

# 基于电容法的藜麦水分快速检测仪设计

## Design of quinoa moisture rapid detector based on capacitance method

席前 张志勇 袁凯 郭东升 伍莹芮

XI Qian ZHANG Zhi-yong YUAN Kai GUO Dong-sheng WU Ying-rui

(山西农业大学工学院, 山西 太谷 030801)

(College of Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

**摘要:**利用 LCR 仪研究了 5~40 ℃ 下,不同含水率(10.14%~29.55%)藜麦的电容随激励频率(1~100 kHz)的变化规律。基于多元回归分析法,确定了藜麦含水率检测的最佳激励频率(21 kHz)及含水率检测模型。以 MSP430F149 单片机最小系统板为检测系统核心,结合 AD5933 阻抗测量芯片、自制同心圆式电容传感器和 DS18B20 数字温度传感器,设计了一种藜麦水分快速检测仪,并对其进行了精度检验,结果显示:藜麦含水率检测结果的平均相对误差为 4.17%,测量时间小于 2 s,检测仪取得了较为满意的检测结果。

**关键词:**藜麦;水分;电容;多元回归分析;快速检测

**Abstract:** The effects of temperature (5~40 ℃), water content (10.14%~29.55%) and frequency (1~100 kHz) on quinoa capacitance were studied by LCR meter. Based on the multiple regression analysis method, and the optimal excitation frequency (21 kHz) and water content detection model for quinoa water content detection were determined. The minimum system board of MSP430F149 microcontroller, TFT touch-screen, AD5933 impedance measurement chip, self-made concentric circle capacitance sensor and DS18B20 digital temperature sensor were selected to complete the design of the quinoa moisture rapid detector. The accuracy test of the detector showed that the average relative error of quinoa water content test results was 4.17%, and the measurement time was less than 2 s. The performance of capacitive quinoa moisture rapid detector based on AD5933 is satisfactory.

**Keywords:** quinoa; moisture content; capacitance; multivariate regression analysis; rapid detection

藜麦作为一种安全优质的绿色食品,富含蛋白质、矿物质(钙、钾、磷等)、维生素、多酚类物质、皂苷等多种营养成分,具有预防心血管疾病与糖尿病、降胆固醇、抗氧化、抗炎抗真菌等功效,被誉为“超级谷物”<sup>[1]</sup>。因其符合现代人饮食多元化的健康理念而越来越多地出现在人们的食谱中。含水率是事关藜麦安全贮藏的一项重要指标,含水率过高将导致其呼吸作用增强,产生发热、霉变和生虫等问题,造成巨大的经济损失和不必要的浪费,而含水率过低又会改变藜麦的营养结构,导致藜麦的品质下降<sup>[2]</sup>。为保证藜麦的安全贮藏,减少损失,应在藜麦收购入库的各个环节进行水分检测。

目前,国内外用于检测粮食水分的方法主要有:电烘箱法、电阻法、电容法、核磁共振法、近红外法、蒸馏法等<sup>[3]</sup>。电烘箱法、蒸馏法等测量精度高,但其所需时间过长。核磁共振法与近红外法检测迅速且精度高,但成本较高。电阻法与电容法因其结构简单经济而被广泛使用,其中电容法的综合效果较好。目前已成熟上市或处于研究阶段的粮食水分检测仪主要针对小麦、水稻等大宗粮食,用于藜麦等小杂粮的水分检测仪仍较少见。王兆华等<sup>[4]</sup>以小米为对象对设计的有源电桥的电容式水分测量系统进行了可行性验证;王婧<sup>[5]</sup>基于电容法,利用 LCR 仪研究了燕麦、荞麦等小杂粮的介电特性与影响因素的相关关系,尚未进行硬件设计;郭文川等<sup>[6]</sup>针对小杂粮设计了一款电容式水分检测仪,但只对小米进行了建模验证。

试验拟以藜麦为研究对象,基于电容法,研究水分、温度及频率对藜麦电容的影响,并建立藜麦水分检测模型。基于 MSP430F149 单片机与 AD5933 阻抗测量集成芯片,设计一种藜麦水分快速检测仪,以期实现对藜麦水分的快速、连续检测。

### 1 试验原理

设计的藜麦水分检测仪采用自制变介质型同心圆式电容传感器,电极材料为紫铜,高 97 mm,内电极

**基金项目:**山西省自然科学基金(编号:201701D121103);国家重点研发计划项目(编号:2016YFD0701801)

**作者简介:**席前,男,山西农业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**张志勇(1979—),男,山西农业大学副教授,博士。

E-mail: zzyzyzy1979@163.com

**收稿日期:**2020-04-15

$\Phi 85\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ , 外电极  $\Phi 30\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ , 其结构图见图 1。当电极高度远大于内外电极半径之差时, 可有效抑制人体感应, 忽略内外电极边缘效应的影响。按式(1)计算传感器检测电容值<sup>[7]</sup>。

$$C = \frac{2\pi H \epsilon_r \epsilon_0}{\ln \frac{R}{r}}, \quad (1)$$

式中:

$C$ ——电容值, pF;

$\epsilon_0$ ——真空介电常数, F/m;

$\epsilon_r$ ——传感器所填介质的相对介电常数;

$H$ ——电极高度, mm;

$R$ ——外电极半径, mm;

$r$ ——内电极半径, mm。

当其他条件不变时, 将不同含水率的藜麦放入传感器,  $\epsilon_r$  改变而引起检测电容值变化, 将电容代入相应模型则可测出当前藜麦的含水率。

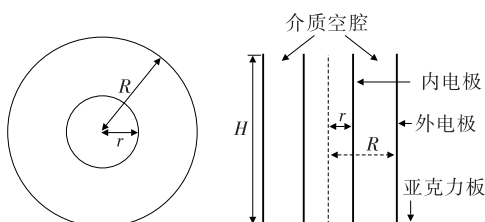


图 1 同心圆式电容传感器结构图

Figure 1 Structure of concentric capacitance sensor

## 2 材料与方法

### 2.1 材料与主要仪器

白藜麦: 初始含水率 10.13%, 山西省繁峙县;

电子天平: MP31001 型, 慈溪市华徐衡器实业有限公司;

电热鼓风箱: 101-2AB 型, 北京心雨仪器仪表有限公司;

电子分析天平: BSM120.4 型, 上海卓精电子科技有限公司;

LCR 仪: HIOKI-3532-50 型, 日本日置公司;

生化培养箱: SPX-50 型, 北京恒诺利兴科技有限公司;

数字温度表: VC6801 型, 深圳市驿生胜利科技有限公司;

同心圆式电容器: 自制。

### 2.2 试验方法

2.2.1 样品制备 使用电子天平称取初始含水率的藜麦样品 30 份, 每份约 400 g, 在其中加入不同质量的去离子水以配制出不同含水率的藜麦样品。喷水时不断搅拌以使其均匀吸水, 配制含水率  $>16\%$  的样品时遵循多次少量的原则。为保证样品在存放过程中不失水, 将配制好的样品应放置于塑料密封桶中并标号, 在室温下存放 24 h

后装入塑封袋, 置于冰箱冷藏 2 d, 每天取出摇动 3~4 次, 每次摇动 30 s 左右, 以促使样品吸水均匀充分。配制含水率低于初始含水率(10.13%)的样品时, 需将其置于 100 °C 电热鼓风箱烘干 20 min 后, 先测得含水率再进行配制。

2.2.2 含水率的测定 按 GB/T 5497—1985 的 105 °C 恒重法执行, 每份样品取 3 组平行, 并在每次取样前摇匀, 取其平均值为最终检测结果。

2.2.3 电容的测定 使用 LCR 仪。测量前在 LCR430E 软件中预设参数, 测量频率设为 1~100 kHz 范围内的 50 个奇数频率点。由于粮食的等效电路为 RC 并联电路, 测量内容选择为并联模式下的电容。将配制好的样品以自由下落的形式倒入电容传感器的介质空腔内, 并用塑料尺刮平溢出的藜麦, 将数字温度表的探头插入试验样品内部后与电容传感器一同放入生化培养箱, 探头位于传感器高度及内外电极距离的 1/2 位置处。将培养箱温度设定为 5 °C, 待数字温度表显示的温度与设定温度一致后, 测量所选频率下试验样品的电容。随后将生化培养箱的温度依次设定为 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 °C, 以相同方法测量并记录各温度下的藜麦电容。

## 3 结果与分析

### 3.1 含水率对电容的影响

由图 2 可知, 电容值随藜麦含水率的增高而变大; 当藜麦含水率低于 20% 时, 电容随含水率增长速度的变化较为缓慢, 超过 20% 后, 电容的增长速度急剧增大。其他频率下样品的电容变化也呈现类似规律。水是一种极性分子, 电偶极矩很强, 其在常温下的相对介电常数约为藜麦干质的 20 倍, 是影响藜麦电容的主要因素。当含水率较低时, 藜麦内部主要为结合水, 自由水含量很小, 此时细胞呼吸强度较弱, 活动性不高, 离子运动缓慢, 水分对相对介电常数的影响不大。当含水率变大时, 自由水含

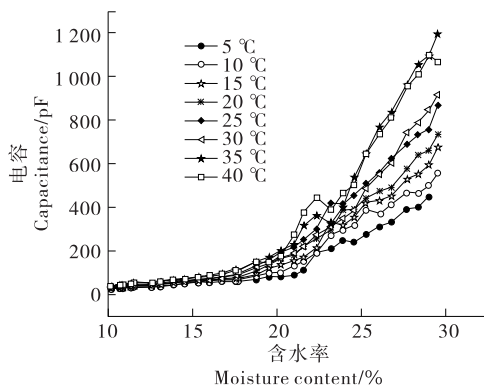


图 2 21 kHz 下含水率对各温度梯度下藜麦电容的影响  
Figure 2 Effect of moisture content at 21 kHz on the capacitance of quinoa at different temperature gradients

量增加,其扩散至外部而形成多层分子膜,电偶极矩随之变大,同时细胞呼吸强度变强,使离子活性增强,此时极化程度呈增强趋势,相对介电常数逐渐增大,导致其电容增大<sup>[7-10]</sup>。

### 3.2 频率对电容的影响

由图 3 可知,在试验激励频率范围内,电容随测量频率的增大而变小,低频时电容下降的幅度显著,而在高频时电容变化速度放缓,甚至产生重合。其他温度下样品的电容变化也呈现此规律。藜麦在外加电场作用下会产生极化现象。低频时,电荷大量积累使样品总电量增加,导致其电容变大。随着频率的逐渐增大,电场的变化周期开始改变,偶极子的转向速度不能跟上外电场的变化速度,其转向时间将大于电场变化周期,直至频率达到某一值时完全停止极化。因此,随着测量频率的升高,藜麦相对介电常数呈下降趋势,导致其电容变小<sup>[11-13]</sup>。

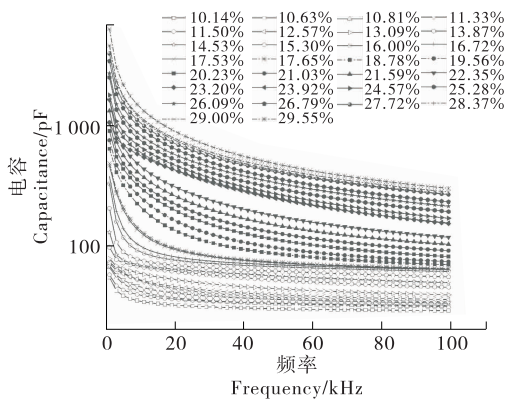


图 3 频率对 25 °C 下不同含水率藜麦电容的影响

Figure 3 Effect of frequency on capacitance of quinoa with different moisture content at 25 °C

### 3.3 温度对电容的影响

由图 4 可知,含水率一定时样品电容整体随温度上升而变大,而且高含水率样品的变化趋势比低含水率样品明显。相对介电常数反映了静态电场下分子极化和热运动的动态平衡。温度上升促使水分子电离,离子浓度增加,在电场作用下将加速水分子的转向极化。同时温度上升会加强水分子的热运动,阻碍水分子的转向极化。当温度上升产生的极化效果大于热运动效果时,藜麦的相对介电常数增大,导致其电容增大<sup>[14-17]</sup>。

使用统计分析软件 SPSS 23 对试验数据进行多元回归分析。试验共有 240 个检测点,随机选取 200 个检测点的数据,在试验所用的 50 个测量频率下分别建立了藜麦含水率与 Z-score 标准处理后的检测电容值及温度值的二元三次回归模型,并在模型中加入电容数据的对数项。建模时使用标化残差方法(Casewise Diagnostics 检验)剔除异常数据,并使用全局择优法去除无关自变量。各频

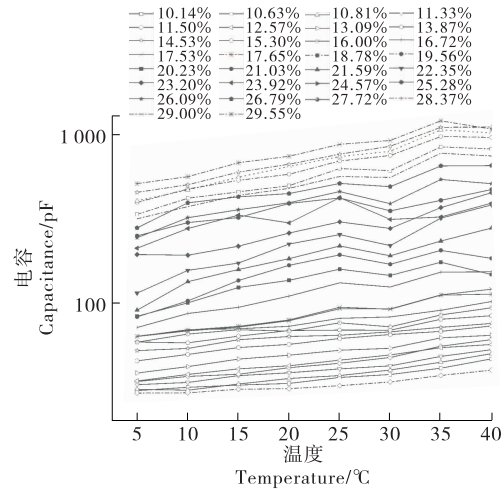


图 4 温度对 21 kHz 下不同含水率藜麦电容的影响

Figure 4 Effect of temperature on the capacitance of quinoa with different moisture content at 21 kHz

率回归模型的评价指标如表 1 所示,对比后确定 21 kHz 为藜麦的最佳激励频率,此时回归模型的相关系数  $R^2$  与调整后决定系数  $R_a^2$  分别为 0.997 和 0.993,标准估算的误差为 0.53,模型方差分析的结果表明藜麦水分检测回归方程显著。

使用其余 40 个检测点的数据对 21 kHz 下的藜麦水分检测模型进行验证,由标准化残差分布情况可知,检测模型藜麦水分测量模型能够较好地描述藜麦含水率与温度、检测电容值的相关关系。模型如下:

$$M = 19.39 - 13.646 \times C - 1.605 \times T + 2.885 \times C \times T + 19.384 \times C^2 + 0.663 \times T^2 - 0.616 \times C \times T^2 - 14.78 \times T \times C^2 - 4.126 \times C^3 - 0.334 \times T^3 + 6.933 \times C^2 \times T^2 + 10.451 \times \ln C, \quad (2)$$

式中:

$C$ ——Z-score 标准处理后的检测电容值;

$T$ ——Z-score 标准处理后的检测温度值;

## 4 藜麦水分快速检测仪设计

### 4.1 硬件设计

藜麦水分快速检测仪以 MSP430F149 单片机最小系统板为核心,连接自制同心圆式电容传感器、AD5933 阻抗测量芯片、TFT 触摸显示屏及 DS18B20 数字温度传感器构成。TFT 屏识别出测量命令后,AD5933、DS18B20 开始分别采集电容、温度信号,信号经 MSP430F149 运算处理后代入藜麦水分检测模型计算含水率,并在 TFT 屏显示。藜麦水分快速检测仪的整体结构示意图如图 5 所示。

4.1.1 电容检测 电容检测功能由集成了频率发生器和 12 位、1MSPS(每秒采样 1 百万次)模数转换器的高精度阻抗测量芯片 AD5933 实现,其功能框图如图 6 所示<sup>[10-13]</sup>。



$|Y| = G \times M。$  (6)

式(4)计算得出的相位同时考虑了 Vin 和 Vout 引脚间分别接入校正阻抗、待测阻抗时测得的相位,实际相位的计算公式:

$\theta = \theta_u - \theta_s，$  (7)

式中:

$\theta$ ——实际相位;

$\theta_u$ ——Vin 和 Vout 引脚间接入待测阻抗时的相位;

$\theta_s$ ——Vin 和 Vout 引脚间接入校正阻抗时的相位。

检测电容值 C 最终计算公式:

$C = \frac{||Y|\sin\varphi|}{\omega}，$  (8)

式中:

$|Y|$  ——实际导纳的幅值,S;

$\varphi$  ——实际导纳的相位角( $\varphi = -\theta$ ),°;

$\omega$  ——测量频率的角速度,rad/s。

4.1.2 控制与显示 控制与显示模块选择以 MSP430F149 单片机为核心处理器的 DM430-L 型系统板及其配套的 DMTFT-28 型 TFT 触摸显示屏。模块主要功能为电容采集的启停控制及所采集数据的处理、运算及显示。

4.1.3 温度检测 温度检测模块选用具有单总线接口的不锈钢封装式 DS18B20 数字温度传感器,其具有体积小、精度高、成本低、响应快、易与单片机连接的特点。

4.2 软件设计

藜麦水分快速检测仪的软件设计主要包括:控制程序、藜麦电容采集程序、温度检测程序、数据处理及显示程序,编程工具为 IAR WORKBENCH V3.10 软件。藜麦水分快速检测仪的总体程序流程图如图 7 所示。

控制程序通过识别用户点击位置的坐标值来执行启动及结束程序,收到启动命令后,电容数据采集程序进行 I2C 协议初始化,将相关参数写入 AD5933 后开始采集电容。采集次数设为 10 次,并对采集结果进行中位值平均滤波,即去掉最大值和最小值后计算算术平均值。温度检测程序开始执行 D18B20 初始化及温度采集任务。然

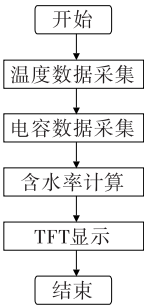


图 7 总体程序流程图

Figure 7 Overall flow chart of program

后,数据处理与显示程序将采集的电容数据与温度数据均进行 Z-score 标准化处理后代入藜麦水分检测模型,计算出含水率后通过 TFT 屏显示。

4.3 精度检验结果及分析

对设计的藜麦水分快速检测仪进行精度检验,配制 10 份不同含水率的藜麦样品,并用 105 ℃ 恒重法对其进行水分标定。使用检测仪在 5~40 ℃ 内随机选取 3 个温度下进行测量。藜麦水分快速检测仪的检测误差如表 2 所示。

由表 2 可知,藜麦水分检测的误差绝对值最小为 0.01%,最大为 4.26%,对于含水率在 23.36%以下的藜麦样品,检测结果中有 80.95% 的数据的误差绝对值小于

表 2 藜麦标准值和检测值误差表

Table 2 Error table of standard and test values

| 标准值/<br>% | 检测值/<br>% | 温度/<br>℃ | 绝对误差/<br>% | 相对误差/<br>% |
|-----------|-----------|----------|------------|------------|
| 11.96     | 11.92     | 11.5     | -0.04      | -0.33      |
| 13.93     | 14.81     | 9.5      | 0.88       | 6.32       |
| 15.88     | 16.83     | 7.6      | 0.95       | 5.98       |
| 18.02     | 17.20     | 7.3      | -0.82      | -4.55      |
| 20.02     | 18.52     | 7.0      | -1.50      | -7.49      |
| 21.48     | 20.07     | 7.3      | -1.41      | -6.56      |
| 23.36     | 22.59     | 7.4      | -0.77      | -3.30      |
| 24.34     | 23.26     | 6.8      | -1.08      | -4.44      |
| 25.43     | 23.43     | 6.9      | -2.00      | -7.86      |
| 29.21     | 30.71     | 5.5      | 1.50       | 5.14       |
| 11.96     | 12.75     | 23.9     | 0.79       | 6.61       |
| 13.93     | 15.13     | 23.8     | 1.20       | 8.61       |
| 15.88     | 16.04     | 23.8     | 0.16       | 1.01       |
| 18.02     | 17.51     | 23.9     | -0.51      | -2.83      |
| 20.02     | 19.99     | 23.8     | -0.03      | -0.15      |
| 21.48     | 21.46     | 24.1     | -0.02      | -0.09      |
| 23.36     | 23.37     | 23.8     | 0.01       | 0.04       |
| 24.34     | 26.49     | 23.8     | 2.15       | 8.83       |
| 25.43     | 27.12     | 23.8     | 1.69       | 6.65       |
| 29.21     | 29.13     | 23.8     | -0.08      | -0.27      |
| 11.96     | 13.00     | 34.8     | 1.04       | 8.70       |
| 13.93     | 14.63     | 36.9     | 0.70       | 5.03       |
| 15.88     | 16.04     | 36.1     | 0.16       | 1.01       |
| 18.02     | 17.77     | 37.3     | -0.25      | -1.39      |
| 20.02     | 19.79     | 37.9     | -0.23      | -1.15      |
| 21.48     | 21.15     | 38.3     | -0.33      | -1.54      |
| 23.36     | 23.31     | 37.4     | -0.05      | -0.21      |
| 24.34     | 25.18     | 36.5     | 0.84       | 3.45       |
| 25.43     | 25.18     | 38.3     | -0.25      | -0.98      |
| 29.21     | 33.47     | 34.1     | 4.26       | 14.58      |

1%。藜麦水分检测的相对误差(绝对值)最小为 0.02%，最大为 14.58%，平均相对误差为 4.17%，测量时间小于 2 s。在检测高含水率样品时的部分结果误差很大，可能是由于温度从 5℃ 升至 40℃ 过程中水分蒸发以及检测模块杂散电容的干扰等因素导致。

## 5 结论

使用 LCR 仪研究了温度(5~40℃)、含水率(10.14%~29.55%)、测量频率(1~100 kHz)对藜麦电容的影响,建立了藜麦水分与电容、温度的多元回归模型,并以此为依据设计了藜麦水分快速检测仪。对设计的检测仪进行了性能评估试验,结果表明,检测值与标准值的平均相对误差为 4.17%,测量时间小于 2 s,检测仪具有一定的应用价值。为了提高仪器的检测精度及便携性,后续可采用铜箔作为电极材料。同时,还可增加屏蔽罩等屏蔽装置以增强仪器检测抗干扰能力,进一步完善检测仪。

## 参考文献

- [1] 魏爱春, 杨修仕, 么杨, 等. 藜麦营养成分及生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(15): 272-276.
- [2] 张伟, 杨刚, 雷军波, 等. 基于微波反射法的谷物含水率在线检测装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 21-28.
- [3] 黄操军, 田芳明. 粮食水分检测技术及发展趋势[J]. 农机化研究, 2006(12): 44-47.
- [4] 王兆华, 高敬阳, 董永贵. 一种基于有源电桥的电容式粮食水分传感器[J]. 传感器技术, 2005(11): 55-57.
- [5] 王婧. 小杂粮的介电特性与主要影响因素的关系研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012: 64-65.
- [6] 郭文川, 赵志翔, 杨沉陈. 基于介电特性的小杂粮含水率检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 188-193.
- [7] NOREÑA C P Z, LESCANO-ANADÓN E. Dielectric properties of importance in operations of post-harvest of sorghum[J]. International Journal of Food Engineering, 2017, 13(4): 369-375.
- [8] TANG Ju-ming. Dielectric properties of foods[J]. Microwave Processing of Foods, 2005, 3: 22-40.
- [9] 赵志翔. 基于介电特性的小杂粮含水率检测仪设计[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012: 37-38.
- [10] 胡佳, 李臻, 潘笑俊. 弥散场电容粮食水分传感器及其在储粮中的应用[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(11): 108-111.
- [11] 郭文川, 王婧, 朱新华. 基于介电特性的燕麦含水率预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 272-279.
- [12] 郭文川, 王婧, 刘驰. 基于介电特性的薏米含水率检测方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 113-117.
- [13] 张本华, 钱长钱, 焦晋康, 等. 基于介电特性与 SPA-SVR 算法的水稻含水率检测方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 237-244.
- [14] LAWRENCE K C, NELSON S O. Radio-frequency density-independent moisture determination in wheat[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(2): 477-483.
- [15] GUO Wen-chuan, TIWARI G, TANG Ju-ming, et al. Frequency, moisture and temperature-dependent dielectric properties of chickpea flour[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(2): 217-224.
- [16] 廖爱民. 根-土系统中水分动态监测的电容法研究[D]. 南京: 南京大学, 2015: 63-64.
- [17] 宋琦. 基于电阻抗谱分析的稻谷水分传感器设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 23.
- (上接第 31 页)
- [4] 鲍羽. 微量元素与人的健康[J]. 邵阳师范高等专科学校学报, 2015, 35(6): 16-19.
- [5] 王子怀, 胡晓, 李来好, 等. 肽-金属离子螯合物的研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(8): 359-362.
- [6] 曾庆瑞, 钱文举, 王梦瑶, 等. 宽体金线蛭多肽-锌螯合物的制备及其结构表征[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 11-15.
- [7] 赵梓月, 王思远, 廖森泰, 等. 蚕蛹多肽螯合钙的制备工艺优化及结构表征[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 20-26.
- [8] 刘晶晶, 金林烽, 韩曜平, 等. 可控酶法制备河蚬抗氧化肽工艺优化[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 222-225, 255.
- [9] 范建凤, 王泽南, 杨柯, 等. 蟹抗氧化肽的分离纯化及活性研究[J]. 食品科学, 2010, 31(13): 48-51.
- [10] 刘杰, 万细妹, 徐明生. 河蚬酶解液体外抗氧化作用的研究[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(6): 1 093-1 096.
- [11] 吴燕燕, 尚军, 李来好, 等. 合浦珠母贝肉短肽的分离及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(7): 123-126.
- [12] 刘晶晶, 徐蕴桃, 林秋逸, 等. 锌离子螯合修饰河蚬抗氧化肽的工艺研究[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 148-152.
- [13] 俞园园. 类人胶原蛋白-铜螯合物的制备及相关性质研究[J]. 化学与生物工程, 2013, 30(7): 29-32.
- [14] 高敏, 汪建明, 甄灵慧, 等. 牛骨多肽螯合物的制备及结构表征[J/OL]. 食品科学. [2019-12-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20190311.1015.032.html>.
- [15] 梁杰, 赵晓旭, 汪秀妹, 等. 鲍鱼内脏蛋白的提取及水解肽的抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 136-144.
- [16] 范建, 王泽南, 杨柯, 等. 蟹抗氧化肽的分离纯化及活性研究[J]. 食品科学, 2010, 31(13): 48-51.
- [17] 刘丽莉. 牛骨降解菌的筛选及其发酵制备胶原多肽螯合钙的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010: 169.
- [18] YU Yuan-yuan, FAN Dai-di. Characterization of the complex of humanlike collagen with calcium[J]. Biological Trace Element Research, 2012, 145(1): 33-38.
- [19] 肖珊, 黄立新, 赵璧秋. 乳清多肽螯合钙的制备与结构表征[J]. 食品工业科技, 2013, 34(24): 253-257.
- [20] 付文雯. 牛骨胶原多肽螯合钙的制备及其结构表征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010: 68-69.