

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.040

# 单品种淡水活鱼数量的被动声学估计

李路<sup>1,2</sup> 黄汉英<sup>1,2</sup> 涂群资<sup>1,2</sup> 赵思明<sup>3</sup> 熊善柏<sup>3</sup> 马章宇<sup>1</sup>

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;

3. 华中农业大学食品科技学院, 武汉 430070)

**摘要:** 针对单品种淡水活鱼数量估计问题, 以鲫鱼和鳊鱼为研究对象, 采用不同数量淡水鱼的被动水声信号作为样本, 通过4~6层小波包分解算法, 对比分析了样本的若干特征提取方案, 明确了鲫鱼水声信号特征提取方案的短时平均过零率+6层小波包分解频段能量, 而鳊鱼只需提取6层小波包分解频段能量作为其信号特征。根据不同样本集划分方法比较结果, 确定了鲫鱼样本集划分方法为 Rank-SPXY ( $m=10$ ), 鳊鱼为 Rank-SPXY ( $m=5$ )。利用竞争自适应重加权采样, 筛选出样本的关键特征, 并使用多元线性回归和偏最小二乘回归建立了若干淡水活鱼的数量估计模型, 结果表明: 多元线性回归模型的性能较好, 鲫鱼和鳊鱼数量估计模型的复相关系数分别为 0.835 和 0.893, 相对分析误差分别为 1.79 和 2.01。

**关键词:** 淡水鱼; 被动声信号; 数量估计; 回归分析

中图分类号: S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)03-0328-06

## Numbers Estimating of Single Species Freshwater Fish Using Passive Acoustic Signals

LI Lu<sup>1,2</sup> HUANG Hanying<sup>1,2</sup> TU Qunzi<sup>1,2</sup> ZHAO Siming<sup>3</sup> XIONG Shanbo<sup>3</sup> MA Zhangyu<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China

3. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to estimate numbers of single species freshwater fish, the passive acoustic signals of different quantities crucian carp and bream fish were used as samples. The acoustic signals of the freshwater fish were collected by the HTI-96-MIN standard hydrophone. The extracting schemes of sample characteristics were compared by using 4~6 layer wavelet packet decomposition algorithms. The short-time average zero-crossing rate and the frequency band energy calculated by 6 layer wavelet packet decomposition algorithm were determined as the signal characteristics of crucian carp. And the characteristics of bream fish were the frequency band energy calculated by 6 layer wavelet packet decomposition algorithm only. According to the research results of different sample sets dividing methods, the final sample sets dividing methods of crucian carp and bream fish were Rank-SPXY ( $m=10$ ) and Rank-SPXY ( $m=5$ ). Furthermore, the key characteristics of the samples were chosen by competitive adaptive reweighted sampling. Finally, some numbers estimate models of the freshwater fish were established with the multiple linear regression and partial least squares regression. The results indicated that the performance of the multiple linear regression model was better. The multiple correlation coefficients of the numbers estimate models of crucian carp and bream fish were 0.835 and 0.893, and the relative percent deviations were 1.79 and 2.01, respectively. The numbers estimate methods proposed had good performance. It provided a new means for monitoring the freshwater fish quantity.

**Key words:** freshwater fish; passive acoustic signal; numbers estimate; regression analysis

收稿日期: 2017-07-13 修回日期: 2017-08-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662015PY079, 2662015QC020)和国家现代农业产业技术体系专项(CARS-46-23)

作者简介: 李路(1979—), 男, 讲师, 博士, 主要从事农业电气化与自动化研究, E-mail: taiyangfeng@126.com

通信作者: 黄汉英(1964—), 女, 副教授, 主要从事农业电气化与自动化研究, E-mail: hhywmx@mail.hzau.edu.cn

## 0 引言

鱼类数量估计是渔业资源调查和水产养殖监测的重要内容。传统的鱼类数量估计手段主要有基于图像处理的鱼群计数<sup>[1-2]</sup>和基于主动声纳的鱼类生物量评估<sup>[3-4]</sup>。前者具有信息直观、技术成熟的特点,主要用于鱼苗繁育、工厂化养殖等场合,但其监测范围小,在水质浑浊时使用受限;后者具有探测范围广、不受能见度限制的特点,主要用于湖泊、海洋等大范围水域,但其设备昂贵,在小尺度水体中的混响严重,难以在普通鱼塘中推广应用。而以水听器为主要代表的被动水声传感器成本适中,能在浑浊水体中直接获取鱼声信号,非常适于进行塘养淡水鱼的状态监测。

目前,各国学者主要使用被动声学手段研究各种发声鱼类的发声机制<sup>[5-7]</sup>、发声特点<sup>[8-11]</sup>和典型行为下的发声规律<sup>[12-14]</sup>,针对常见淡水鱼的研究较少。文献[15]利用低信噪比的被动水声信号建立了3种常见淡水鱼种类识别模型,为淡水活鱼的状态监测提供了一种思路。但使用被动水声信号实现淡水鱼数量的估计具有较大难度,相关研究鲜见报道。

本文就单品种淡水活鱼数量估计问题,以被动水声信号处理技术为理论基础,使用短时平均能量、短时平均过零率和小波包分解频段能量作为备选信号特征,采用回归分析方法建立淡水鱼数量估计模型,为自动监测淡水鱼数量提供一种手段。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料和仪器

在市场随机选取鳊鱼、鲫鱼作为试验材料。鳊鱼每尾0.6~0.9 kg,鲫鱼每尾0.2~0.5 kg。

使用如图1所示的鱼类被动声学信息采集装置获取鱼声信号。该装置主要包括:2个HTI-96-MIN型标准水听器、1台SM2+声学记录仪、1台数据处理计算机和2个覆盖了隔音棉的水箱。其中试验水箱进行鱼声信号采集,对照水箱同步采集背景噪声,以便获取环境噪声特性。

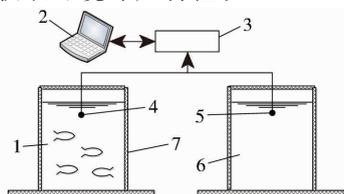


图1 鱼类被动声学信息采集装置

## 1.2 方法

### 1.2.1 信号采集

试验环境参数:水箱水量500 L,水温10~15℃,溶氧量7~8 mg/L,pH值7.2~7.5。

传感器参数:水听器位于水面下20 cm,采样频率4 000 Hz。

信号样本采集方法:分别将1~50尾鲫鱼或1~30尾鳊鱼放入试验水箱中,静置5 min,待鱼类状态稳定后进行采集,每个样本的采集时长为60 s。使用不同的试验材料反复进行上述采集过程,每种数量的淡水鱼各采集10~30个样本,共采集鲫鱼声音信号样本1 363个,鳊鱼声音信号样本294个。

### 1.2.2 特征提取

与语音信号类似,鱼声信号本质上也是一种非平稳随机信号,采用短时处理技术来提取鱼声信号特征较为可行。因此,本文使用短时平均能量、短时平均过零率作为鱼声信号的两种特征。短时平均能量能反映鱼声信号在不同时段的能量特征,其计算方法见文献[16]。过零率可以在一定程度上反映信号的频率特性。当离散时间信号相邻的2个样本点的正负号不同时,则认为信号穿过了“0”值,称为“过零”。统计单位时间内样点值改变符号的次数既可以得到短时平均过零率<sup>[17]</sup>。

由于鱼声信号本质上是一种持续时间较短的、具有突变性的、非平稳随机信号。使用传统的基于傅里叶变换的信号分析方法对鱼声信号进行处理有较大的局限。而小波包分解能获取信号时频局部特征的分析方法,能根据信号特性和分析要求自适应地选择相应频带与信号频谱相匹配,是一种比小波分解更为精细的分解方法,适用于鱼声信号特征的提取。本文采用小波包分解与重构算法提取鱼声信号的频段能量<sup>[18]</sup>。具体步骤:①选取合适的分解层数和小波基函数,对鱼声信号进行分解,为控制计算量,分解层数定为4、5、6,小波包基函数为db1小波。②利用分解后的节点系数对信号进行重构,得到各频段内的小波包重构信号。③求小波包分解各频段内重构信号的能量。

采用Z-score标准化对上述3类特征进行标准化处理,使其方差为1,均值为0,从而可将不同量纲的特征放在相同范围进行比较<sup>[19]</sup>。然后,利用标准化后的特征构建鱼声信号特征向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,当小波包分解层数为4、5、6时, $n$ 分别为18、34、66。特征向量中 $x_1$ 为短时平均能量, $x_2$ 为短时平均过零率, $x_3 \sim x_n$ 对应小波包分解频段能量。

### 1.2.3 样本集划分

训练集和验证集的划分比例为4:1。首先使用

Fig. 1 Fish passive acoustic signal acquisition system

1. 试验水箱 2. 数据处理计算机 3. 声学记录仪 4. 1号水听器  
5. 2号水听器 6. 对照水箱 7. 隔音棉

传统的 SPXY (Sample set partitioning based on joint  $X - Y$  distance) 法<sup>[20]</sup>进行样本集划分,但由于算法原理的局限,导致淡水鱼数量较少(1尾)和较多(30或50尾)的水声信号样本更多地被划分为训练集,而中等数量淡水鱼的水声信号样本则更多地进入验证集。为使每种数量的淡水鱼水声信号样本中训练集和验证集的比例一致,本文提出了一种划分样本集的新方法:Rank-SPXY法。该方法由2部分组成,首先是Rank部分,即将样本按因变量(活鱼尾数)的升序排序,然后将样本等分为 $m$ 份;其次是SPXY部分,即在等分的每个区间内采用SPXY法选取出训练集,其余的样本自动归为验证集。当 $m=1$ 时,此方法即为SPXY法;当 $m$ 较大时,得到的训练集更加均匀,但特征值的代表性有所下降。为了对比不同 $m$ 取值对划分效果的影响, $m$ 分别取5和10对声音信号样本集进行划分,并建立估计模型,通过比较模型的性能,确定哪种取值更佳。

#### 1.2.4 特征筛选

采用竞争自适应重加权采样(Competitive adaptive reweighted sampling, CARS)法对鱼声信号特征进行筛选。在筛选过程中,每次通过CARS技术保留偏最小二乘回归(Partial least squares regression, PLSR)模型中偏回归系数绝对值大的特征,而将绝对值小的偏回归系数默认为零,从而去除偏回归系数小的特征,获得一系列的鱼声信号特征子集,并对每个子集进行10折交叉验证建模,选择模型交叉验证均方差(Root mean square error of cross validation, RMSECV)最小的信号特征子集。

#### 1.2.5 模型的建立及验证

在不同的特征提取和样本集划分方法条件下,

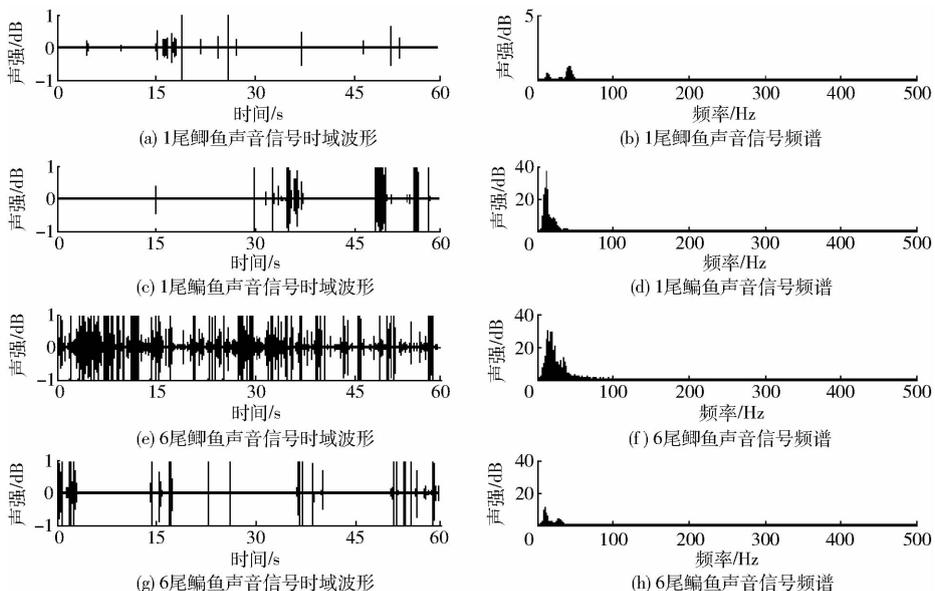


图2 不同数量鲫鱼和鳊鱼声音信号的时域和频域波形图

根据训练集中样本的信号特征,采用多元线性回归(Multiplelinear regression, MLR)和PLSR建立若干个淡水鱼的数量估计模型,并对模型性能进行比较,确定合理的建模方案。

MLR是用来确定2个及2个以上变量间相互联系的定量关系的一种统计分析方法,其利用线性来拟合多个自变量和一个因变量之间的关系,从而得到MLR模型的各个参数<sup>[21]</sup>。PLSR是一种多元统计分析方法,常用于多因变量对多自变量回归建模中,特别是在观察值数量少以及存在多重相关性等问题时,该方法具有良好的性能<sup>[22]</sup>。

使用验证集样本,对选定的两种淡水鱼的数量估计模型进行检验,采用复相关系数 $R$ 、定标标准差(Root mean square error of calibration, RMSEC)、校验标准差(Root mean square error of prediction, RMSEP)和相对分析误差(Relative percent deviation, RPD)来评价模型的性能。

## 2 结果分析

图2为经过滤波消噪后不同数量鲫鱼和鳊鱼水声信号样本的典型时域、频域波形<sup>[15]</sup>。可见,不同种类、不同数量的淡水鱼,其水声信号的时域、频域波形都有较大区别。因此,不同种类淡水鱼的数量估计模型有一定差异,模型的品种适应性和准确性相矛盾。

图3为提取出的鲫鱼水声信号特征随数量的变化趋势。图中的信号特征共66个,包括短时平均能量、短时平均过零率、6层小波包分解频段能量,每条曲线代表了一个特征变化规律。从图3可看出,随着鲫鱼数量的增加,信号特征值总体呈

现上升趋势,但并不是严格单调递增,说明信号特征与鲫鱼数量间存在一定的相关性,但定量关系较复杂,需要使用合理的建模方法才能得到两者准确的函数关系。

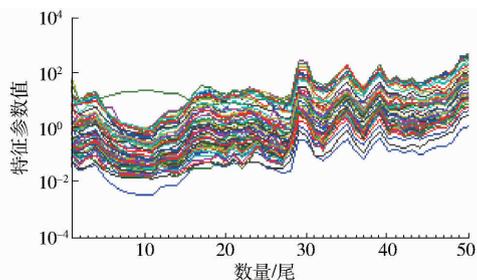


图 3 鲫鱼水声信号特征随数量的变化趋势

Fig.3 Characteristics of crucian carp acoustic signals varied with quantity

表 1、2 为不同样本集划分方法所获得的两种淡水鱼水声信号样本集的划分结果。可见,采用 SPXY 法的划分结果中,训练集和验证集的平均值和标准差均相差较大,第 29 ~ 50 条鲫鱼的声音样本全部划分为训练集,样本集划分不均匀。而 Rank - SPXY 法所划分的验证集的数据范围包含在训练集的数据范围内,并且验证集平均值与训练集十分接近,因此选择 Rank - SPXY 法划分样本集更加合理。在采用 Rank - SPXY 法对样本集进行划分时,通过比较  $m = 5$  和  $m = 10$  时验证集的标准差可知,采用  $m = 10$  对样本集的划分更加均匀,但  $m$  较大也会影响特征的代表性。

表 3 为不同小波包分解层数和不同样本集划分方法的情况下,信号特征筛选结果和淡水鱼数量估

表 1 鲫鱼水声信号样本集划分结果

Tab.1 Sample set partitioning division results of crucian carp

| 样本集划分方法                  | 训练集   |        |        |        | 验证集 |        |        |        |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|
|                          | 样本数   | 数量     | 平均值    | 标准差    | 样本数 | 数量     | 平均值    | 标准差    |
| SPXY                     | 1 089 | 1 ~ 50 | 29.755 | 13.383 | 274 | 1 ~ 28 | 10.398 | 6.218  |
| Rank - SPXY ( $m = 5$ )  | 1 089 | 1 ~ 50 | 26.011 | 14.710 | 274 | 1 ~ 48 | 25.277 | 13.79  |
| Rank - SPXY ( $m = 10$ ) | 1 089 | 1 ~ 50 | 25.977 | 14.575 | 274 | 1 ~ 48 | 25.412 | 14.356 |

表 2 鳊鱼水声信号样本集划分结果

Tab.2 Sample set partitioning division results of bream

| 样本集划分方法                  | 训练集 |        |        |       | 验证集 |        |        |       |
|--------------------------|-----|--------|--------|-------|-----|--------|--------|-------|
|                          | 样本数 | 数量     | 平均值    | 标准差   | 样本数 | 数量     | 平均值    | 标准差   |
| SPXY                     | 234 | 1 ~ 30 | 15.868 | 8.478 | 60  | 1 ~ 30 | 14.197 | 9.270 |
| Rank - SPXY ( $m = 5$ )  | 234 | 1 ~ 30 | 15.679 | 8.586 | 60  | 1 ~ 30 | 15.433 | 9.116 |
| Rank - SPXY ( $m = 10$ ) | 234 | 1 ~ 30 | 15.653 | 8.646 | 60  | 1 ~ 30 | 15.533 | 8.894 |

表 3 信号特征筛选结果和估计模型的 R 值

Tab.3 Selecting results of signal characteristics and correlation coefficient of estimation model

| 小波包分解层数及样本集<br>划分方法            | 水声信号特征个数 |    | MLR 模型 R 值 |       | PLSR 模型 R 值 |       |
|--------------------------------|----------|----|------------|-------|-------------|-------|
|                                | 鲫鱼       | 鳊鱼 | 鲫鱼         | 鳊鱼    | 鲫鱼          | 鳊鱼    |
| 4 层 + Rank - SPXY ( $m = 5$ )  | 8        | 5  | 0.786      | 0.892 | 0.686       | 0.853 |
| 4 层 + Rank - SPXY ( $m = 10$ ) | 8        | 6  | 0.783      | 0.886 | 0.697       | 0.844 |
| 5 层 + Rank - SPXY ( $m = 5$ )  | 12       | 4  | 0.810      | 0.885 | 0.687       | 0.846 |
| 5 层 + Rank - SPXY ( $m = 10$ ) | 11       | 4  | 0.808      | 0.877 | 0.696       | 0.829 |
| 6 层 + Rank - SPXY ( $m = 5$ )  | 13       | 5  | 0.827      | 0.893 | 0.690       | 0.789 |
| 6 层 + Rank - SPXY ( $m = 10$ ) | 18       | 5  | 0.835      | 0.884 | 0.700       | 0.768 |

计模型的 R 值对比。总体上来看,CARS 能减少水声信号特征数量,有效降低模型复杂度。从所建模型的 R 值来看,MLR 模型比 PLSR 模型的性能略好。对于鲫鱼数量估计模型,6 层 + Rank - SPXY ( $m = 10$ ) 得到的样本集建立的 MLR 估计模型的 R 最高。对于鳊鱼数量估计模型,6 层 + Rank - SPXY ( $m = 5$ ) 得到的样本集建立的 MLR 估计模型的 R 最高。因此,两种淡水鱼水声信号的小波包分解层数都为 6;鲫鱼声音信号样本集划分方法为 Rank - SPXY

( $m = 10$ );鳊鱼声音信号样本集划分方法为 Rank - SPXY ( $m = 5$ );两种淡水鱼数量估计模型的建模方法均选用 MLR。

按照上述模型构建方案方程,分别建立鲫鱼和鳊鱼的数量估计模型。鲫鱼模型的参数见表 4,其中回归常数项  $b = 40.071$ ,  $x_i$  为鲫鱼声音信号特征经 Z - score 标准化预处理和特征筛选后的特征值,  $a_i$  为各特征值的偏回归系数。模型的 R 值为 0.835, RMSEC 为 10.096,说明模型具有较好的稳定

性和预测性。由表 4 可知,短时平均能量(即  $x_1$ )没有参与建模过程,因为该特征与鲫鱼数量的相关性较小,在特征筛选环节已经被剔除。而  $x_{35}$ 、 $x_{47}$ 、 $x_{50}$  3 个特征的偏回归系数绝对值较大,其  $t$  值相对较大, $P$  值均为零,说明它们对估计模型的影响比较显著,其对应的鲫鱼声音信号特征频段为 256 ~ 264 Hz、352 ~ 360 Hz、376 ~ 384 Hz。

表 4 鲫鱼数量估计模型的参数

Tab. 4 Parameters of crucian carp number estimation model

| 序号 | $x_i$    | 偏回归系数 $a_i$ | $t$     | $P$   |
|----|----------|-------------|---------|-------|
| 1  | $x_2$    | -3.095      | -19.098 | 0     |
| 2  | $x_4$    | 1.710       | 3.067   | 0.002 |
| 3  | $x_5$    | -1.981      | -6.192  | 0     |
| 4  | $x_6$    | -1.768      | -4.974  | 0     |
| 5  | $x_7$    | 2.349       | 3.663   | 0     |
| 6  | $x_{11}$ | -10.883     | -4.972  | 0     |
| 7  | $x_{12}$ | 7.301       | 3.740   | 0     |
| 8  | $x_{16}$ | -1.306      | -3.179  | 0.002 |
| 9  | $x_{18}$ | -2.187      | -3.404  | 0.001 |
| 10 | $x_{25}$ | 19.417      | 4.762   | 0     |
| 11 | $x_{28}$ | 9.734       | 4.146   | 0     |
| 12 | $x_{35}$ | 70.133      | 3.904   | 0     |
| 13 | $x_{43}$ | -25.264     | -2.288  | 0.022 |
| 14 | $x_{47}$ | -79.860     | -5.964  | 0     |
| 15 | $x_{50}$ | -40.098     | -4.763  | 0     |
| 16 | $x_{55}$ | 26.155      | 3.279   | 0.001 |
| 17 | $x_{61}$ | -24.005     | -2.052  | 0.040 |
| 18 | $x_{62}$ | 31.320      | 2.861   | 0.004 |

鳊鱼数量估计模型的参数见表 5,其中回归常数项  $b = 4.384$ 。模型的  $R$  值为 0.893, RMSEC 为 3.83,说明模型的稳定性和预测性较好。由于短时平均能量和短时平均过零率(即  $x_1$  和  $x_2$ )已经被 CARS 法剔除,故它们没有参与建模过程,由表 5 可

知,  $x_{14}$ 、 $x_{24}$  两个特征的偏回归系数绝对值较大,其  $t$  值相对较大, $x_{18}$  的  $P$  值最大为 0.034,小于 0.05,说明它们对估计模型的影响比较显著。 $x_{14}$ 、 $x_{24}$  对应的鳊鱼声音信号特征频段为 88 ~ 96 Hz、168 ~ 178 Hz。

表 5 鳊鱼数量估计模型的参数

Tab. 5 Parameters of bream number estimation model

| 序号 | $x_i$    | 偏回归系数 $a_i$ | $t$    | $P$   |
|----|----------|-------------|--------|-------|
| 1  | $x_5$    | 1.415       | 2.628  | 0.009 |
| 2  | $x_9$    | 1.710       | 4.406  | 0     |
| 3  | $x_{14}$ | -1.981      | 7.732  | 0     |
| 4  | $x_{18}$ | -1.768      | 2.139  | 0.034 |
| 5  | $x_{24}$ | 2.349       | -2.358 | 0.019 |

使用验证集样本,对上述两种淡水鱼的数量估计模型进行检验。鲫鱼数量估计模型验证的  $R$  为 0.816, RMSEP 为 8.015, RPD 为 1.79; 鳊鱼数量估计模型验证的  $R$  为 0.865, RMSEP 为 4.54, RPD 为 2.01。结果表明,所建立的模型能对两种淡水鱼的活体数量进行较准确的估计。

### 3 结论

(1) 鲫鱼水声信号特征的提取方案为短时平均过零率 + 6 层小波包分解频段能量,鳊鱼为只需提取 6 层小波包分解频段能量作为其信号特征。

(2) 鲫鱼样本集划分方法为 Rank - SPXY ( $m = 10$ ), 鳊鱼为 Rank - SPXY ( $m = 5$ )。

(3) 经过特征筛选,鲫鱼水声信号特征为 18 个,其中 256 ~ 264 Hz、352 ~ 360 Hz、376 ~ 384 Hz 频段能量对鲫鱼的数量估计起到关键作用;鳊鱼水声信号特征为 5 个,其中 88 ~ 96 Hz、168 ~ 178 Hz 频段能量对鳊鱼的数量估计起到关键作用。

(4) MLR 法所建立的模型性能较好。鲫鱼数量估计模型的  $R$  为 0.835, RPD 为 1.79; 鳊鱼数量估计模型的  $R$  为 0.893, RPD 为 2.01。

### 参 考 文 献

- FAN L Z, LIU Y. Automate fry counting using computer vision and multi-class least squares support vector machine [J]. Aquaculture, 2013, 380 - 383: 91 - 98.
- 王文静,徐建瑜,杜秋菊. 基于计算机视觉的鱼苗自动计数系统研究[J]. 渔业现代化,2016, 43(3):34 - 38,73. WANG Wenjing, XU Jianyu, DU Qiuju. Study on a computer vision based automatic counting system of fries [J]. Fishery Modernization, 2016, 43(3):34 - 38, 73. (in Chinese)
- DJEMALI I, GUILLARD J, YULE D L. Seasonal and diel effects on acoustic fish biomass estimates; application to a shallow reservoir with untargeted common carp (Cyprinus carpio) [J]. Marine and Freshwater Research, 2017, 68(3): 528 - 537.
- 杨志,唐会元,朱迪,等. 三峡水库 175 m 试验性蓄水期库区及其上游江段鱼类群落结构时空分布格局[J]. 生态学报, 2015, 35(15):5064 - 5075. YANG Z, TANG H Y, ZHU D, et al. Spatiotemporal patterns of fish community structures in the Three Gorges Reservoir and its upstream during the 175-m-deep impoundment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5064 - 5075. (in Chinese)
- PARMENTIER E, FINE M L, MOK H K, et al. Sound production by a recoiling system in the pempheridae and terapontidae [J]. Journal of Morphology, 2016, 277(6): 717 - 724.

- 6 PARMENTIER E, TOCK J, FALGUIERE J C. Sound production in *sciaenopsocellatus*: preliminary study for the development of acoustic cues in aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2014, 432: 204 – 211.
- 7 KAATZ I M, STEWART D J. Bioacoustic variation of swimbladder disturbance sounds in Neotropical doradoid catfishes (Siluriformes: Doradidae, Auchenipteridae): Potential morphological correlates[J]. *Current Zoology*, 2012, 58(1): 171 – 188.
- 8 TELLECHEA J S, FINE M L, NORBIS W. Passive acoustic monitoring, development of disturbance calls and differentiation of disturbance and advertisement calls in the Argentine croaker *Umbrinacanosai* (Sciaenidae) [J]. *Journal of Fish Biology*, 2017, 90(4): 1631 – 1643.
- 9 CASARETTO L, PICCIULIN M, HAWKINS A D. Seasonal patterns and individual differences in the calls of male haddock *Melanogrammus aeglefinus* [J]. *Journal of Fish Biology*, 2015, 87(3): 579 – 603.
- 10 FINE M L, WAYBRIGHT T D. Grunt variation in the oyster toadfish *opsanus tau*: effect of size and sex [J]. *PeerJ*, 2015, 3(Supp.): 1 – b1.
- 11 陈功, 王平波, 常睿, 等. 稀疏特征在微弱被动鱼声检测中的应用[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(4): 48 – 53.  
CHEN Gong, WANG Pingbo, CHANG Rui, et al. Research on detection of weak passive fish acoustic by sparse decomposition feature[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(4): 48 – 53. (in Chinese)
- 12 MONTIE E W, HOOVER M, KEHRER C, et al. Acoustic monitoring indicates a correlation between calling and spawning in captive spotted seatrout (*Cynoscion nebulosus*) [J]. *PeerJ*, 2017, 5: 2944.
- 13 SCHARER M T, NEMETH M I, ROWELL T J, et al. Sounds associated with the reproductive behavior of the black grouper (*Mycteroperca bonaci*) [J]. *Marine Biology*, 2014, 161(1): 141 – 147.
- 14 FINE M L, THORSON R F. Use of passive acoustics for assessing behavioral interactions in individual toadfish [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2008, 137(2): 627 – 637.
- 15 李路, 涂群资, 黄汉英, 等. 基于被动水声信号的淡水鱼种类识别[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 166 – 171.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170818&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170818&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.018.  
LI Lu, TU Qunzi, HUANG Hanying, et al. Freshwater fish identification using passive underwater acoustic signals [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 166 – 171. (in Chinese)
- 16 马莎莎, 戴曙光, 穆平安. 基于短时能量的循环 AMDF 基音检测算法[J]. *计算机仿真*, 2014, 31(7): 278 – 282.  
MA Shasha, DAI Shuguang, MU Ping'an. Circular AMDF pitch detection algorithm based on short-time energy [J]. *Computer Simulation*, 2014, 31(7): 278 – 282. (in Chinese)
- 17 尹岩岩, 殷业, 罗汉文, 等. 基于短时能零熵的端点检测方法[J]. *计算机仿真*, 2012, 29(11): 408 – 411.  
YIN Yanyan, YIN Ye, LUO Hanwen, et al. Endpoint detection algorithm based on short-term energy-zero spectral entropy [J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(11): 408 – 411. (in Chinese)
- 18 杜伟东, 李海森, 魏玉阔, 等. 基于 SVM 的多方位声散射数据协作融合鱼分类与识别[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 268 – 275. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150339&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150339&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.039.  
DU Weidong, LI Haisen, WEI Yukuo, et al. Multi-azimuth acoustic scattering data cooperative fusion using SVM for fish classification and identification [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 268 – 275. (in Chinese)
- 19 吴利敏. 近红外光谱法快速检测某些中药及中成药品质的应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.  
WU Limin. Study on rapid detection for the quality of some herbal medicines and chinese patent medicines by near infrared spectroscopy [D]. Chongqing: Southwest University, 2013. (in Chinese)
- 20 展晓日, 朱向荣, 史新元, 等. SPXY 样本划分法及蒙特卡罗交叉验证结合近红外光谱用于橘叶中橙皮苷的含量测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(4): 964 – 968.  
ZHAN Xiaori, ZHU Xiangrong, SHI Xinyuan, et al. Determination of hesperidin in tangerine leaf by near-infrared spectroscopy with SPXY algorithm for sample subset partitioning and montecarlo cross validation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 964 – 968. (in Chinese)
- 21 付勇, 汪立今, 柴凤梅, 等. 多元线性回归和逐步回归分析在白石泉 Cu - Ni 硫化物矿床研究中的应用[J]. *地学前缘*, 2009, 16(1): 373 – 380.  
FU Yong, WANG Lijin, CHAI Fengmei, et al. The application of multi-variate linear regression combined with stepwise regression analysis for Cu - Ni sulfide deposit of Baishiquan [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(1): 373 – 380. (in Chinese)
- 22 王海江, 张花玲, 任少亭, 等. 基于高光谱反射特性的土壤水盐状况预测模型研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(7): 133 – 138. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20140721&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140721&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.021.  
WANG Haijiang, ZHANG Hualing, REN Shaoting, et al. Prediction model of soil water-salt based on hyperspectral reflectance characteristics [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 133 – 138. (in Chinese)