

# 基于仿生技术的榨菜脆性检测方法研究

孙钟雷, 许艺, 彭怡梅, 张长平, 潘宁, 华岫次, 李宇

(长江师范学院生命科学与技术学院, 重庆 408100)

**摘要:** 本文建立了一种基于仿生技术的榨菜脆性检测方法。模拟了人类专家对榨菜脆性感官评定的过程, 设计制作了由仿生咀嚼装置、仿牙周膜压力传感器、仿耳膜声音传感器和测试软件等组成的仿生脆性检测系统, 使用该系统对五种榨菜样品进行了脆性测试, 提取脆裂力信号和脆裂声音信号特征值, 并与脆性感官评分进行相关性分析和多元回归分析, 建立榨菜脆性预测方程。结果表明: 仿生技术检测方法测得的最大值、峰谷差、平均差和幅值差与感官评分达到了极显著的相关性, 相关系数分别为 0.997、0.993、0.975、0.968; 榨菜脆性预测方程的预测平均相对误差小于 10%, RSD 值小于 2.0%, 且 T 检验的显著性水平大于 0.05, 预测值与实测值无明显差异。本方法准确、客观、快速, 可以替代人类专家进行榨菜脆性检测。

**关键词:** 榨菜; 脆性; 仿生技术; 感官评定

文章编号: 1673-9078(2016)07-214-219

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.7.033

## Establishment of a Method for Measuring the Brittleness of Mustard Based on the Bionic Technique

SUN Zhong-lei, XU Yi, PENG Yi-mei, ZHANG Chang-ping, PAN Ning, HUA Liu-ci, LI Yu

(College of Life Science and Technology, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China)

**Abstract:** A method was established for the determination of brittleness of mustard, based on the bionic technique. The process by which human experts conduct sensory evaluations of the brittleness of mustard was simulated, and a bionic system consisting of a bionic chewing device, a bionic periodontal ligament pressure sensor, a bionic eardrum sound sensor, and test software to measure the brittleness was designed and manufactured. This system was used to test the brittleness of five different mustard samples, and the characteristic values of the embrittling force signals and embrittling sound signals were determined and used for correlation analysis and multiple regression analysis of the scores of sensory evaluation on brittleness, to establish a prediction model for the brittleness of mustard. The results showed significant correlations between sensory evaluation scores and the values measured by the bionic technique, including the maximum value, peak-trough difference, mean difference, and amplitude difference, with correlation coefficients of 0.997, 0.993, 0.975, and 0.968, respectively. The average relative error between the prediction equation and sensory evaluation was less than 10%, and the relative standard deviation was less than 2%. Besides, the significance level was greater than 0.05 by *t*-tests. There were no significant differences between the predicted values and measured values. This method was accurate, objective, and rapid, might be used for replacing human experts in the analysis of mustard brittleness.

**Key words:** mustard; brittleness; bionic technology; sensory evaluation

脆性是榨菜感官品质的重要指标, 它直接决定榨菜产品的质量。在榨菜腌制、压榨、脱水过程中都要进行脆性的分析和监测。目前, 对榨菜脆性的检测主要依赖感官评定法<sup>[1-3]</sup>, 只有少数采用食品物性检测仪测定。感官评定法是利用人类专家的咀嚼

收稿日期: 2015-06-21

基金项目: 重庆市科委基础与前沿研究项目 (cstc2013jcyjA0098); 涪陵区科委科技项目 (FLKJ, 2013ABB2079); 2013 年重庆高校创新团队建设计划资助项目 (KJTD201322); 三峡库区特色作物工程研究中心资助项目。

作者简介: 孙钟雷(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为食品智能检测与评价

通讯作者: 李宇(1979-), 女, 讲师, 研究方向为食品农产品深加工

系统和听觉系统进行评价的, 虽然是较为准确的方法, 但是评价过程费时费力, 感觉器官容易疲惫, 评价结果主观性强且不稳定; 食品物性检测仪测定主要集中在质地剖面分析方法<sup>[4-5]</sup>、三点弯曲法<sup>[6-7]</sup>等方法上, 多属于半经验或模拟测定, 只通过力学信号进行分析, 而且测定仪器没有针对榨菜脆性测试设计, 没有考虑测试时温湿度环境, 测定结果与人类感知相差较大。

仿生技术是以仿照生物的形态结构或机能特点, 设计、改进人造机器、设备或者以生物学原理为参照原型设计制造用于特殊目的的“功能器件”<sup>[8-9]</sup>。目前, 仿生技术已应用到食品检测研究领域,

不仅能够实现食品品质的客观、快速检测，而且检测结果更接近人类专家感官评定结果。在国内，王笑丹等利用压力传感器装置模仿人类触觉系统检测牛肉嫩度，证明了该装置的合理性和可行性<sup>[10]</sup>、童春霞等利用气体传感器阵列制成仿生嗅觉系统预测苹果存储品质，实现了不同储存时间苹果样品的部分区分<sup>[11]</sup>；在国外，J M ARIMI 等通过研究饼干脆裂时的声音信号来研究其脆性<sup>[12]</sup>、W.L. Xu 等设计研究了咀嚼模拟装置<sup>[13]</sup>、Mitsuru Taniwaki 等设计制作了基于声音信号和基于力学信号的系统，检测了薯片、苹果等食品的脆性<sup>[14-19]</sup>。然而模仿人类感官评价机理的较少，利用仿生技术检测榨菜脆性的研究也未见报道。

针对榨菜硬脆性特征，结合人类专家感官评定过程，对咀嚼系统和听觉系统进行模拟，并营造口腔温湿环境，从脆裂力和脆裂声音两种信号分析入手，试图建立一种仿生类人的榨菜脆性测定方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品及处理方法

榨菜 五种全型榨菜，购于涪陵重客隆超市。将榨菜去筋、外皮及不平整部分，然后取中心部位，再用双切刀处理为长 30 mm，宽 10 mm，厚 10 mm 的长方体块，制成待测样品。

### 1.2 仿生检测方法

#### 1.2.1 仿生检测方法的机理

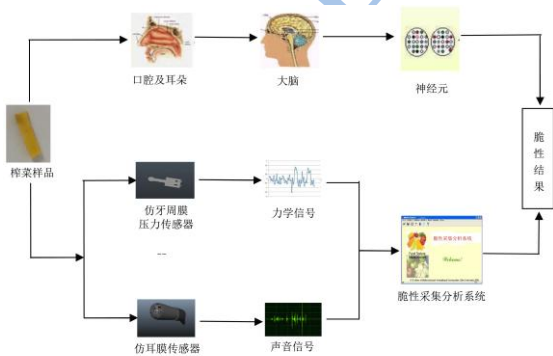


图1 榨菜脆性仿生检测机理

Fig.1 Mechanism of the bionic determination of mustard brittleness

人类专家在对榨菜脆性进行感官评定时，是使用口腔咀嚼破碎榨菜块并通过牙周膜感知食物的脆裂力，通过耳朵获取食物脆裂的声音，再通过大脑神经元分析判定，得出榨菜脆性。模仿人类专家感知榨菜脆性的机理，利用仿生技术设计咀嚼破碎装

置模拟口腔咀嚼过程，设计压力传感器模拟牙周膜获取力学信号，选用声音传感器模拟耳朵获取声音信号，编制软件程序模拟大脑进行脆性分析判定。榨菜脆性仿生检测机理如图 1 所示。

#### 1.2.2 仿生检测系统硬件

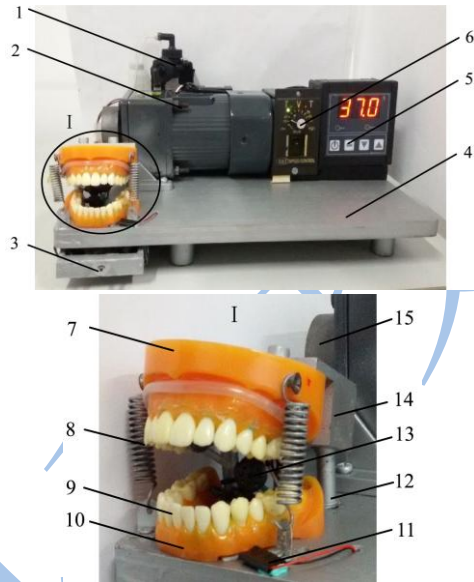


图2 仿生榨菜脆性检测装置

Fig.2 Bionic system for the measurement of mustard brittleness

注：1.唾液泵，2.电动机，3.卸料盒，4.底板，5.温控器，6.电动机调速器，7.仿生上颌，8.仿咀嚼肌弹簧，9.仿生牙齿，10.仿生下颌，11.仿生牙周膜，12.仿生髁突支，13.仿耳膜传感器，14.上颌延伸件，15.驱动轮。

根据以上机理设计了榨菜仿生检测系统，主要包括硬件装置和测试软件两大部分。硬件装置主要结构如图 2 所示。硬件装置主要包括仿生咀嚼破碎装置、力学信号获取装置、声音信号获取装置、仿口腔温湿环境装置等。仿生咀嚼破碎装置是通过模拟咀嚼系统的结构和运动形式，采用逆向工程方法设计制作的<sup>[20]</sup>。力学信号获取装置由仿牙周膜压力传感器、电荷放大器、信号调理器、信号采集卡、计算机等组成。其中，仿牙周膜压力传感器是根据牙周膜的形态以及感知触压力的机理设计制作的<sup>[21]</sup>，由 PVDF 压电薄膜、PET 薄膜、环氧导电胶等组成。仿牙周膜压力传感器根据测试榨菜脆性的需要安置在第一前磨牙下；信号调理放大器选用 ICA102 型电荷放大器；信号采集卡选用 PCI-7489 多路采集卡。声音信号获取装置主要包括 MC-303 型高灵敏声音传感器、Conexant HD Smart Audio 221 型声卡、计算机等，根据测试榨菜脆性的需要安置在第一前磨牙内侧。仿口腔温湿环境装置包括温控装置和人造唾液输送装置。温控装置由 DXW 型低温通用电热带、温度传感器探头、TN99 型温

度控制器组成, 可实现仿生口腔内的温度条件的控制。人造唾液输送装置由 DZ-1X 型微型计量泵、输液管、输液瓶和人造唾液组成, 可模仿人类咀嚼食物时唾液的分泌情况, 根据测试榨菜脆性的需要, 人造唾液由微型计量泵控制均匀地流入到上颌第一前磨牙根部。

### 1.2.3 仿生检测系统软件

软件主要包括力学信号采集分析程序、声音信号采集分析程序、榨菜脆性预测模型程序等。测试软件采用 VC++和 Labview 混合编程, 力学信号采集分析程序使用 VC++驱动 PCI-7489 采集卡实现, 可完成力学信号的采集、储存、曲线绘制等任务, 程序界面如图 3 所示。榨菜脆性预测模型程序也采用 VC++编写, 主要植入脆性预测方程。



图 3 力学信号采集程序界面

Fig.3 Program interface for the acquisition of force signals

声音信号采集分析程序采用 Labview 软件驱动声卡编程实现, 完成声音信号的采集、幅频分析和功率谱分析, 程序界面如图 4 所示。



图 4 声音信号采集分析程序界面

Fig.4 Program interface for the acquisition of sound signals

### 1.2.4 脆性仿生检测过程

测试前, 打开测试软件并设置信号采集参数, 开启微型计量水泵及自控温电热带, 预热 3min。根据前期对榨菜脆性测试预试验结果, 设置适合榨菜脆性测定的最佳试验条件: 可调速电动机转速为 35r/min, 仿生口腔温度为 37℃, 人工唾液流量为 3mL/min, 仿咀嚼肌弹簧弹性系数为 4N/mm, 选择

仿生第一前磨牙组作为测试牙齿。测试时, 首先打开可调速电动机开关, 将榨菜样品送入仿生下颌的测试牙齿颌面, 然后点击测试软件的信号采集按钮进行力学信号和声音信号的采集, 最后脆性采集分析系统对两种信号进行特征分析, 得出食品的脆性结果。

### 1.3 感官评定方法

食品脆性的感官评定主要是根据食品样品被磨牙咀嚼破裂时所用的力、发出的声音等综合判定的<sup>[22]</sup>。本试验对榨菜样品的感官评定, 由来自榨菜行业的 10 位感官评定专家进行, 评定时, 将样品置于上下第一磨牙间, 按正常咀嚼速度(约 68 次/min)将样品咬碎, 将感知的脆性特性记录下来。每人评定 3 次, 取平均值。评分标准采用九分制打分法和感官描述法<sup>[6]</sup>, 感官评定评分标准如表 1 所示。

表 1 感官评定评分标准

Table 1 Criteria for the sensory evaluation scoring

评定项目	评定分值	评定标准
脆裂声音	0~9	咀嚼声音越响亮、清脆, 分值越高
脆裂力	0~9	咀嚼用力越大, 分值越高
总体评分	0~9	(力分值+声音分值)/2

## 2 结果与分析

### 2.1 榨菜脆性仿生技术检测结果与分析

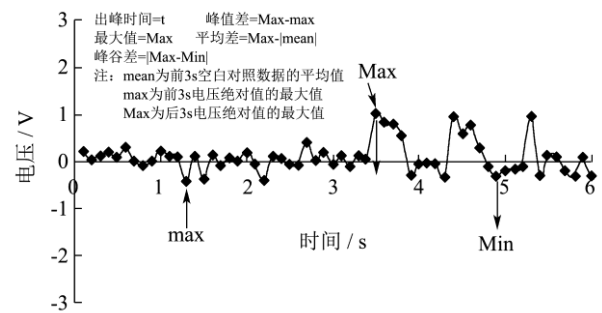


图 5 力信号特征曲线

Fig.5 Characteristic curve of force signals

按照方法 1.2 对五种品牌的榨菜样品进行测试, 获取的力学信号曲线如图 5 所示。横坐标为力学信号的采集时间, 测试的前 3s 为仿生检测装置空运行阶段, 测试电压相对平稳, 后 3s 为对样品的测试阶段; 纵坐标为仿牙周膜压力传感器所采集到的力学信号, 用电压来表示; 信号采集频率为 0.1s/次。每个样品在仿生口腔中被咀嚼三次, 图中相应出现三个波峰, 并且高度依次降低。经过图形分析后提取出峰时间、最大值、峰值差、峰谷差和平均

差共 5 个特征值，特征值的含义见图 5。

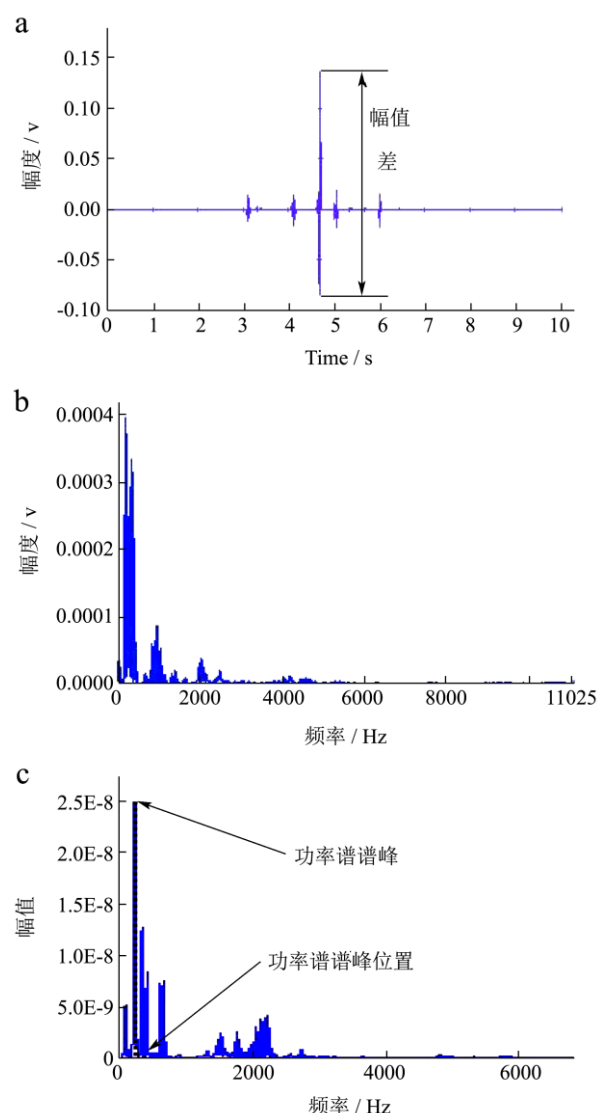


图 6 声音信号特征图

Fig.6 Characteristic diagrams of sound signals

注：a.幅值差，b.B 幅频特性，c.功率谱谱峰和功率谱

表 2 榨菜脆性仿生技术检测结果

Table 2 Test results of mustard brittleness as determined using the bionic technique

特征值	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5	
力信 号	出峰时间/s	4.15±0.75 <sup>a</sup>	4.56±0.98 <sup>a</sup>	4.33±0.96 <sup>a</sup>	3.70±0.81 <sup>a</sup>	3.91±0.72 <sup>a</sup>
	最大值/v	1.18±0.25 <sup>ab</sup>	1.83±0.31 <sup>c</sup>	1.01±0.32 <sup>c</sup>	1.28±0.34 <sup>b</sup>	0.77±0.63 <sup>a</sup>
	峰值差/v	0.21±0.11 <sup>a</sup>	0.50±0.28 <sup>b</sup>	0.34±0.32 <sup>ab</sup>	0.20±0.15 <sup>a</sup>	0.27±0.06 <sup>ab</sup>
	峰谷差/v	2.10±0.37 <sup>b</sup>	3.10±0.34 <sup>c</sup>	1.63±0.60 <sup>ab</sup>	1.99±0.53 <sup>ab</sup>	1.20±1.10 <sup>a</sup>
	平均差/v	1.07±0.26 <sup>a</sup>	1.63±0.25 <sup>b</sup>	0.86±0.29 <sup>a</sup>	0.94±0.30 <sup>a</sup>	0.70±0.62 <sup>a</sup>
声音 信号	幅值差/v	0.22±0.02 <sup>a</sup>	0.28±0.12 <sup>a</sup>	0.20±0.03 <sup>a</sup>	0.24±0.01 <sup>a</sup>	0.19±0.04 <sup>a</sup>
	幅频特性	7.84×10 <sup>-7</sup> ±8.13 <sup>a</sup>	2.06×10 <sup>-6</sup> ±1457.66 <sup>b</sup>	1.52×10 <sup>-6</sup> ±17.39 <sup>a</sup>	1.46×10 <sup>-8</sup> ±14.19 <sup>a</sup>	1.50×10 <sup>-7</sup> ±0.05 <sup>a</sup>
	功率谱谱峰/(×10 <sup>-8</sup> )v	3.38±1.86 <sup>a</sup>	2.54±0.81 <sup>a</sup>	85.81±181.77 <sup>a</sup>	2.36±1.37 <sup>a</sup>	7.03±7.30 <sup>a</sup>
功率谱谱峰位置/Hz	1.14×10 <sup>-11</sup> ±63.04 <sup>a</sup>	1.45×10 <sup>-11</sup> ±68.42 <sup>a</sup>	9.44×10 <sup>-12</sup> ±130.11 <sup>a</sup>	3.73×10 <sup>-12</sup> ±63.85 <sup>a</sup>	2.24×10 <sup>-13</sup> ±0.16 <sup>a</sup>	

注：数值表示形式为平均值±标准差。上标字母不同者差异显著 (p<0.05)，表 3 同。

谱峰位置。

通过对获取的声音信号滤噪处理后进行时域和频域分析，提取幅值差、幅频特性、功率谱谱峰和功率谱谱峰位置共 4 个特征值，其特征曲线如图 6 所示。

每种榨菜样品测试 10 次，获取的力学信号和声音信号特征值的平均值结果见表 2。

### 2.2 榨菜脆性感官评定方法检测结果

按照方法 1.3 对五种品牌榨菜样品进行感官评定，每人每种样品评定 3 次，取平均值，结果见 3。

从表 3 可以看出，五种榨菜样品的脆性有所不同，样品 2 最脆，样品 5 最不脆，同一种样品之间脆性差异不显著。

### 2.3 榨菜脆性预测方程的建立

以榨菜样品的脆性感官评定结果为标准，使用统计分析软件 SPSS 13.0 将仿生技术检测方法测定的各个信号特征值与之进行 Pearson 相关性分析，分析结果见表 4。

从表 4 中可以看出，榨菜的脆性感官评价结果与仿生技术检测方法测得的最大值、峰谷差、平均差和幅值差这四个特征值达到了极显著正相关，相关系数分别达到了 0.997、0.993、0.975、0.968；仿生技术检测方法测得的出峰时间、峰值差、幅频特性、功率谱谱峰和功率谱谱峰位置这五个特征值与感官评价之间无显著相关性，相关系数较低，分别为 0.602、0.668、0.878、-0.275、0.784，表征样品脆性特征的效果不好，其中功率谱谱峰与感官脆性之间呈负相关。

表3 榨菜脆性感官评定方法检测结果

Table 3 Test results of mustard brittleness as determined using the sensory evaluation method

样品	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5
感官脆性得分	4.90±0.90 <sup>a</sup>	5.33±0.63 <sup>a</sup>	4.80±0.48 <sup>a</sup>	4.93±0.66 <sup>a</sup>	4.60±0.73 <sup>a</sup>

注: 数值表示形式为平均值±标准差。

表4 两种方法的相关性分析结果

Fig.4 Correlation analysis results of the two methods

	出峰时间	最大值	峰值差	峰谷差	平均差	幅值差	幅频特性	功率谱谱峰	谱峰位置
感官脆性	0.602	0.997**	0.668	0.993**	0.975**	0.968**	0.878	-0.275	0.784

注: \*\*表示在  $p < 0.01$  相关性极显著。

为了更确切地找出仿生检测方法获取的特征值和脆性感官评分之间的具体关系, 用统计分析软件 SPSS 13.0 对得到的数据进行多元回归分析。以感官脆性得分为因变量, 以仿生检测方法得出的特征值为自变量, 建立回归方程。选用确定性系数  $R^2$ 、 $F$  检验值和  $T$  检验值对建立的回归方程进行检验。榨菜的脆性回归预测方程列于表 5 中。

表5 榨菜脆性回归预测方程

Fig.5 Regression prediction equation for brittleness of mustard

感官指标	回归方程	$R^2$	$F$ 检验值	$T$ 检验值
脆性	$Y=4.457+0.954X_1-3.082X_2$	1.000	0.000	0.006

注:  $Y$  是感官脆性得分,  $X_1$  是力的最大值,  $X_2$  是幅值差;  $R^2$  为确定性系数,  $F$  检验值为  $F$  检验显著性水平值,  $T$  检验值为各个自变量  $T$  检验显著性水平的最大值。

从表 5 可以看出, 仿生检测方法获取的力学信号最大值和声音信号的幅值差构成了榨菜的脆性预测方程, 可以利用脆裂力和脆裂声音来表征榨菜的脆性。榨菜脆性预测方程的确定性系数  $R^2$  为 1, 说明自变量对因变量有很强的解释;  $F$  检验值小于 0.05, 说明回归方程线性相关显著; 对偏回归系数  $T$  检验, 统计量小于 0.05, 偏回归系数显著, 可构成回归方程。感官评定的脆性可以从仿生检测方法测得的特征值中得到预测。将脆性预测方程植入脆性分析系统软件程序中, 用于对未知榨菜脆性样品进行预测, 可实现榨菜脆性的客观检测。

## 2.4 仿生检测法的验证

表6 榨菜的脆性回归预测方程与实测结果对比

Fig.6 Comparison between the prediction equation and the measured result of mustard brittleness

	实测平均值	预测平均值	相对平均误差/%	$RSD$ /%	$T$ 检验值
脆性	3.93	4.23	7.53	0.42	0.36

选取 10 组榨菜样品再进行感官评定和仿生技术

检测方法测试, 使用表 5 中的回归方程进行脆性预测, 计算实测平均值、预测平均值、平均误差、相对标准偏差  $RSD$ 、显著性检验值( $T$  检验)来验证回归预测方程, 结果见表 6。

由表 6 可知, 回归预测方程的预测相对平均误差为 7.53%, 小于 10%,  $RSD$  的值小于 2.0%, 且  $T$  检验的显著性水平大于 0.05, 预测值与实测值无明显差异。验证表明榨菜的脆性回归预测方程满足精度要求, 可以用于榨菜脆性的预测, 基于仿生技术的检测法可以替代人类专家进行榨菜脆性的检测。

## 3 结论

3.1 通过对榨菜脆性的测试表明: 基于仿生技术的脆性测试方法可以替代人类专家的感官评定方法, 仿生脆性检测装置在结构和功能方面更接近与人类专家, 而且本测试方法客观、快速、成本低。

3.2 通过相关性分析和多元回归分析, 结果表明仿生检测方法获取的特征参数和感官评定的相关系数较高; 脆性预测方程  $Y=4.457+0.954X_1-3.082X_2$  的预测结果准确, 平均误差小于 10%,  $RSD$  值小于 2.0%, 且  $T$  检验的显著性水平大于 0.05, 预测值与实测值无明显差异。

## 参考文献

- [1] GB/T19858-2005, 地理标志产品(涪陵榨菜)[S]
- [2] J Mojet, E P Köster. Sensory memory and food texture [J]. Food Quality and Preference, 2005, 16 (3): 251-266
- [3] Harry T. Lawless, Hildegarde Heymann. 食品感官评价原理与技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001
- [4] 殷俊, 梅灿辉, 陈斌, 等. 肉丸品质的质构与感官分析[J]. 现代食品科技, 2011, 27(1): 50-55
- [5] YIN Jun, MEI Can-hui, CHEN Bin, et al. Sensory evaluation and instrumental measurement of meatballs [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(1): 50-55
- [5] 张岩, 吴继军, 唐道邦, 等. 香蕉片的真空油炸工艺及质构品

- 质初探[J].现代食品科技,2011,26(9):987-1008
- ZHANG Yan, WU Ji-jun, TANG Dao-bao, et al. Effects of processing conditions on the quality and texture of the vacuum-fried banana chips [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 26(9): 987-1008
- [6] 孟庆军.菊芋及其腌渍品的流变特性和质地评价研究[D].镇江:江苏大学,2007
- [7] Julian F V. Application of fracture mechanics to the texture of food [J]. Engineering Failure Analysis, 2004, 11 (5): 695-704
- [8] 童裳亮.仿生技术[M].南宁:广西教育出版社,2003
- [9] 程胜,任露泉.仿生技术及其在食品工业中的应用分析[J].中国食品学报,2006,6(1):437-441
- CHENG Sheng, REN Lu-quan. Application of bionics technology in food industry [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2006, 6(1): 437- 441
- [10] 王笑丹,孙永海,樊向超等.仿真技术检测牛肉嫩度方法研究[J].中国食品学报,2012,12(12):186-190.
- WANG Xiao-dan, SUN Yong-hai, FAN Xiang-chao, et al. Method of Simulation Technique Detecting Beef Tenderness[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(12): 185-190
- [11] 童春霞,王盈盈,曾小燕等.基于仿生嗅觉系统的苹果储存时间预测模型研究[J].中国食品学报,2013,1(3): 196- 201
- TONG Chun-xia, WANG Ying-ying, ZENG Xiao-yan, et al. Study of apple storage time predictive model using bionic olfactory system [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(3): 196-201
- [12] Kinga Zór, Roberto Ortiz, Ebru Saatci, et al. Label free capacitive immunosensor for detecting calpastatin-A meat tenderness biomarker [J]. Bioelectrochemistry, 2009, 76(1- 2): 93-99
- [13] W L Xu, D Lewis, J Bronlund, et al. Mechanism, design and motion control of a linkage chewing device [J]. Mechanisms and Machine Theory, 2008, 43(2): 376-389
- [14] Mitsuru Taniwaki, Kaoru Kohyama. Mechanical and acoustic evaluation of potato chip crispness using a versatile texture analyzer [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 112(4): 268-273
- [15] Mitsuru Taniwaki, Takanori Hanada, Naoki Sakurai. Device for acoustic measurement of food texture using a piezoelectric sensor [J]. Food Research International, 2006, 39(10): 1099-1105
- [16] A Wodaa, A Mishellany-Dutour, L Batier, et al. Development and validation of a mastication simulator [J]. Journal of Biomechanics, 2010, 43(19): 1667-1673
- [17] Mitsuru Taniwaki, Naoki Sakurai, Hiroyuki Kato. Texture measurement of potato chips using a novel analysis technique for acoustic vibration measurements [J]. Food Research International, 2010, 43(3): 814-818
- [18] Mitsuru Taniwaki, Minami Tohro, Naoki Sakurai. Measurement of ripening speed and determination of the optimum ripeness of melons by a nondestructive acoustic vibration method [J]. Post Harvest Biology and Technology, 2010, 56(1): 101-103
- [19] M Luisa Demattè, Nicola Pojer, Isabella Endrizzi, et al. Effects of the sound of the bite on apple perceived crispness and hardness [J]. Food Quality and Preference, 2014, 38:58-64
- [20] 孙钟雷,孙永海,万鹏,等.仿生咀嚼装置设计与试验[J].农业机械学报,2011,42(8):214-218
- SUN Zhong-lei, SUN Yong-hai, WAN Peng, et al. Design and experiment on bionic chewing equipment [J]. Transactions of the Chinese society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 214-218
- [21] 孙钟雷,孙永海,李宇,等.仿生食品质构仪设计与试验[J].农业机械学报,2012,43(1):230-234
- SUN Zhong-lei, SUN Yong-hai, LI Yu, et al. Design and experiment of bionic food texture analyzer [J]. Transactions of the Chinese society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1):230-234
- [22] 张佳程,刘爱萍,晋艳曦.食品质地学[M].北京:中国轻工业出版社,2010