



通过小型探鱼无人船探测大型围网养殖区大黄鱼的分布特性

田玉先¹, 冯德军¹, 张华², 桂福坤¹, 曲晓玉^{3*}

(1. 浙江海洋大学, 国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江 舟山 316022;

2. 浙江海洋大学船舶与海运学院, 浙江 舟山 316022;

3. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: 为了明确大黄鱼在大型围网养殖区内的分布规律, 实验通过集成、构建具备大黄鱼探测以及水温、盐度、光照、pH、溶解氧等海洋环境探测功能的小型探鱼无人船, 并在浙江省舟山市桃花岛大黄鱼围网养殖基地内开展了6次现场监测。结果发现, ①在水平范围, 大黄鱼主要分布在大型围网养殖区内礁石丰富且水流相对较缓的区域; ②在垂直范围, 大黄鱼主要分布在加权相对深度0.6~0.9的养殖海区中下层; ③围网养殖海区内温度、盐度、pH、溶解氧等海洋环境条件整体变化较小, 大黄鱼往往分布在光照强度分别为(5 921±2 702)、(50 799±50 988)、(5 990±542)、(3 494±695)、(6 836±4 761)及(15 395±5 531) lx等相对较弱的区域。本实验首次通过小型探鱼无人船系统研究了围网养殖区内大黄鱼的分布特性及相应的海洋环境因子对其分布的影响, 结果为大黄鱼围网养殖区的操作平台选址、投喂管理、起网设计等提供了依据。

关键词: 大黄鱼; 水产养殖; 分布特性; 鱼类行为; 探鱼无人船

中图分类号: S 951.4

文献标志码: A

大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 是中国传统的四大海洋经济鱼类之一^[1], 含有丰富的蛋白质、维生素以及不饱和脂肪酸等^[2-4], 是优质的海洋水产品, 也是中国南方主要的养殖鱼类品种。近岸普通网箱养殖、深水抗风浪网箱养殖和浅海大型围网养殖是大黄鱼的主要养殖方式^[5]。其中, 大型围网养殖是近年来新兴发展起来的一种高端海洋养殖模式, 主要通过桩柱和网衣围网大面积海域, 为养殖对象提供更接近原生环境的生长条件^[6-8], 目前在浙江、福建、山东等地已经建有多个大型围网养殖基地^[8-9]。然而, 大的养殖空间和广阔鱼类活动范围也给围网养殖带来了投喂、起捕难等问题, 因此, 如何精准定位鱼群、充分了解其分布特性则是目前围网养殖模式中亟需解决的问

题。同时, 研究大黄鱼在大型围网养殖区内的分布特性具有重要的实际意义和应用价值。

目前, 有关大黄鱼在围网养殖区分布特性的研究较少。宋炜等^[5]通过体内植入和背鳍悬挂小型超声波的方法分析了水槽养殖^[5]及围网养殖^[10]大黄鱼的行为特性。利用超声波标记法获取的实验数据虽然可靠性较高, 但此技术必须将超声波系统加固在鱼体上才能获取所标记鱼的位置信息, 且实验前准备工作复杂。该方法更适合监测单个鱼体的活动, 并不适合对整个鱼群的分布特性进行研究。此外, 柳晓雪等^[11]通过拖网调查船在浙江南部近海温台渔场开展了渔业资源和环境综合调查, 通过构建栖息地适宜性指数模型探究了太的黄鲫 (*Setipinna taty*) 的适宜栖息地空间分布特性,

收稿日期: 2021-01-29 修回日期: 2021-04-14

资助项目: 国家重点研发计划(2019YFD0900904); 浙江省自然科学基金(LQ18E090005); 舟山市“揭榜挂帅”科技攻关计划(2022C01003); 浙江省属高校科研院所基本科研业务费(2019J00030)

第一作者: 田玉先(照片), 从事设施养殖工程研究, E-mail: 1663005203@qq.com

通信作者: 曲晓玉, 从事海洋设施养殖工程技术研究, E-mail: quxiaoyu@zjou.edu.cn



并预测了大的黄鲫的最适宜栖息地分布。然而, 渔业资源调查船一般体积大、噪音大, 易对浅海鱼类分布产生影响^[12], 因此, 不适合应用于浅海大型围网养殖区域。王志滨等^[13]针对水下信息传输的需求, 设计并实现了一套基于光纤通信的水下视频传输系统, 并对捕获的鱼类视频信息进行分析 and 处理。水下视频观测的方法虽然能够直观地实现鱼类可视化探测, 但其易受光照、水体浑浊度、水流速度等环境条件影响^[14], 而且大多为定点观测, 因此也不适合对大型围网养殖区内鱼类分布特性进行监测。

为了准确地获得大型围网养殖区内大黄鱼的分布特性, 本实验通过将声呐鱼探仪与温度、盐度、pH、光照、溶解氧传感器等仪器设备集成至小型无人船, 构建了小型探鱼无人船。利用该小型探鱼无人船在浙江省舟山市桃花岛大黄鱼围网养殖基地内进行了 6 次现场监测实验, 系统地分析了大黄鱼在围网养殖区内的分布特性, 监测结果可为大型围网养殖区内大黄鱼投喂管理和起网捕鱼作业等提供可靠的理论基础和数据支持。

1 材料与方法

1.1 探鱼无人船的结构组成与工作原理

本研究中探鱼无人船主要由船体、岸基控制端、遥控器、软件控制端组成(图 1)。船体采用特殊高韧性、高硬度 PE(聚乙烯)材料, 规格 1 300 mm × 636 mm × 339 mm (长×宽×高), 总质量 20 kg, 航行模式分为航线规划模式和遥控器控制模式。船内搭载探鱼仪和温度、盐度、pH、光照及溶解氧传感器, 相应的仪器参数见表 1。

声呐探鱼仪(DE-FR01, 200 kHz, 安徽欣思创科技有限公司)主要为收发一体式的单波束换能器, 采用垂直探测方式, 波束开角为 15°, 有效测深范围为 80 m, 盲区为 0.6 m, 以减少船只走航过程中海水表层气泡噪声对数据采集产生的影响^[15]。其工作原理是首先由换能器发射的声波信号在水域里传播, 当遇到不同于水的介质时, 信号会发生反射, 根据信号从发射到接收的时间差, 测量目标到换能器之间的距离^[16-18]。硬度值即为对回声信号强度进行处理得到的鱼群面积与相应

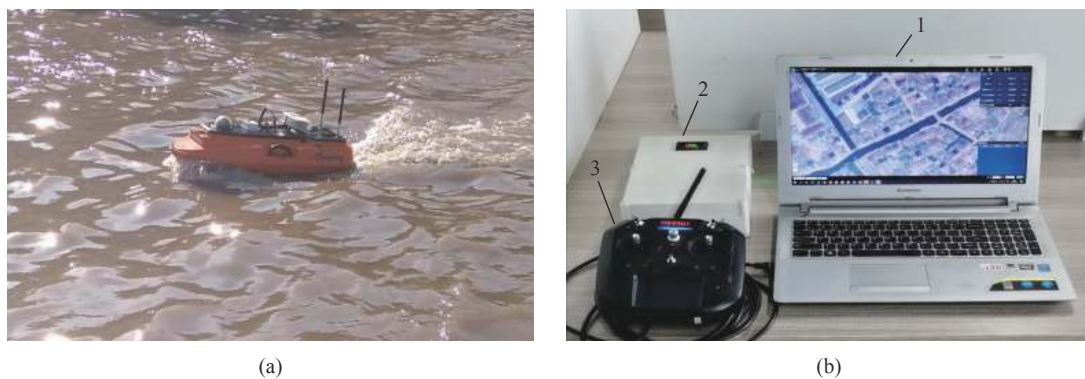


图 1 小型探鱼无人船结构组成

(a) 探鱼无人船实物图, (b) 探鱼无人船采集系统实物图; 1. 传感器软件控制端, 2. 岸基控制端, 3. 遥控器

Fig. 1 Structure and composition of Small Unmanned Surface Vehicle

(a) photo of the Small Unmanned Surface Vehicle, (b) photo of the Unmanned Surface Vehicle collection system; 1. software control terminal, 2. shore-based system, 3. remote control

表 1 传感器性能

Tab. 1 Sensor parameters

传感器类别 sensor category	型号 model	范围 range	精度 precision	响应时间/s response time
温度传感器 temperature sensor	MQ-WD01	-20~40 °C	±0.1 °C	<15
pH值传感器 pH sensor	MQ-pH01	0~14	±0.1	<15
盐度传感器 salinity sensor	MQ-YD01	0~70	±1%	<15
光照度传感器 illumination sensor	D678	0~200 000 lx	±7%	<1
溶解氧传感器 dissolved oxygen sensor	MQ-FDO01	0~20 mg/L	±0.1 mg/L	<45

位置区域面积的比值，再乘以 255 得出的数值(数字化处理)，本实验以硬度值来表征鱼群的大小。岸基控制台通过 4G 网络接收声呐探测仪数据，软件控制端将接收到的数据通过生成鱼群反演图实时显示海区鱼群分布情况(图 2-a)，以及实现将动态监测的海区环境参数变化情况及船体运行状态同时显示并保存(图 2-b)。

需要指出的是，本研究构建的小型探鱼无人船只能通过硬度值表征鱼群的相对大小，并不能精准监测鱼的数量。考虑到本研究的主要目的是探究大黄鱼在大型围网养殖区内的分布特性，而不是测量养殖区内的大黄鱼数量。因此，该实验没有深入研究鱼群准确数量与硬度值的关系。

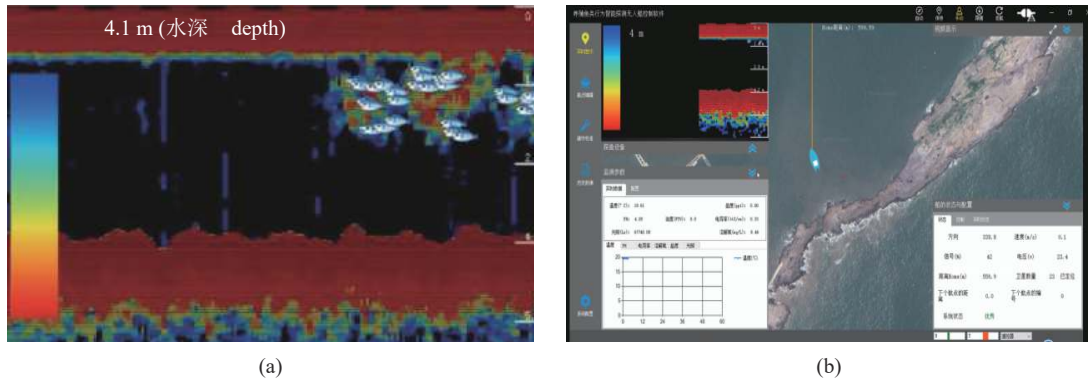


图 2 小型探鱼无人船测量系统

(a) 鱼群反演图; (b) 探鱼无人船软件控制界面

Fig. 2 Measurement system of Small Unmanned Surface Vehicle

(a) inversion of fish school display; (b) software control interface of the Small Unmanned Surface Vehicle

1.2 研究区域与实验环境条件

为了探测大黄鱼在大型围网养殖区内的分布情况，分别于 2019 年 11 月 15 日和 2020 年 4 月 29 日利用上述探鱼无人船在浙江省舟山市桃花岛大黄鱼围网养殖基地(图 3)进行了 6 次监测实验，监测具体时间及环境条件见表 2。桃花岛大黄鱼围网养殖结构类型为连岸型双排桩柱式，整体围网长度约为 467 m，网衣为有结节 PE 网衣。养殖区域面积约为 10⁵ m²，水深约 10 m，且拥有一处天然凹口区域(图 3-b)，养殖区内设有投饵平台和工作平台，整体示意图如图 3-c 所示。

1.3 数据处理与分析

数据处理时，结合实际测试结果将硬度阈值(探测的鱼群硬度最小值)设置为 80，以屏蔽浮游生物等弱散射体的回声信号^[19]。为了方便地表示鱼群在养殖区内的垂直分布情况，重新定义鱼类分布水层^[20]，把每 1 米作为一个水层单元，即把 1 m 内的鱼群硬度值求和作为该水层的鱼群硬度值。由于养殖区海底地形不同，即不同位置处水深不同，本实验采用计算加权相对深度的方法对大黄鱼的垂向分布特性进行归一化处理。

相对深度的计算公式：

$$d_1 = d/d_2 \tag{1}$$

式中， $d_1(m)$ 为相对深度； $d(m)$ 为大黄鱼所处位置至水面的竖直距离； $d_2(m)$ 为海底至水面的竖直距离。

加权相对深度的计算公式：

$$D_j = \sum_{i=1}^n (d_{1i})(H_d)_i / \sum_{i=1}^n (H_d)_i \tag{2}$$

式中， D_j 为加权相对深度； j 为相对水层数； n (个) 为第 j 层内探测到的鱼群总个数； H_d 为鱼群硬度。

2 结果

2.1 桃花岛围网养殖区大黄鱼的水平分布特性

为了更清晰地阐释大黄鱼的水平分布特性，用探测点下方水体所探测到的鱼群硬度值总和表征该探测点的鱼群大小。结果显示，左右两列图分别显示了大黄鱼的水平分布及探鱼无人船探测位置处的水深分布情况。a1~f1 图中黑色实心圆点表示探鱼无人船走航时的数据采集点，彩色圆点表征此位置鱼群总硬度，颜色由深蓝过渡到明黄色表示鱼群硬度由小变大，即表明鱼数量由少变多(图 4)。通过图 a1~f1 可以明显地发现，鱼群主要分布在养殖区的西北区域，且主要集中

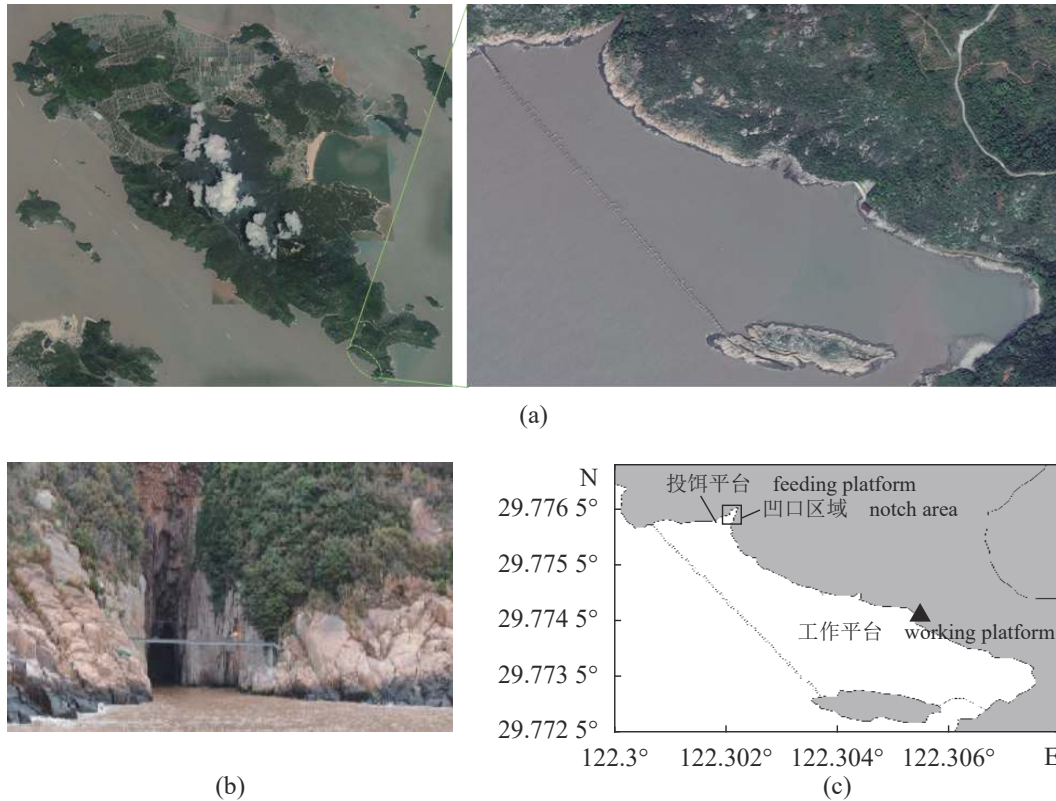


图 3 舟山市桃花岛大黄鱼围网养殖基地

(a) 大黄鱼围网养殖区地理区位图; (b) 大黄鱼围网养殖区凹口区域; (c) 大黄鱼围网养殖区示意图

Fig. 3 The net-enclosure aquaculture of *L. crocea* in Taohua Island, Zhoushan City

(a) geographic location of net-enclosure aquaculture of *L. crocea*; (b) notch area of net-enclosure aquaculture of *L. crocea*; (c) schematic diagram of net-enclosure aquaculture

表 2 实验环境条件

Tab. 2 The environmental conditions of the test

编号 number	监测日期 monitoring date	监测时间 monitoring time	天气 weather	潮位 tide level
I	2019-11-15	07:00~07:20	晴 sunny	涨潮 high tide
II	2019-11-15	10:00~10:20	晴 sunny	涨潮 high tide
III	2019-11-15	16:00~16:20	晴 sunny	落潮 low tide
IV	2020-04-29	05:30~06:20	多云 cloudy	落潮 low tide
V	2020-04-29	09:10~10:40	多云 cloudy	涨潮 high tide
VI	2020-04-29	15:30~16:50	多云 cloudy	落潮 low tide

在该区域的凹口区与近岸礁石区, 养殖区的东南区域基本没有鱼群分布。a2~f2 图中圆点颜色表征此位置海水深度, 颜色由深蓝过渡到明黄色表示水深由浅变深, 且由图中可以看出西北区域水深在 6 m 以上, 东南区域的水深在 2 m 左右。此外, 由于本研究在正式实验前对桃花岛养殖区已进行过多次监测, 发现在靠近围网附近区域和东南区域内大黄鱼的分布较少, 因此实验时未再对这些区域进行监测。

2.2 桃花岛围网养殖区大黄鱼的垂直分布特性

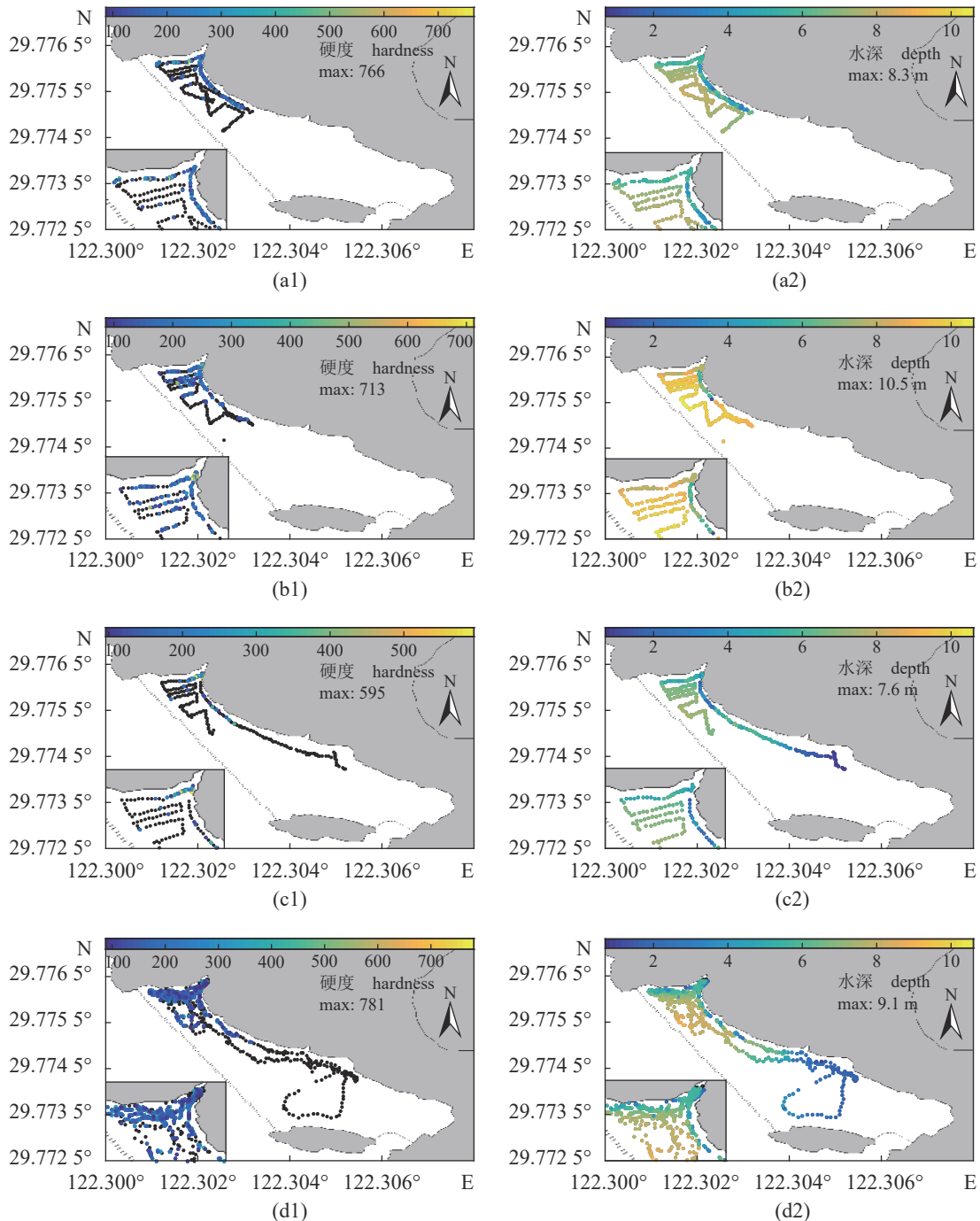
根据公式 (1) 和 (2) 对表 2 中 6 个监测时间段内不同水层的鱼群硬度值进行统计, 硬度随绝对深度和加权相对深度的变化情况。结果显示, 硬度随绝对深度和加权相对深度的分布曲线变化均先增大后减小, 整体呈现“>”形状 (图 5)。从绝对深度曲线中可以发现, 鱼群在 6 次不同时间段内主要集中在分布在 5~7 m 附近水层, 从加权相对深

度曲线中可以发现鱼群在6次不同时间段内主要集中分布在0.6~0.9的位置。因此,无论从绝对深度曲线还是加权相对深度曲线分析,大黄鱼都主要分布在养殖区的中下层水域。

2.3 环境条件对大黄鱼分布的影响

舟山桃花岛围网养殖区域的盐度、pH、溶解氧、温度和光照等环境数据的6次监测结果显示,盐度、pH、溶解氧变化较小,盐度平均值为

27.44 ± 0.28 , pH平均值为 8.10 ± 0.04 , 溶解氧平均值为 (8.57 ± 0.50) mg/L。I~III为2019年11月15日的监测数据,温度平均值为 (20.48 ± 0.11) °C, IV~VI为2020年4月29日的监测数据,温度平均值为 (16.21 ± 0.10) °C, 2 d间温度变化较大的主要原因是季节不同,而同一天内温度的变化比较小(表3)。由统计结果可以看出,光照强度的变化较大,主要原因是由于山体的遮挡使凹口区域的光照强度急剧降低。



(图4 Fig. 4)

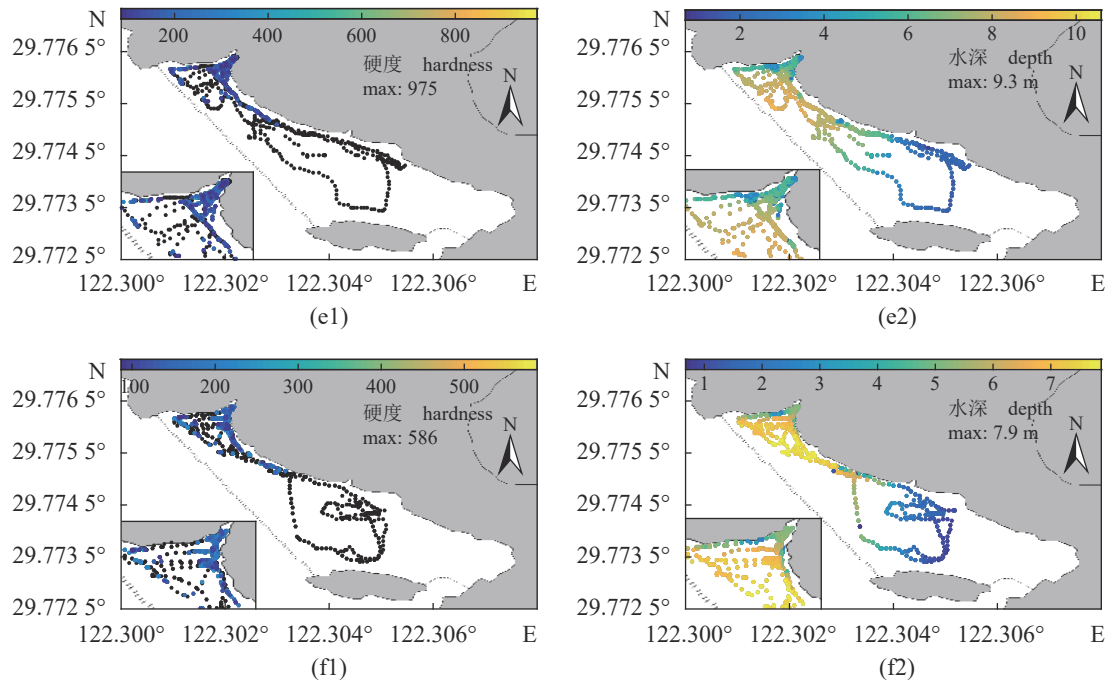


图 4 大黄鱼水平分布 (1) 及水深分布 (2)

(a)~(f) 的监测时间分别对应表 2 的 I~VI 监测时间; 下同

Fig. 4 Horizontal distribution patterns of *L. crocea* (1) and water depth (2)

(a)-(f) correspond to the monitoring time I -VI in Tab. 2; the same below

3 讨论

3.1 围网养殖区大黄鱼水平分布特性

大型围网养殖模式的设计是为了给养殖鱼类提供更广阔的活动空间, 但本研究的结果表明, 大黄鱼并没有均匀地分布在围网养殖区域, 而是主要分布在围网养殖区西北区域的凹口与近岸礁石区域。

分析其主要原因: ①地形及流速的影响。结果显示, 养殖区西北区域水深大于东南区域, 且凹口及近岸礁石处海水深浅、地形坡度发生变化(图 4-a2~f2)。由于地形抬高或隆起会对海水流动形成障碍, 改变水流流动方向, 凹口区域内水流速度变缓, 从而促进饵料生物繁殖, 创造了有利于鱼类群聚的优越环境, 因此, 在桃花岛养殖区大黄鱼主要分布在深水以及礁石丰富的缓流区域。吴飞飞等^[21]在研究大黄鱼续航时间和临界游泳速度时发现, 大黄鱼游泳能力弱, 续航时间与水流速度成反比, 大黄鱼适宜生活在缓流区域。实际上很多鱼类都有类似的分布特性, 其中闽南台湾浅滩渔场中上层鱼类主要在地形起伏大、水深变化大的区域分布密集^[22]。②噪声的影响。大黄鱼属于石首科 (Sciaenidae), 对声音敏感^[23-24], 在受

到强噪声影响时往往会出现负反应。施慧雄等^[25]通过模拟现场船舶噪声对大黄鱼行为进行研究, 发现大黄鱼在非持续性的船舶噪声下皮质醇(作为判别生物遭受胁迫的灵敏因子)水平升高, 认为大黄鱼出现了应激反应, 危害鱼体健康。吴常文等^[26]在对深水网箱内大黄鱼行为习性进行长期观察时发现, 网箱外养殖人员走动时发出的声音会使大黄鱼受到惊扰, 船舶经过时会使大黄鱼跃出水面, 若声音强度过大、持续时间过长甚至会造成鱼群大批死亡。而由图 2-a 可以看出, 桃花岛养殖基地围网外侧邻近国际深水航道, 常有船舶经过产生噪音, 这极有可能是大黄鱼在西北区域远离围网, 靠近凹口区域的原因。③投饵驯化的影响。养殖基地工作人员表示, 在选定投饵区前, 大黄鱼已经多出现于凹口区域, 在选定投饵区后, 经过长期投饵驯化可能会使大黄鱼更多地聚集在投饵区附近的凹口区域。综合上述研究与分析, 在浅海大黄鱼围网养殖区域, 大黄鱼主要分布在水流平缓、远离噪声、饵料充足及近岸礁石附近区域。

3.2 围网养殖区大黄鱼垂直分布特性

由于鱼群种类和生活习性的不同, 所以适宜

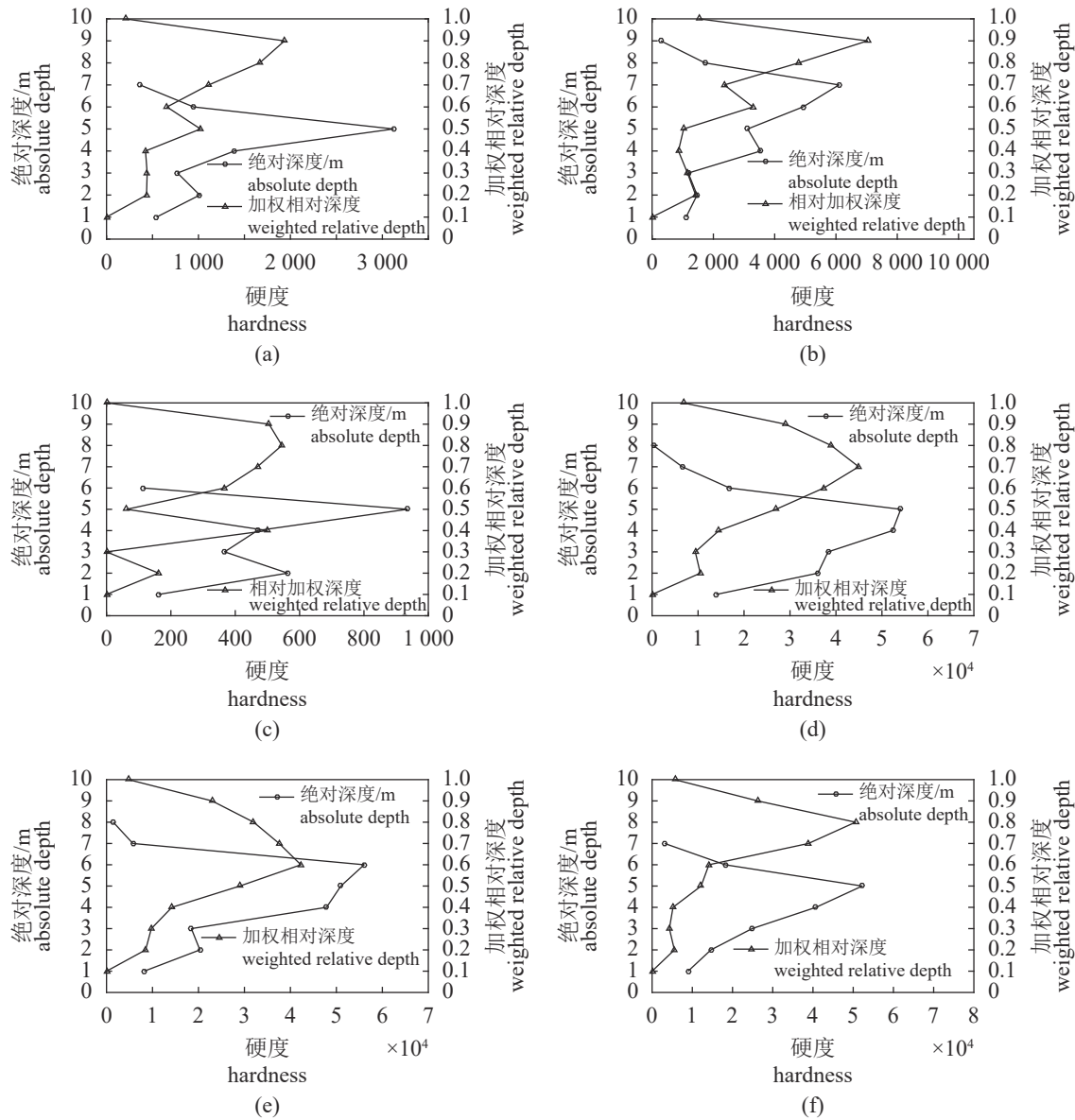


图 5 大黄鱼垂直分布

Fig. 5 Results of vertical distribution depths of *L. crocea*

表 3 探鱼无人船监测数据

Tab. 3 Data monitored by Small Unmanned Surface Vehicle

编号 number	盐度 salinity	pH	溶解氧/(mg/L) dissolved oxygen	温度/°C temperature	光照/lx illumination
I	27.11±0.14 ^a	8.10±0.01 ^a	7.98±0.04 ^a	20.33±0.02 ^a	9 966.00±14 201.22 ^b
II	27.66±0.36 ^a	8.10±0.04 ^a	8.13±0.06 ^a	20.59±0.05 ^a	54 636.00±53 270.96 ^a
III	27.39±0.17 ^a	8.20±0.01 ^a	8.17±0.17 ^a	20.51±0.05 ^a	8 345.00±106 853.92 ^b
IV	27.92±0.94 ^a	8.10±0.02 ^a	9.14±0.05 ^a	16.07±0.03 ^b	4 263.00±4 425.59 ^c
V	27.15±1.02 ^a	8.07±0.07 ^a	8.99±0.18 ^a	16.26±0.12 ^b	62 986.00±59 071.65 ^a
VI	27.41±0.89 ^a	8.07±0.02 ^a	9.03±0.19 ^a	16.31±0.12 ^b	17 217.00±23 215.03 ^b

注： 同列不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著, $n=3$

Notes: The same column with different letters indicates significant difference among treatments at $P<0.05$, $n=3$

其分布的水层也不相同^[27]。如中华侧带小公鱼 (*Stolephorus chinensis*)、鲮 (*Mugil cephalus*)、龟鲟 (*Chelon haematocheilus*) 和美肩鳃鲷 (*Omobranchus elegans*) 主要分布在长江口水域表层, 日本带鱼 (*Trichiurus japonicus*) 和黄鳍东方鲀 (*Takifugu xanthopterus*) 主要分布在中层, 日本鳗鲡 (*Anguilla japonica*) 等主要分布在底层^[28]。而目前关于大黄鱼在浅海围网养殖区垂直水层分布的研究很少。本研究发现, 大黄鱼在绝对深度与加权相对深度处均主要分布于养殖区域的中下水层, 这与宋炜等^[10]的研究结果相似。宋炜等^[10]研究发现, 在深度 12 m 的浅海大型围栏设施中, 大黄鱼除黎明与黄昏时间段出现上浮现象外, 总体上主要活动在水下 4~10 m 的区域, 且最为集中于 6 m 附近水层。吴常文等^[26]通过对不同深水网箱养殖鱼类行为习性的长期观察中也发现大黄鱼主要活动于网箱的中下层。

大黄鱼出现这种垂直分布现象可能与不同水深条件下光照强度、溶解氧含量、藻类分布及水体温度不同有关。吴亮等^[29]研究表明, 大多数水生动物都有一个适宜活动的照度范围, 当环境达到鱼类适合的照度或嗜好照度时, 就能引起鱼类在该照度的水层内集群。而大黄鱼具有厌强光的生物习性^[26], 故表层鱼群分布数量明显低于中下层。而溶解氧含量会随着水深的增加逐渐减少^[11], 所以大黄鱼在垂直方向底层水域的分布数量也明显低于中下层。因此, 光照与溶解氧联合限制了其分布区域。另外张迎秋等^[30]研究发现, 水温垂直分布和底层藻类分布会影响底层水域溶解氧含量, 因此, 水体温度与藻类分布间接影响着大黄鱼的垂直分布。结合以上分析可以推测, 大型围网养殖区中下层温度范围、藻类丰度、溶解氧含量及光照强度较适宜大黄鱼生存、集群。

3.3 环境条件对大黄鱼分布的影响

环境条件 (温度、盐度、溶解氧、光照、pH) 是影响海洋渔业资源空间分布的重要原因, 直接影响鱼类的分布^[31-32]。相关研究指出, 大黄鱼幼鱼适宜溶氧量为 4.70~5.38 mg/L, 早期生活的适盐范围为 10~40, 以及在温度 24.1~24.7 °C, 盐度 13.6~14.1 联合效应下, 生长性能达到最佳效果^[33-35]。但以上研究均是在实验室通过控制变量法得出的结论, 而关于自然海区环境条件下大黄鱼分布特性的研究较少。因此, 本研究对养殖区环境因素进行的监测与分析更具有实际意义。

对大型围网养殖区域内盐度、pH、溶解氧、温度进行方差分析发现, 盐度、pH、溶解氧、同一天温度在养殖区内的差异并不明显 ($P>0.05$) (表 3), 因此难以深入分析以上环境因素对大黄鱼分布产生的影响。郭禹等^[36]对舟山嵊泗马鞍列岛 420 km² 的海域进行鱼类群落特征研究中也指出, 由于调查区域面积较小, 温度、盐度、溶解氧等环境因子对资源数量影响不显著, 而影响鱼类群落分布的主要原因与礁石等地形因素有关, 这也与本研究影响大黄鱼水平分布的因素一致。由于大黄鱼有厌强光的习性, 所以光照对大黄鱼分布会产生明显影响。随机选取 2 次光照测量结果进行分析, 图 6 为监测序号 I 和 V 的光照强度分布情况。结果显示, 除凹口区域内光照强度最弱外, 围网养殖区其余区域光照强度均较大, 结合大黄鱼水平方向上分布在凹口区域较多的结果可知, 大黄鱼主要分布于光照强度分别为 (5 921±2 702)、(50 799±50 988)、(5 990±542)、(3 494±695)、(6 836±4 761) 及 (15 395±5 531) lx 等相对较弱的区域 (图 6-a~f)。

4 结论

本研究通过小型探鱼无人船在舟山市桃花岛大黄鱼围网养殖基地开展了 6 次监测实验, 获得了大黄鱼在大型围网养殖区内的分布特性以及海水温度、盐度、pH、光照、溶解氧、水深等环境数据, 并分析了大黄鱼分布特性与养殖区环境因素的关系, 主要结论如下,

(1) 在水平分布方面, 大黄鱼主要分布在大型围网养殖区西北区域的凹口内及近岸礁石区, 即大黄鱼多分布于礁石丰富且水流相对较缓的区域。

(2) 在垂直分布方面, 大黄鱼主要分布在绝对水深为 5~7 m, 加权相对水深为 0.6~0.9 的位置, 即大黄鱼多分布于养殖海区的中下层。

(3) 围网养殖海区内盐度 27.44±0.28、pH 8.10±0.04、溶解氧 (8.57±0.50) mg/L、2019 年 11 月 15 号温度 (20.48±0.11) °C, 2020 年 4 月 5 号温度 (16.21±0.10) °C 等海洋环境条件变化较小, 大黄鱼往往分布在光照强度分别为 (5 921±2 702)、(50 799±50 988)、(5 990±542)、(3 494±695)、(6 836±4 761) 及 (15 395±5 531) lx 相对较弱的区域。

本研究首次尝试性地利用小型探鱼无人船研究了大型围网养殖区内大黄鱼的分布特征, 初步

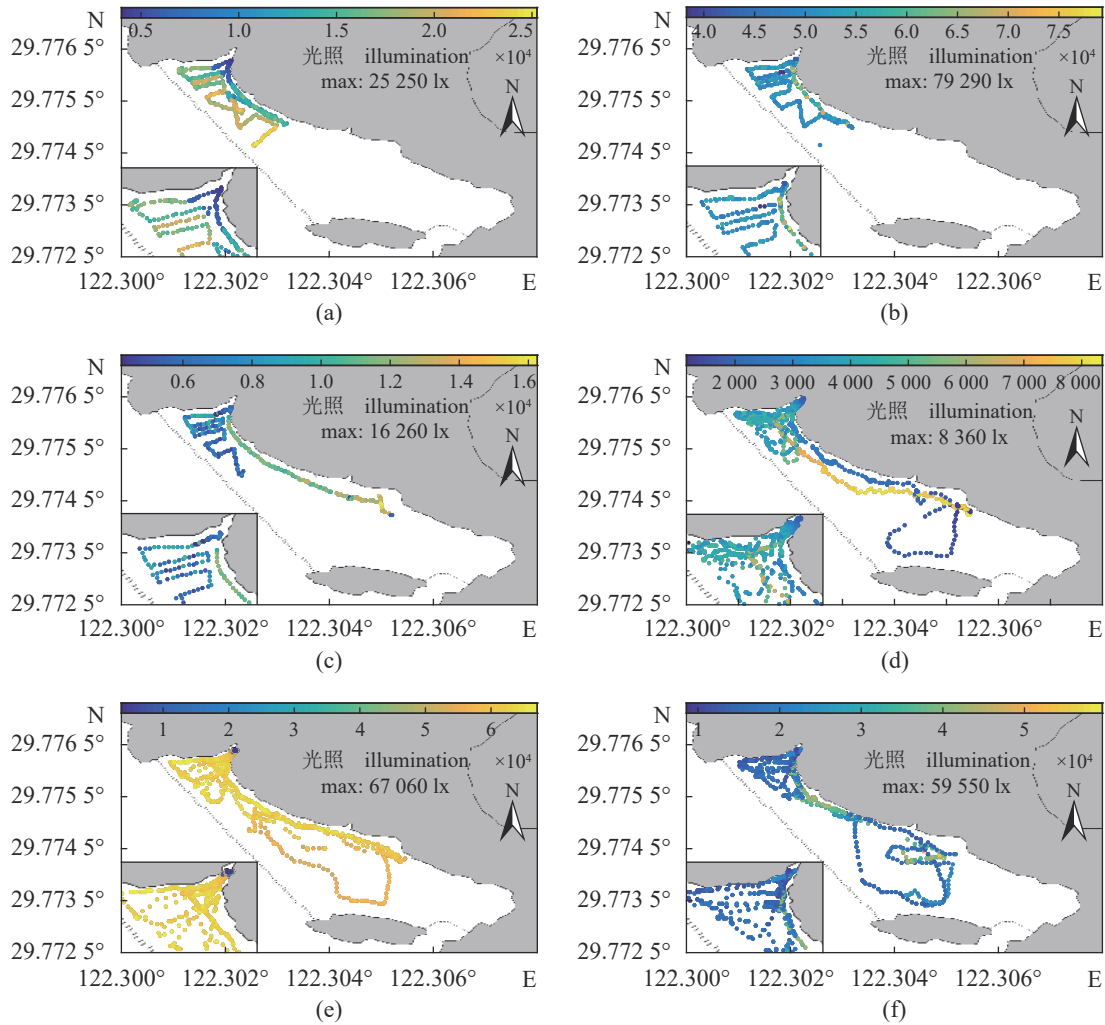


图 6 光照强度分布图

Fig. 6 Distribution of illumination intensity

探明了大黄鱼在大型围网养殖区内的分布规律，研究结果可以为操作平台选址、投喂管理、起网设计提供可靠依据。由于实验条件所限，本研究没有深入分析硬度值与鱼群数量的对应关系。此外，该探鱼无人船目前只能探测表层海区的海洋环境因素，没能够更进一步地分析垂向环境因素变化对鱼群在垂向分布产生的影响，以及该小型探鱼无人船尚不具备监测围网养殖区内的流速、地形及浊度等因素的功能。未来拟将升级探鱼无人船，以期能同时监测大型围网养殖区域内流速、地形、多维度的海洋水文环境以及养殖对象的分布，进而更全面地掌握大型围网养殖区大黄鱼分布特性与环境条件之间的关系，助力大型围网养殖模式的发展。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

[1] 韩坤煌, 黄伟卿, 戴燕彬. 围网与普通网箱养殖大黄鱼营养成分的比较与分析[J]. 河北渔业, 2011(12): 24-28,57.
Han K H, Huang W Q, Dai Y B. Comparison and analysis of the nutrient components of *Larimichthys crocea* in seine net and traditional net cage[J]. Hebei Fisheries, 2011(12): 24-28,57 (in Chinese).

[2] 郭全友, 宋炜, 姜朝军, 等. 两种养殖模式大黄鱼营养品质及其重金属含量分析[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 341-345.
Guo Q Y, Song W, Jiang C J, et al. Comparison of nutritional quality and heavy metals of *Pseudosciaena crocea* in different farmed modes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(6): 341-345 (in Chinese).

[3] 肖雄, 林淑琴, 吴雄飞, 等. 三种不同养殖模式下大黄鱼...
中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- 鱼鱼皮、鱼鳞挥发性风味成分分析[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(2): 341-354.
- Xiao X, Lin S Q, Wu X F, *et al.* Volatile flavor compounds on the skin and scales of *Pseudosciaena crocea* cultured using three different methods[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(2): 341-354 (in Chinese).
- [4] 王萍, 娄宇栋, 冯建, 等. 小麦蛋白粉替代鱼粉对大黄鱼幼鱼生长、血清生化指标及抗氧化能力的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(5): 733-743.
- Wang P, Lou Y D, Feng J, *et al.* Effect of replacing fish meal with wheat gluten meal on growth, serum biochemical indexes and antioxidant enzyme activity of juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(5): 733-743 (in Chinese).
- [5] 宋炜, 殷雷明, 陈雪忠, 等. 运用超声波标志法分析水槽养殖条件下大黄鱼行为特性[J]. *水产学报*, 2020, 44(1): 79-84.
- Song W, Yin L M, Chen X Z, *et al.* Behavioral characteristics of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) in tank by ultrasound pinger system[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(1): 79-84 (in Chinese).
- [6] 刘巧灵. 自然海区大黄鱼围养技术的研究[J]. *福建水产*, 2009(2): 33-37.
- Liu Q L. Research on The technique for the enclosure culture of *Pseudosciaena crocea* in shore[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2009(2): 33-37 (in Chinese).
- [7] 桂福坤, 张斌斌, 曲晓玉, 等. 波流作用下围网养殖工程的桩柱结构受力分析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 31-38.
- Gui F K, Zhang B B, Qu X Y, *et al.* Force analysis of piles in net enclosure aquaculture engineering subjected to waves and current[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(11): 31-38 (in Chinese).
- [8] 李明云, 苗亮, 俞淳, 等. 大黄鱼大型座底式围网养殖的不同形式和管理的效果[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2019, 32(6): 30-34.
- Li M Y, Miao L, Yu C, *et al.* Effects of different forms and management of large bottom-seated enclosure for culturing large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2019, 32(6): 30-34 (in Chinese).
- [9] 周文博, 石建高, 余雯雯, 等. 中国海水围网养殖的现状与发展趋势探析[J]. *渔业信息与战略*, 2018, 33(4): 259-266.
- Zhou W B, Shi J G, Yu W W, *et al.* Current situation and development trend of marine seine culture in China[J]. *Fishery Information & Strategy*, 2018, 33(4): 259-266 (in Chinese).
- [10] 宋炜, 殷雷明, 陈雪忠, 等. 基于超声波标志法的浅海围网养殖大黄鱼行为研究[J]. *海洋渔业*, 2019, 41(4): 494-502.
- Song W, Yin L M, Chen X Z, *et al.* On behavioral characteristics of *Larimichthys crocea* by ultrasound pinger system of fence farming in shallow sea[J]. *Marine Fisheries*, 2019, 41(4): 494-502 (in Chinese).
- [11] 柳晓雪, 高春霞, 田思泉, 等. 基于栖息地适宜指数的浙江南部近海黄鲫最适栖息地分布[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(12): 1485-1495.
- Liu X X, Gao C X, Tian S Q, *et al.* Distribution of *Setipinna taty* optimal habitats in the South inshore area of Zhejiang Province based on the habitat suitability index[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(12): 1485-1495 (in Chinese).
- [12] 李超, 杨权. 南海渔业资源声学调查与研究进展[J]. *中国农业信息*, 2013(13): 191-192.
- Li C, Yang Q. Acoustic survey and research progress of fishery resources in the South China Sea[J]. *China Agriculture Information*, 2013(13): 191-192 (in Chinese).
- [13] 王志滨, 李培良, 顾艳镇. 海洋牧场生态环境在线观测平台的研发与应用[J]. *气象水文海洋仪器*, 2017, 34(1): 13-17.
- Wang Z B, Li P L, Gu Y Z. Development and application of the online observation platform for the ecological environment of marine ranching[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2017, 34(1): 13-17 (in Chinese).
- [14] 蔺丹清. 长江不同鳔室鱼类声学散射特性及其声学探测方法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- Lin D Q. The acoustic scattering characteristics of different chamberd swimbladder fishes and acoustic detection methods in Yangtze River[D]. Chongqing: Southwest University, 2016 (in Chinese).
- [15] 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.
- Ma Y Q, Si J F. Study on the monitoring of fish activity in the Yellow Sea coastal water based on hydroacoustic

- technology[J]. *Fishery Modernization*, 2016, 43(4): 70-75 (in Chinese).
- [16] Simmonds J, MacLennan D. *Fisheries acoustics theory and practice*[M]. 2nd ed. Blackwell: Blackwell Science, 2005: 187-204.
- [17] Moszynski M, Hedgpeth J B. Using single-beam side-lobe observations of fish echoes for fish target strength and abundance estimation in shallow water[J]. *Aquatic Living Resources*, 2000, 13(5): 379-383.
- [18] Gastauer S, Fässler S M M, Couperus B, *et al.* Target strength and vertical distribution of smelt (*Osmerus eperlanus*) in the Ijsselmeer based on stationary 200 kHz echosounder recordings[J]. *Fisheries Research*, 2013, 148: 100-105.
- [19] 李斌, 陈国宝, 郭禹, 等. 南海中部海域渔业资源时空分布和资源量的水声学评估[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(4): 28-37.
- Li B, Chen G B, Guo Y, *et al.* Hydroacoustic assessment of spatial-temporal distribution and biomass of fishery resources in the central South China Sea[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(4): 28-37 (in Chinese).
- [20] 沈蔚, 陈明, 童剑锋, 等. 用于渔业资源调查评估的两种声学手段的比较[J]. *淡水渔业*, 2018, 48(1): 34-40.
- Shen W, Chen M, Tong J F, *et al.* Comparison of two acoustic methods for fishery resource survey and evaluation[J]. *Freshwater Fisheries*, 2018, 48(1): 34-40 (in Chinese).
- [21] 吴飞飞, 王萍, 桂福坤, 等. 大黄鱼续航时间和临界游泳速度的初步研究[J]. *渔业现代化*, 2014, 41(4): 29-33.
- Wu F F, Wang P, Gui F K, *et al.* Preliminary study on sustained swimming time and critical swimming speed of *Pseudosciaena crocea*[J]. *Fishery Modernization*, 2014, 41(4): 29-33 (in Chinese).
- [22] 方水美, 杨圣云, 张澄茂, 等. 闽南-台湾浅滩渔场地形及水深与中上层鱼类群聚分布的关系[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1463-1467.
- Fang S M, Yang S Y, Zhang C M, *et al.* Effects of submarine topography and water depth on distribution of pelagic fish community in Minnan-Taiwan bank fishing ground[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1463-1467 (in Chinese).
- [23] 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).
- [24] 殷雷明, 陈雪忠, 张旭光, 等. 玻璃钢水槽内大黄鱼养殖环境噪声测量与分析[J]. *海洋渔业*, 2017, 39(3): 314-321.
- Yin L M, Chen X Z, Zhang X G, *et al.* Measurement and analysis of the aquaculture noise for *Larimichthys crocea* in the fiberglass fish tank[J]. *Marine Fisheries*, 2017, 39(3): 314-321 (in Chinese).
- [25] 施慧雄, 焦海峰, 尤仲杰, 等. 船舶噪声对鲈鱼和大黄鱼血浆皮质醇水平的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(14): 3760-3765.
- Shi H X, Jiao H F, You Z J, *et al.* The effect of ship noise on the secretion of cortisol in *Lateolabrax japonicus* and *Pseudosciaena crocea*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3760-3765 (in Chinese).
- [26] 吴常文, 徐梅英, 胡春春. 几种深水网箱养殖鱼类行为习性的观察[J]. *水产学报*, 2006, 30(4): 481-488.
- Wu C W, Xu M Y, Hu C C. Study on the behavioral characteristics of fishes in the deep water sea cage[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2006, 30(4): 481-488 (in Chinese).
- [27] 《福建鱼类志》编写组. 福建鱼类志-上卷 [M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1984.
- Compilation group of Ichthyology of Fujian. *Ichthyology of Fujian - Volume I* [M]. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1984 (in Chinese).
- [28] 林楠. 长江口水域仔稚鱼垂直分布研究[J]. *浙江海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(6): 502-508.
- Lin N. The vertical distribution of fish larvae and juveniles in the Changjiang River Estuarine[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2019, 38(6): 502-508 (in Chinese).
- [29] 吴亮, 吴洪喜, 陈婉情, 等. 光环境因子对豹纹鳃棘鲈幼鱼栖息特性的影响[J]. *水产科学*, 2016, 35(1): 14-20.
- Wu L, Wu H X, Chen W Q, *et al.* Effects of different types of light on habitat of *Plectropomus leopardus* juveniles[J]. *Fisheries Science*, 2016, 35(1): 14-20 (in Chinese).
- [30] 张迎秋, 许强, 徐勤增, 等. 海州湾前三岛海域底层鱼类群落结构特征[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(1): 156-168.

- Zhang Y Q, Xu Q, Xu Q Z, *et al.* Demersal fish community structure around the Qiansan Islets in Haizhou Bay[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(1): 156-168 (in Chinese).
- [31] 胡奎伟, 许柳雄, 陈新军, 等. 海洋遥感在渔场分析中的研究进展[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(6): 1079-1088. Hu K W, Xu L X, Chen X J, *et al.* Application of ocean remote sensing on fishing ground analysis: a review[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(6): 1079-1088 (in Chinese).
- [32] 求锦津, 王咏雪, 李铁军, 等. 舟山长白海域主要游泳动物生态位及其分化研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6759-6767. Qiu J J, Wang Y X, Li T J, *et al.* Study on the niche and differentiation of major nekton species in the Zhoushan Changbai sea area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6759-6767 (in Chinese).
- [33] 陈佳, 袁重桂, 阮成旭. 温度和盐度对大黄鱼生长性能的联合效应[J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 2013, 12(5): 35-39. Chen J, Yuan C G, Ruan C X. Combined effect of temperature and salinity on the growth of *Pseudosciaena crocea*[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2013, 12(5): 35-39 (in Chinese).
- [34] 李兵, 钟英斌, 吕为群. 大黄鱼早期发育阶段对盐度的适应性[J]. *上海海洋大学学报*, 2012, 21(2): 204-211. Li B, Zhong Y B, Lv W Q. Salinity tolerance of *Pseudosciaena crocea* during early development[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(2): 204-211 (in Chinese).
- [35] 水柏年. 大黄鱼幼鱼对若干环境因子的适应性试验[J]. *水产科技情报*, 2004, 31(3): 102-107. Shui B N. The Experiment on the adaptability of large yellow croaker *Pseudosciaena crocea* to some environmental factors[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2004, 31(3): 102-107 (in Chinese).
- [36] 郭禹, 章守宇, 程晓鹏, 等. 马鞍列岛海域渔业资源声学评估[J]. *水产学报*, 2020, 44(10): 1695-1706. Guo Y, Zhang S Y, Cheng X P, *et al.* Acoustic estimation of fisheries resources off Ma'an Archipelago[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(10): 1695-1706 (in Chinese).

Distribution detection of *Larimichthys crocea* cultured in large net-enclosure aquaculture by Small Unmanned Surface Vehicle

TIAN Yuxian¹, FENG Dejun¹, ZHANG Hua², GUI Fukun¹, QU Xiaoyu^{3*}

(1. National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

3. School of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: *Larimichthys crocea* is one of the four traditional marine economic fishes in China. It is rich in protein, vitamins and unsaturated fatty acids. It is a high-quality marine aquatic product and the main cultured fish species in China. The main aquaculture methods of *L. crocea* are nearshore net cage, offshore net cage and net enclosure in shallow sea. Among them, the large-scale net-enclosure aquaculture is a newly developed high-end marine aquaculture mode in recent years. Several net-enclosure facilities have been constructed in Shandong province, Fujian Province and other places in China for advantages in providing the right conditions for growth which are closer to the original environment for fishes. However, it is difficult to precisely determine the positions of the fishes and to feed and harvest *L. crocea* for large aquaculture spaces. Therefore, it is of great significance in application to study the distribution characteristics of *L. crocea* in large-scale net-enclosure aquaculture. In order to obtain the distribution characteristics of *L. crocea* in the large-scale net-enclosure aquaculture area, a multi-function Small Unmanned Surface Vehicle equipped with the sensors of sonar fish detector, temperature, salinity, pH, illumination and dissolved oxygen has been successfully developed. The fish detector (DE-FR01 200 kHz) consisted of the single beam energy converter which can integrate transmitting and receiving ultrasonic signals. The working principle is that the acoustic signal transmitted by the energy converter propagates in water, when encountering the medium different from water, part of the signal will be reflected back. According to the time interval between of signal transmission and receiving, it can be used to measure the distance between the target and the energy converter, then analyze and process the echo signal strength (hardness), and through 4G-Network communicates with shore-based system. Finally, the depth and hardness of the target are displayed in the software control terminal. Several field trials have been carried out in Taohua Island, Zhoushan City, Zhejiang Province. By analyzing the detected fish distribution position, water temperature, salinity and illumination of the marine environment in net-enclosure aquaculture area, we obtained the findings that, ① in terms of horizontal distribution, *L. crocea* is mainly distributed in the areas with rich reefs and slow water flow in the large-scale net-enclosure aquaculture area; ② in the vertical distribution direction, *L. crocea* is mainly distributed in the middle and lower layers of the aquaculture area with weighted relative depth of 0.6~0.9; ③ the overall changes of temperature, salinity, pH and dissolved oxygen are small in the net-enclosure aquaculture area. *L. crocea* is often distributed in areas with relatively weak illumination intensity of (5 921±2 702), (50 799±50 988), (5 990±542), (3 494±695), (6 836±4 761) and (15 395±5 531) lx. In this study, the distribution characteristics of *L. crocea* in net-enclosure aquaculture area and the influence of marine environment on its distribution were studied systematically for the first time. The research results may provide the basis for the site selection of operation platform, feeding management and catching design of *L. crocea*.

Key words: *Larimichthys crocea*; aquaculture; distribution characteristics; fish behavior; Small Unmanned Surface Vehicle

Corresponding author: QU Xiaoyu. E-mail: quxiaoyu@zjou.edu.cn

Funding projects: National Key Research and Development Project Funding (2019YFD0900904); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LQ18E090005); Zhoushan Science and Technology Projects (2022C01003); Basic Scientific Research Business Expenses of Scientific Research Institutes in Zhejiang Province (2019J00030)