

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.037

# 基于单片机系统和生物阻抗的鱼体贮藏方式检测技术

沈慧星<sup>1</sup> 陶涵斌<sup>2</sup> 潘慧瑶<sup>2</sup> 张天太<sup>2</sup> 滕卓然<sup>1</sup> 周梅<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学理学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对鱼体贮藏方式(冰鲜与冷冻)鉴别问题,提出一种基于单片机系统和生物阻抗的鱼体贮藏方式快速检测技术,并测试分析了冰鲜和解冻的鲫鱼、鲤鱼在信号频率为 1 kHz 和 16 kHz 时的阻抗相对变化率。结果表明,冰鲜鱼的阻抗相对变化率大于 100%,而解冻鱼的阻抗相对变化率小于 100%。利用 Arduino 单片机系统、定值电阻和高频交流电压传感器等电路元件搭建了电路检测系统,将鱼体接入检测系统后,分别获取交流信号频率为 1 kHz 和 16 kHz 时的定值电阻和鱼体两端的电压信息,计算频率从 1 kHz 到 16 kHz 变化时鱼体阻抗的相对变化率,利用阻抗相对变化率鉴别冰鲜鱼和解冻鱼,并在显示终端上输出检测结果。本文提出的检测技术性能良好、操作简单便捷,在检测过程中对鱼体无损伤,且识别过程准确高效,检测准确率可达 95%。

**关键词:** 冰鲜鱼; 解冻鱼; 鱼体贮藏方式; 单片机系统; 生物阻抗; 自动检测

中图分类号: TS254.4; TP368.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)01-0333-05 OSID: 

## Detection Technology for Fish Storage Method Based on Single-chip Computer System and Biological Impedance

SHEN Huixing<sup>1</sup> TAO Hanxiao<sup>2</sup> PAN Huiyao<sup>2</sup> ZHANG Tiantai<sup>2</sup> TENG Zhuoran<sup>1</sup> ZHOU Mei<sup>1</sup>

(1. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of identification of fish storage methods (chilled and frozen), a technique for rapid detection of fish storage methods was proposed based on a single-chip computer system and biological impedance. The relative changing rate of impedance of chilled and thawed crucian and carp at the signal frequency of 1 kHz and 16 kHz was measured and analyzed. The results showed that the relative changing rate of impedance of chilled fish was more than 100%, while the relative changing rate of impedance of thawed fish was less than 100%. Arduino microcontroller system, resistors and high frequency AC voltage sensors were used to build circuit detection system. Firstly, the fish was connected to the detection system and the voltage information across the resistor and the voltage information across the fish were obtained when the AC signal frequency was 1 kHz and 16 kHz, respectively. Then, the relative changing rate of the impedance of the fish body at the signal frequency of 1 kHz and 16 kHz was calculated. Finally, the relative changing rate of impedance was used to identify chilled fish and thawed fish, and the detection results was output on the display terminal. This technology had good performance, simple and convenient operation, no damage to the fish during the detection process, and the identification process was accurate and efficient, and the detection accuracy rate can reach 95%. This technology solved the problem of difficulty in identifying chilled fish and thawed fish, and provided a idea for the detection of fish storage methods.

**Key words:** chilled fish; thawed fish; fish storage methods; single-chip computer system; biological impedance; automatic detection

收稿日期: 2020-03-21 修回日期: 2020-04-22

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-45)

作者简介: 沈慧星(1966—),女,高级工程师,主要从事水产品物化特性研究,E-mail: huixingshen@163.com

通信作者: 周梅(1973—),女,教授,主要从事宽禁带半导体材料与器件研究,E-mail: mmmzhou@126.com

## 0 引言

目前,市场上出售的冷藏鱼有冰鲜鱼和解冻鱼两种。冰鲜鱼是指捕获后一直保藏在 $4^{\circ}\text{C}$ 以下而未冻结的鱼,通常贮藏时间在10 d以内;解冻鱼是指捕获后经过冷冻贮藏( $-18^{\circ}\text{C}$ 以下)一段时间再解冻的鱼,鱼在冷冻贮藏时可以贮藏6~12个月,具有较长的贮藏期<sup>[1]</sup>。冰鲜鱼的肉质风味和口感较佳,且营养价值较高,通常市场价格高于解冻鱼<sup>[2-3]</sup>。一些经销商为了追求利润,将解冻鱼作为冰鲜鱼销售,严重损害了消费者利益。因此有必要对冰鲜鱼和解冻鱼进行鉴别<sup>[4]</sup>。人工鉴别这两种鱼较为困难,且目前还没有快速有效的鉴别方法。因此,快速、有效地鉴别冰鲜鱼和解冻鱼成为急需解决的技术问题。

关于鱼类等水产品的品质检测国内外已有学者进行了相关研究<sup>[5-14]</sup>。这些研究能较为直观地检测鱼类等水产品的鲜度,但是大多是从生物化学角度出发<sup>[15-18]</sup>,对鱼体贮藏方式(冷冻和冰鲜)的检测尚未见报道。

鱼体冻结后,由于冰晶的形成而挤压细胞,造成鱼体部分细胞的破裂,导致解冻后部分液汁流失。而液汁中含有丰富的营养物质和风味物质(如游离氨基酸、肌苷酸等物质),因此导致鱼的口感和营养品质显著降低<sup>[19-20]</sup>。与解冻鱼不同,冰鲜鱼鱼体一直贮藏在 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$ 的条件下,鱼体没有经过冻结,较好地保持了鱼肉的营养物质和风味物质。

生物体由大量细胞构成,细胞之间的液体可视为电介质。当直流或低频电流施加于鱼体时,电流主要流经细胞外液;当频率增加,部分电流将穿过细胞膜流经细胞内液,阻抗变小。阻抗随频率的增大而减小,反映了鱼体细胞膜的电容特性<sup>[21-22]</sup>。因此,可以通过鱼体的阻抗判别鱼体的贮藏方式。

由于单片机系统具有集成度高、使用方便、可靠性高、处理能力强、运算速度快等优势,本文采用单片微控制器系统 Arduino 开发板作为中央处理器,提出一种基于 Arduino 单片机系统和生物阻抗的鱼体贮藏方式检测技术。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用鱼体于2019年6月10日在北京市农贸市场和大型超市购买,有鲫鱼和鲤鱼两个品种。每条鱼质量为200~1 000 g,体长为16~45 cm。将鲜活鱼击打致死后在 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$ 的环境中贮藏9 d,以此作为试验中的冰鲜鱼。将鲜活鱼击打致死后置于

$-18^{\circ}\text{C}$ 冰箱中分别冷冻1、5、10、30 d,再在 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$ 的环境中解冻,以此作为试验中的解冻鱼。

### 1.2 检测系统设计

本试验中采用的单片机系统是 Arduino 单片机系统。Arduino 是一款开源电子原型平台,包含硬件(各种型号的 Arduino 板)和软件(Arduino IDE)。Arduino 单片机系统的核心是 ATMEGA 系列单片机,搭配一些周边器件,安装在印刷电路板上,能够独立完成设定的功能。

该检测系统如图1所示,由信号发生电路、测量电路、信号采集电路、中央处理器、显示终端等5个模块构成。

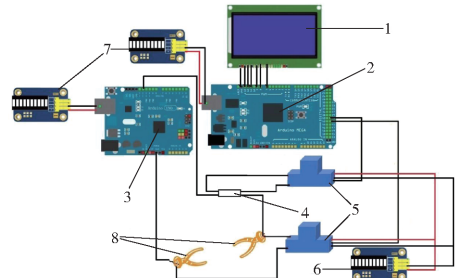


图1 检测系统结构原理图

Fig.1 Schematic of automatic detection system structure

1. LCD 显示屏 2. Arduino Mega 2560 开发板 3. Arduino Uno 开发板 4. 定值电阻 5. 高频交流电压传感器 6. 12 V 直流电源 7. 5 V 直流电源 8. 金属夹

信号发生电路:由 Arduino Uno 开发板构成,编写程序可利用 Arduino Uno 开发板产生不同频率的 PWM(脉冲宽度调制)波,作为整个系统的输入信号。

测量电路:由 $200\ \Omega$ 定值电阻、金属夹、导线等构成,与信号发生电路串联在一起,当鱼接入金属夹两端时,电路形成通路,产生电流。

信号采集电路:由两个高频交流电压传感器构成,将两个高频交流电压传感器分别并联在定值电阻和鱼体两端,可测量定值电阻和鱼体两端的高频电压信息。

中央处理器:由 Arduino Mega 2560 开发板构成,该模块与高频交流电压传感器相连,可获取定值电阻和鱼体两端的电压信息,并按照事先烧录的程序进行相应计算。

显示终端:由 LCD 显示屏构成,该模块与 Arduino Mega 2560 开发板相连,获取开发板传输的结果信息,将判断结果显示在显示屏上。

其中,将高频交流电压传感器与 Arduino Mega 2560 开发板共地连接,保证传感器中的信息能够传输到 Arduino Mega 2560 开发板中。用12 V 直流电源给高频交流电压传感器供电,用5 V 直流电源给

Arduino Uno 和 Arduino Mega 2560 开发板供电, 保证系统电路的正常工作。12 V 和 5 V 直流电源的按钮开关可控制整个系统。

### 1.3 数据采集与处理

利用 1.2 节设计的检测系统, 利用 Arduino Uno 开发板产生不同频率的输入信号, 采集不同频率下的鱼体阻抗, 并对数据进行处理和分析。关于输入信号频率范围的选取, 大量的预试验表明: 直流和低频电流很难穿过细胞膜, 最低频率选为 1 kHz 比较合适; 频率超过 16 kHz 时, 鱼体的阻抗随频率增大变化不明显, 频率越高对仪器的要求也越高。因此基于鱼体的导电机理, 输入信号的频率范围选为 1~16 kHz 最为合适。对于鱼体阻抗的测量, 采用伏安法, 将待测鱼体接入检测系统后, 通过两个高频交流电压传感器分别采集鱼体和定值电阻两端电压信息, 并传送到 Arduino Mega 2560 单片机系统中。由欧姆定律算出鱼体阻抗, 并将结果显示在 LCD 显示屏上。数据采集与处理的具体步骤如下: 将鱼体接入检测系统, 并打开电源开关; 利用 Arduino Uno 开发板产生 1~16 kHz 的交流信号, 根据 LCD 显示屏上显示的结果记录不同频率下的鱼体阻抗, 并描绘出阻抗与频率的关系曲线; 计算并记录当频率从 1 kHz 到 16 kHz 时鱼体阻抗的相对变化率。阻抗相对变化率的计算公式为:  $(Z_L - Z_H)/Z_H$ , 其中,  $Z_L$  和  $Z_H$  分别表示电路频率为 1 kHz 和 16 kHz 时所对应的鱼体阻抗。

### 1.4 检测技术及方法

按照 1.3 节所述方法对数据进行计算处理并绘图之后, 分析并总结图中规律, 并以此规律进一步设计单片机系统, 改善程序, 最终实现一种基于单片机系统和生物阻抗的鱼体贮藏方式检测技术。

该鱼体贮藏方式的检测步骤如下: 用金属夹夹住待测鱼两端, 金属夹紧贴于待测鱼表面, 使鱼体接入电路; 打开 12 V 和 5 V 直流电源开关, 使电路通电; 利用信号发生电路分别产生频率为 1 kHz 和

16 kHz 的交流信号; 信号采集电路分别采集定值电阻和鱼体两端的电压信号; 中央处理器接收信号采集电路收集的电压信号, 按照事先烧录的程序, 进行分析计算, 得出鱼体阻抗的相对变化率, 并与设定的参数进行比较, 最终判定出鱼的贮藏方式, 其中, 设定的参数由 1.3 节的试验及分析结果确定; 中央处理器将信息传输给显示终端, 仪器顶部的显示终端显示出检测结果。

该检测技术的优点是: 将鱼体接入电路后即可实现检测, 对鱼体没有损伤; 用编程代替复杂的人工计算, 结果更加稳定可靠; 利用单片机搭建电路系统, 实现了自动检测, 方便快捷、简单实用。

## 2 结果与分析

数据采集试验中对鲫鱼和鲤鱼两个品种进行了检测, 为排除其他因素干扰, 使得试验结果更加准确, 分别测定了冰鲜 1、3、5、7、9 d 和冰冻 1、5、10、30 d 后解冻的鲫鱼和鲤鱼在不同频率下的鱼体阻抗。对采集的数据进行计算处理、绘图, 分析并总结规律, 进一步设计单片机系统, 改善程序, 得到最终的鱼体贮藏方式检测系统。用最终的检测系统检测另外 200 条鱼的贮藏方式, 其中冰鲜鲤鱼、解冻鲤鱼、冰鲜鲫鱼、解冻鲫鱼各 50 条。将检测结果与实际贮藏方式进行对比, 计算出检测的准确率, 并对该方法的可靠性进行分析。

### 2.1 数据结果分析

不同贮藏时间解冻和冰鲜鱼的阻抗-频率曲线如图 2 所示。

由图 2 可知, 无论是冰鲜还是解冻鱼, 在同一频率下的阻抗均随着贮藏时间的延长而降低; 在同一贮藏时间下, 解冻与冰鲜鱼的阻抗均随着频率的增大而减小, 但冰鲜鱼阻抗随频率的减小幅度明显高于解冻鱼。因此, 按照 1.3 节和 1.4 节的步骤, 本试验进一步研究阻抗随频率变化的幅度, 即阻抗的相对变化率。图 3 是不同品种的冰鲜鱼和解冻鱼的阻

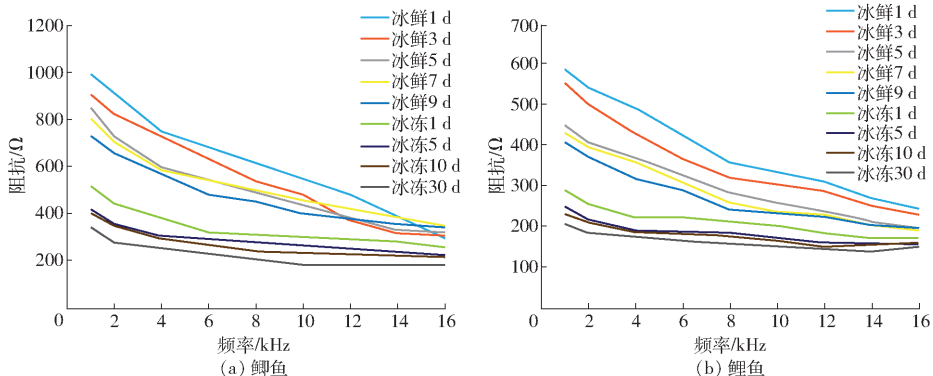


图 2 不同贮藏时间解冻鱼和冰鲜鱼的阻抗-频率曲线

Fig. 2 Impedance - frequency curves of thawed fish and chilled fish at different storage times

抗相对变化率-贮藏时间关系曲线。

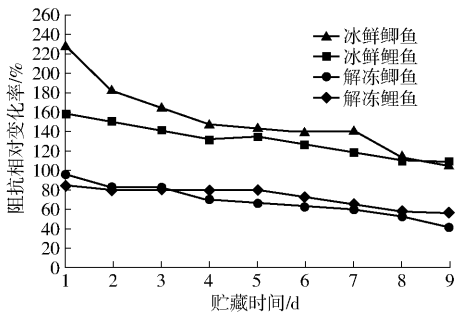


图3 不同品种的冰鲜鱼和解冻鱼的阻抗相对变化率-贮藏时间的关系曲线

Fig.3 Relationship curves between relative changing rate of impedance and storage time of different kinds of chilled fish and thawed fish

由图3可知,虽然不同种类鱼的阻抗相对变化率不同,但从总体上看,冰鲜鱼的阻抗相对变化率均明显大于解冻鱼的阻抗相对变化率。冰鲜鱼的阻抗相对变化率均大于100%,而解冻鱼的阻抗相对变化率均小于100%。因此,可以以鱼体的阻抗相对变化率是否大于100%来鉴别鱼的贮藏方式,若鱼体的阻抗相对变化率大于100%则为冰鲜鱼,若鱼体的阻抗相对变化率小于100%则为解冻鱼。

## 2.2 系统检测技术流程

根据1.4节的检测方法,并结合2.1节得出的结论,本试验进一步完善系统和程序。其中,中央处理器接收到电压信号后,计算出频率从1 kHz到16 kHz时鱼体阻抗的相对变化率,并与100%进行比较,进而判断出是冰鲜鱼还是解冻鱼并输出最终结果。完整的鱼体贮藏方式检测技术流程如图4所示。

将金属夹夹在鱼体两端即可实现自动检测,该系统显示的检测结果如图5所示,有“冰鲜鱼”和“解冻鱼”两种检测结果。当放入鱼体时,系统能够快速显示出是冰鲜鱼或解冻鱼的检测结果,从而实现了鱼体贮藏方式的自动检测。

## 2.3 检测验证试验

本试验另外选取200条不同种类的草鱼和罗非鱼(冰鲜鱼与解冻鱼各100条)作为样本,利用系统对其进行检测,将显示的检测结果与其实际贮藏方式进行记录与比对,分别统计冰鲜鱼和解冻鱼的检测正确条数、检测错误条数,计算出检测的准确率(正确检测条数占总条数的比例),并以检测的准确率作为指标进行验证和分析。

对200条鱼检测和统计结果如表1所示,检测的准确率为95%,其误差的产生可能由于鱼体表面未清理干净,如表面的粘液对结果产生影响,也可能

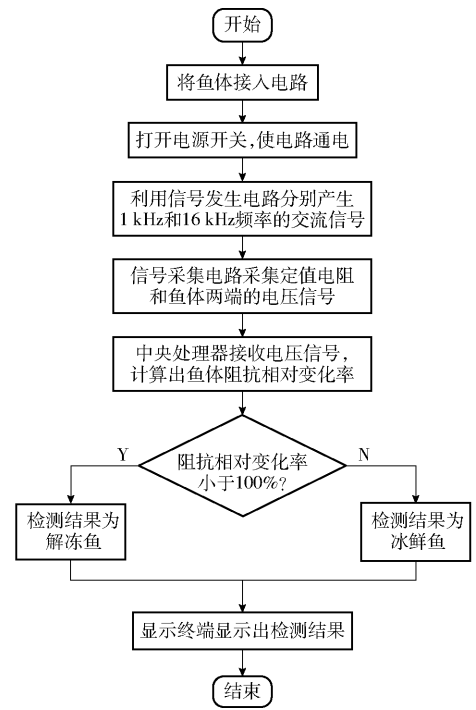


图4 鱼体贮藏方式检测技术流程图

Fig.4 Flow chart of automatic detection technology for fish storage method

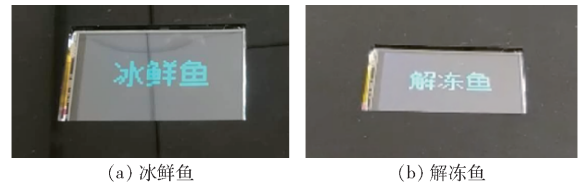


图5 系统显示的检测结果

Fig.5 Detection result displayed by system

表1 鱼体贮藏方式检测结果

Tab.1 Detection results of fish storage methods

参数	冰鲜鱼	解冻鱼	总计
检测正确数/条	96	94	190
检测错误数/条	4	6	10
准确率/%	96.0	94.0	95.0

存在一些未探究到的原因。由操作过程和试验结果可知,系统放上鱼体后能够迅速显示出检测结果,且检测准确率较高,因此该方法兼具高效性与可靠性。

## 3 结论

(1) 针对鱼体贮藏方式(冰鲜与冷冻)难以区分判断的问题,提出一种基于单片机系统和生物阻抗的鱼体贮藏方式快速检测技术。利用Arduino单片机系统和其他电路元件搭建完整的电路检测系统,通过大量试验得出鱼体在信号频率为1 kHz和16 kHz时阻抗的相对变化率与鱼体贮藏方式的关系,即冰鲜鱼的阻抗相对变化率大于100%,解冻鱼的阻抗相对变化率小于100%。

(2) 该检测技术原理为: 将待测鱼体接入检测系统后, 改变电路输入的交流信号频率, 分别获取交流信号频率为 1 kHz 和 16 kHz 时电路中的电压信息, 然后计算出信号频率从 1 kHz 到 16 kHz 时鱼体阻抗的相对变化率, 当阻抗相对变化率小于 100%

时检测结果为解冻鱼, 反之则为冰鲜鱼, 并在显示终端上输出检测结果。

(3) 该检测技术操作简单、便捷, 在检测过程中对鱼体没有损伤, 且识别过程准确高效, 检测准确率可达 95%。

### 参 考 文 献

- [1] 邹佳, 蔡婷, 罗永康, 等. 冰鲜鱼和解冻鱼快速无损物理检测技术研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(2): 47-49. ZOU Jia, CAI Ting, LUO Yongkang, et al. Research on rapid nondestructive physical detection technique for fresh and frozen-thawed fish detecting[J]. Food & Machinery, 2010, 26(2): 47-49. (in Chinese)
- [2] 张丽娜, 胡素梅, 王瑞环, 等. 草鱼片在冷藏和微冻条件下品质变化的研究[J]. 食品科技, 2010, 35(8): 175-179. ZHANG Li'na, HU Sumei, WANG Ruihuan, et al. Changes in quality of grass carp filets during storage between refrigeration and partial freezing[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(8): 175-179. (in Chinese)
- [3] 王彩霞, 熊善柏, 赵思明, 等. 鲜鱼肉贮藏品质与保鲜方法的研究进展[J]. 肉类工业, 2008(11): 50-54. WANG Caixia, XIONG Shanbai, ZHAO Siming, et al. Research progress on the storage quality and preservation method of fresh fish-meat[J]. Meat Industry, 2008(11): 50-54. (in Chinese)
- [4] 穆迎春, 郭亚男, 何雅静, 等. 几种水产品营养与活性因子及品质评价研究进展[J]. 中国渔业质量与标准, 2019, 9(6): 71-76. MU Yingchun, GUO Ya'nian, HE Yajing, et al. Progress on nutrition, active factors and quality evaluation of several aquatic products[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2019, 9(6): 71-76. (in Chinese)
- [5] YAO L, LUO Y K, SUN Y Y, et al. Establishment of kinetic models based on electrical conductivity and freshness indicators for the forecasting of crucian carp (*Carassius carassius*) freshness[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(2): 147-151.
- [6] AGHAEI Z, GHORANI B, EMADAZDEH B, et al. Protein-based halochromic electrospun nanosensor for monitoring trout fish freshness[J]. Food Control, 2020, 111: 107065.
- [7] LI C L, HAO J X, WU K B. Triethylamine-controlled Cu-BTC frameworks for electrochemical sensing fish freshness[J]. Analytica Chimica Acta, 2019, 1085: 68-74.
- [8] 彭巧梅, 邹洋, 刘兴海, 等. 鱼肉新鲜度检测方法研究[J]. 数字印刷, 2020(2): 32-42. PENG Qiaomei, ZOU Yang, LIU Xinghai, et al. Studies on determination methods of fish freshness[J]. Digital Printing, 2020(2): 32-42. (in Chinese)
- [9] 杨明远, 蔡杨杨, 谢晶, 等. 鱼体新鲜度快速检测技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 334-339, 347. YANG Mingyuan, CAI Yangyang, XIE Jing, et al. Research progress on rapid detection technology of fish freshness[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(9): 334-339, 347. (in Chinese)
- [10] LIU X Y, CHEN K K, WANG J Y, et al. An on-package colorimetric sensing label based on a sol-gel matrix for fish freshness monitoring[J]. Food Chemistry, 2020, 307: 125580.
- [11] CHEN H Z, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Novel pH-sensitive films containing curcumin and anthocyanins to monitor fish freshness[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105438.
- [12] VADIVEL M, SANKARGANESH M, RAJA J D, et al. Bioactive constituents and bio-waste derived chitosan/xylan based biodegradable hybrid nanocomposite for sensitive detection of fish freshness[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22(3): 100384.
- [13] SARA K N, MARZIEH M N. Prediction of various freshness indicators in fish fillets by one multispectral imaging system[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 329-339.
- [14] 王想, 高乾钟, 肖新清, 等. 保活运输河蟹品质感知生物信号检测与建模[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 268-277. WANG Xiang, GAO Qianzhong, XIAO Xinqing, et al. Quality inspection and modeling for crab transportation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 268-277. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20201030&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20201030&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.030. (in Chinese)
- [15] JIANG G Y, HOU X Y, ZENG X D, et al. Preparation and characterization of indicator films from carboxymethyl-cellulose/starch and purple sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) lam) anthocyanins for monitoring fish freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 143: 359-372.
- [16] GE Y J, LI YUAN, BAI Y, et al. Intelligent gelatin/oxidized chitin nanocrystals nanocomposite films containing black rice bran anthocyanins for fish freshness monitoring[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 1296-1306.
- [17] ZENG P, CHEN X, QIN Y R, et al. Preparation and characterization of a novel colorimetric indicator film based on gelatin/polyvinyl alcohol incorporating mulberry anthocyanin extracts for monitoring fish freshness[J]. Food Research International, 2019, 126(4): 108604.
- [18] 叶盛权. 冰藏贮存中鲈鱼鲜度的化学指标分析[J]. 食品研究与开发, 2003, 4(2): 111-112. YE Shengquan. Chemical index analysis of freshness of seabass in ice storage[J]. Food Research and Development, 2003, 4(2): 111-112. (in Chinese)
- [19] 陈怡璇, 焦阳. 冻藏及解冻过程对水产品品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(2): 306-311. CHEN Yixuan, JIAO Yang. Effects of frozen preservation and thawing on the quality changes of aquatic products[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(2): 306-311. (in Chinese)
- [20] 缪宇平, 乔庆林, 裘塘根, 等. 鲢冻结过程中肌肉组织及蛋白质的变化[J]. 中国水产科学, 2001(2): 85-87. LIAO Yuping, QIAO Qinglin, QIU Tanggen, et al. Changes of muscle tissues and protein in silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix*, during frozen[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2001(2): 85-87. (in Chinese)
- [21] 郑羽, 李静, 蔡迪, 等. 快电容补偿方法对提高神经元细胞动作电位发放精度的影响[J]. 生物医学工程学杂志, 2014, 31(6): 1191-1194, 1217. ZHENG Yu, LI Jing, CAI Di, et al. Effect of fast capacitance compensation method on improving the action potential firing accuracy of nerve cell[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2014, 31(6): 1191-1194, 1217. (in Chinese)
- [22] 李佳瑞, 王泽建, 郭美锦, 等. 基于电容测定的罗汉果细胞超低温保藏快速方法[J]. 生物工程学报, 2017, 33(5): 817-827. LI Jiarui, WANG Zejian, GUO Meijin, et al. Rapid cryopreservation for *Siraitia grosvenorii* cells based on cells' capacitance detection[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2017, 33(5): 817-827. (in Chinese)