率越高。

从水平位置散点分布可以看出，实验鱼在水槽中长时间无规则游动，偶尔出现绕壁运动。针对实验鱼在划定区域内的出现频率进行统计分析，结果表明在24 h的监测过程中，实验鱼出现在A区的位置次数为(489.0±12.5)次，约73%；出现在B区的位置次数为(159.0±9.5)次，约27%，实验鱼在A区出现频率极显著大于B区(P<0.01)，说明实验鱼主要集中于水槽内部进行无规则运动，偶尔出现绕壁运动(图6)。

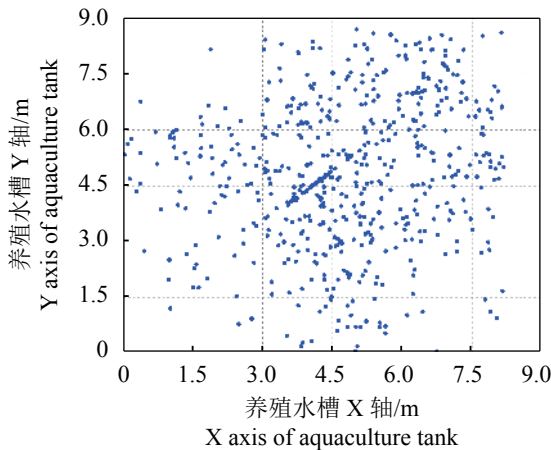


图6 大黄鱼水平分布示意图

Fig. 6 Diagram of horizontal distribution patterns of *L. crocea*

3 讨论

3.1 超声波标志植入手术对鱼类行为的影响

由本次实验结果可知，实验水槽养殖大黄鱼主要栖息在1 m深度附近的水层，从24 h的分布情况分析，实验鱼在手术植入放入养殖水槽后，没有明显的游动行为，多栖息在0.50~1.25 m的水层，从水平位置分布分析，标记后的实验鱼主要沿养殖水槽环壁巡游，分布点位置较少，游泳速度较低。在标记后的2 h，行为逐渐恢复，从垂直方向上进行随机移动，水平方向上逐渐向水槽中心巡游。俞立雄等^[10]实验证明，草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)在超声波标记后的2 h内，临界游泳速度极显著降低(P<0.01)。这个结果也证明了标记后2 h内分布位置无明显游动的原因。因此，超声波标记的实验鱼在实验过程中应考虑暂养一段时间，使其恢复到正常临界游泳速度状态的行为水平后再进行释放。

3.2 鱼类行为研究方法的比较

养殖水体环境因子的改变会导致鱼类的行为变化^[11]，通过对鱼类的行为进行监测能够发现鱼类的异常行为，从而进行及时补救，降低经济损失。传统上，鱼类行为学研究的方法为现场观察法、渔获实验法、水槽实验法和数学模拟法^[12]。但是这些研究方法往往受限于环境因素如季节、水体浑浊情况等并且由于观察者的差异性，观察结果带有一定的主观性^[13]。随着科学技术的发展，目前鱼类行为学主要研究方法包括被动声学技术^[3]、多波束声学探测技术^[4]、计算机视觉技术^[5]以及超声波标志技术^[14]等，其优缺点比较见表1。

表1 几种鱼类行为监控方法比较

Tab. 1 Comparison of different methods in fish behavior monitoring

| 鱼类行为监控方法 monitoring method of fish behavior | 原理 principle | 优点 advantage | 缺点 disadvantage |
|--|----------------------------|-------------------------------------|---|
| 计算机视觉 computer vision | 图像主成份分析法 | 效果直观 ^[15] | 易受水体浑浊度、辉度、对比度等影响 |
| 被动声学 passive acoustics | 利用生物噪声(鱼类发声、摄食噪声、游泳噪声等) | 适用于复杂水体，可判断鱼类特定行为状态 ^[16] | 易受环境噪声影响 |
| 超声波标志 ultrasound marking | LBL、SBL、SSBL目标信号接收时间差、相位差等 | 适用于各种复杂水体、各种体形鱼类 | 易受标志植入微创手术影响(熟练度、缝合方法等) ^[17] |

3.3 超声波标记法在渔业中的应用

目前，超声波标记已运用于软骨鱼^[18]、硬骨鱼^[19]等水生生物的研究，相比国外开展的研究，我国相关研究起步较晚。郭禹等^[8]通过超声

波标记，在实验室水池条件下研究了花尾胡椒鲷昼夜活动轨迹，其研究结果可为花尾胡椒鲷的增殖放流提供技术支撑。而在大型深海网箱中，也可应用超声波标记来实现对鱼群行为的监控从而实现精准投喂^[20]。同时，在海洋牧场的

人工鱼礁投放中, 利用超声波标记可以监测鱼群在鱼礁处的聚集效果而对海洋牧场功能进行评价。此外, 在捕捞网具的改良方面, Miyamoto等^[21]还运用超声波标记研究金枪鱼(*Thunnus thynnus*)延绳钓钩在作业过程中的捕捞位置, 以应对金枪鱼的行为特性进行网具的优化和调整, 实现捕捞效益的最大化。

综上所述, 超声波标记法在水生动物的研究中具有很大潜力, 希望在未来的鱼类行为学研究工作中, 通过超声波标记能够还原更多鱼类在自然状态下的行为轨迹、昼夜分布以及环境胁迫产生的行为影响, 为我国不同水域鱼类行为学研究, 如复杂小水体环境、深海网箱、浅海围栏等, 提供可行的鱼类行为监控方法以及数据支持。

参考文献:

- [1] 陈飞. 浙江大黄鱼养殖产业化发展研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2011.
Chen F. Research on industrialization development of large yellow croaker's cultivation in Zhejiang[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2011(in Chinese).
- [2] 钟爱华, 储张杰, 戴露怡, 等. 3种养殖模式下大黄鱼肌肉营养成分比较及品质评价[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(20): 6629-6631, 6649.
Zhong A H, Chu Z J, Dai L Y, et al. Evaluation of nutrient components and nutritive quality of muscle of big yellow croaker (*Larimichthys crocea*) in different aquaculture model[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(20): 6629-6631, 6649(in Chinese).
- [3] 殷雷明, 黄洪亮, 张旭光, 等. 网箱养殖大黄鱼水下声音与行为反应[J]. *海洋渔业*, 2017, 39(1): 92-99.
Yin L M, Huang H L, Zhang X G, et al. Underwater sound and behavior response of *Larimichthys crocea* in cage-culture[J]. *Marine Fisheries*, 2017, 39(1): 92-99(in Chinese).
- [4] 汤涛林, 李娇, 倪汉华, 等. 多波束深水网箱声学监测仪的研究[J]. *海洋渔业*, 2009, 31(3): 330-334.
Tang T L, Li J, Ni H H, et al. Study on multi-beam acoustic monitor for deep water cages[J]. *Marine Fisheries*, 2009, 31(3): 330-334(in Chinese).
- [5] 卢焕达, 刘鹰, 范良忠. 基于计算机视觉的鱼类行为自动监测系统设计与实现[J]. *渔业现代化*, 2011, 38(1): 19-23.
Lu H D, Liu Y, Fang L Z. Design and implementation of fish behavior automatic monitoring system based on computer vision[J]. *Fishery Modernization*, 2011, 38(1): 19-23(in Chinese).
- [6] 危起伟, 杨德国, 柯福恩, 等. 长江中华鲟超声波遥测技术[J]. *水产学报*, 1998, 22(3): 211-217.
Wei Q W, Yang D G, Ke F E, et al. Technique of ultrasonic telemetry for Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, in Yangtze River[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1998, 22(3): 211-217(in Chinese).
- [7] 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.
Wang Z C, Chen G B, Zeng L. Study of fish behavior using acoustic fish tags and wireless tracker[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(2): 51-59(in Chinese).
- [8] 郭禹, 汤勇, 赵文武, 等. 基于小型声学标记的花尾胡椒鲷行为研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(2): 282-290.
Guo Y, Tang Y, Zhao W W, et al. Studies of behaviours of *Plectorhinchus cinctus* (Temminck et Schlegel) using acoustic tags[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(2): 282-290(in Chinese).
- [9] Moore A, Russell I C, Potter E C E. The effects of intraperitoneally implanted dummy acoustic transmitters on the behaviour and physiology of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L[J]. *Journal of Fish Biology*, 1990, 37(5): 713-721.
- [10] 俞立雄, 段辛斌, 陈大庆, 等. 5种鱼类标志对草鱼临界游泳速度的影响[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(3): 550-557.
Yu L X, Duan X B, Chen D Q, et al. Effect of five tagging methods on critical swimming speed of grass carp, *Ctenopharyngodon idellus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(3): 550-557(in Chinese).
- [11] 王春香, 李媛媛, 徐顺清. 生物监测及其在环境监测中的应用[J]. *生态毒理学报*, 2017, 5(5): 628-638.
Wang C X, Li Y Y, Xun S Q. Biological monitoring and its application in environmental monitoring[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 5(5): 628-638(in Chinese).
- [12] 何大仁, 蔡厚才. 鱼类行为学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998.
He D R, Cai H C. Fish Behavior Science[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 1998(in Chinese).
- [13] Kenyon T N, Ladich F, Yan H Y. A comparative study of hearing ability in fishes: the auditory brainstem response approach[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 1998, 182(3): 307-318.
- [14] Miyamoto Y, Uchida K, Takao Y, et al. Development of a new ultrasonic biotelemetry system using a maximum

- length sequence signal[J]. *The Journal of the Marine Acoustics Society of Japan*, 2011, 38(3): 119-127.
- [15] 徐盼麟, 韩军. 基于视频的水箱内鱼类行为观测系统[J]. *湖南农业科学*, 2011(19): 140-142.
- Xu P L, Han J. Automated observation system for fish behavior based on video[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011(19): 140-142(in Chinese).
- [16] 陈功, 王平波, 庞韬, 等. 基于被动声学技术的海洋生物测量研究进展[J]. *渔业现代化*, 2014, 41(6): 37-42.
- Chen G, Wang P B, Pang T, *et al.* Research progress of marine organisms based on passive acoustics technology[J]. *Fishery Modernization*, 2014, 41(6): 37-42(in Chinese).
- [17] Deters K A, Brown R S, Carter K M, *et al.* Performance assessment of suture type, water temperature, and surgeon skill in juvenile Chinook salmon surgically implanted with acoustic transmitters[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2010, 139(3): 888-899.
- [18] Carlson J K, Heupel M R, Bethea D M, *et al.* Coastal habitat use and residency of juvenile Atlantic sharpnose sharks (*Rhizoprionodon terraenovae*)[J]. *Estuaries and Coasts*, 2008, 31(5): 931-940.
- [19] Parkyn D C, Murie D J, Colle D E, *et al.* Post-release survival and riverine movements of Gulf of Mexico sturgeon (*Acipenser oxyrinchus desotoi* Acipenseriformes) following induced spawning[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2006, 22(1): 1-7.
- [20] Mallekh R, Lagardère J P, Eneau J P, *et al.* An acoustic detector of turbot feeding activity[J]. *Aquaculture*, 2003, 221(1-4): 481-489.
- [21] Miyamoto Y, Uchida K, Orii R, *et al.* Three-dimensional underwater shape measurement of tuna longline using ultrasonic positioning system and ORBCOMM buoy[J]. *Fisheries Science*, 2006, 72(1): 63-68.

Behavioral characteristics of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) in tank by ultrasound pinger system

SONG Wei^{1,2}, YIN Leiming³, CHEN Xuezhong¹, WANG Lei¹, LIU Yongli¹,
WANG Yongjin¹, MA Lingbo¹, WANG Lumin^{1*}

(1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;

2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;

3. College of Marine Sci-Tech and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to understand the behavioral characteristics of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*), the ultrasound pinger system has been used to track 4 tails of test fish for 24 hours to access the fish movement data by implanted methods on Aug. 27th and 28th, 2018. The results show that: ① the vertical movement depth of the test fish is (0.89±0.51)m (18:00—24:00), (0.73±0.50)m (0:00—6:00), (1.04±0.50)m (6:00—12:00), (1.00±0.45)m (12:00—18:00), and keep in 0.50~1.25 m; ②the horizontal movement of test fish appeared on the inside of tank about 159.0±9.50 times, and 27% in total data, and about 489.0±12.5 times appeared around tank, 73% in total data. This means that the fish are assembling inside the tank and do the random motion, occasionally the motion appeared around the tank wall. This experiment is the first time to study the behavioral characteristics in tank-farming by ultrasound pinger system, and it aims to provide a scientific theoretical basis and data support for the fishing management for production and behavior monitor of *L. crocea*.

Key words: *Larimichthys crocea*; ultrasound pinger; tank-farming; behavior

Corresponding author: WANG Lumin. E-mail: lmwang@ecsf.ac.cn

Funding projects: Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2017HY-ZD0606); Financially Supported by the Marine S&T Fund of Shangdong Province for Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2018SDKJ0303-4); China Agriculture Research System (CARS-47-G25)