

平行板电极法检测食品电学特性研究进展

Research progress of electrical properties in detection of food materials based on parallel-plate measurements

杨 哪¹ 金亚美¹ 邬海雄² 马 倩¹ 金征宇^{1,3} 徐学明^{1,3}

YANG Na¹ JIN Ya-mei¹ WU Hai-xiong² MA Qian¹ JIN Zheng-yu^{1,3} XU Xue-ming^{1,3}

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 广东中山市咀香园食品有限公司, 广东 中山 528437;

3. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Juxiangyuan Food Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong 528437, China;

3. State Key Lab of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:平行板电极技术被广泛应用于农产品原料理化指标的检测中,因精度高、方便快捷且具有无损性的特点而见于诸多研究报道。可对食品原料的电学参数如阻抗 Z 、等效电容 C 、导纳 Y 、品质因素 Q 、相位角 θ 、介电常数 ϵ 等进行检测,用于其理化性质、生理状态、品质的评估。对食品物料电学参数的影响因素较多,有环境温度、环境压力和频率因素,还包括食品本身的水分、盐分、成熟度、新鲜度和形态体积等内部因素。文章阐述平行板技术的测试原理,并从果蔬类原料的成熟度无损检测、液态类食品的品质分析等方面对该技术的应用情况进行综述,以期利用平行板技术检测食品材料的相关研究提供参考。

关键词:平行板技术;电学特性;果蔬类原料;液体食品;品质分析

Abstract: The parallel-plate electrode technique is widely used to evaluate physico-chemical properties of agricultural products because of its high precision, convenience and non-destructiveness. Electrical parameters, such as impedance Z , equivalent capacitance C , admittance Y , quality factors Q , phase angle θ and dielectric constant ϵ that are detected by this parallel-plate electrode technique can be used to evaluate a food material's physico-chemical properties, physiological status and quality. Various factors can affect these electrical parameters. Some examples include the environmental factors of temperature and pressure; the measuring conditions of voltage and frequency; and the internal factors of water content, salt content, ripeness, freshness and shape. Therefore, it has been established the

principle of parallel-plate measurement, and demonstrated its applications; namely, in the nondestructive maturity detection of fruits and vegetables, the quality testing of liquid food and the determination of the physico-chemical components of other food products. This review provides reference for future research and applications in food quality determination using the parallel-plate electrode technique.

Keywords: parallel-plate electrode; electrical properties; fruits and vegetables; liquid food; food quality

平行板电极法是测定食品电学特性的一种常用方法,将待测样品放进由两块金属平行电极板构成的电容器中,样品构成一个电介质并对电极板之间的激发电场做出响应,通过 LCR 仪和阻抗分析仪等对响应信号进行采集,根据电容值和样品的物理尺寸计算样品的各类电学参数,可以进一步分析其原料的理化品质和电学特性的相关性^[1]。此方法测量原理较简单,具有快速性、灵敏性和无损性等优点。但是,由于它的测试频率通常低于 100 MHz,在此频率范围内可能产生电极的极化现象,故易造成一定的测量误差^[2]。

食品类原料可分为结构性原料和非结构性原料,结构性原料包括果蔬类、带壳蛋品等可通过平行板技术实现无损检测,而非结构性原料通常为物态均匀的样品,如面包、牛奶、蛋液和糖浆等。当施加交变电场时,极板间的食品原料细胞或组织会表现出特有的电学特征,如阻抗特性、容抗特性和介电特性。这样的特性也被称为无源电学特性^[3]。食品物料内部的化学成分、生理状态及外界测试条件,如温度、电压幅值和信号频率等都会对其电学参数产生较大的影响^[4-9]。对采用平行板电极检测食品物料的电学特性进行研究具有两方面的重要意义:①可以对食品品质进行评估^[10-11],例如果蔬类的新鲜度、成熟度和糖分含量的无损检测,以及液

基金项目: 十二五科技支撑计划(编号:2012BAD37B00)

作者简介: 杨哪,男,江南大学实验师,在读博士。

通讯作者: 徐学明(1968-),男,江南大学教授,博士生导师。

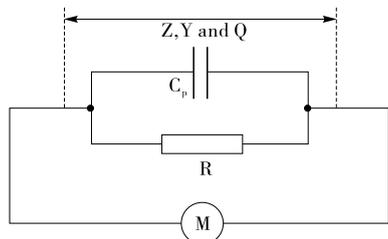
E-mail: xmxu@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2015-11-26

体类食品如蛋液、牛奶和糖浆类的固形物含量分析等；②可以为食品加工技术参数的优化提供参考^{[12-13][14]49-56}，如食品原料的介电参数分析与射频加工参数的关系。因此，文章综述了近年来国内外有关平行板电极技术在食品物料电学特性检测中的研究进展及应用领域。

1 技术原理

交变电场施加于平行板电极之间的待测食品原料时，由于食品中含有大量的水分、有机物和无机离子等成分，故此时在物料中有交变电流传导，待测样品作为电介质与平行板的等效电路可看作为电容和电阻的并联，其等效电路见图1。



M. 信号源 R. 等效电阻 Cp. 平行等效电容 Z. 阻抗 Y. 导纳 Q. 品质因数

图1 平行板电极检测食品物料的等效电路示意图

Figure 1 Layout of the equivalent circuit of food materials in parallel-plate electrodes

根据欧姆定律可知：

$$Z = \frac{U}{I} \quad (1)$$

式中：

Z——样品阻抗， Ω ；

U——极板间电动势，V；

I——通过样品的电流，A。

对于上述电路的参数间关系则可表达为^[1,3]：

$$Z = R + \frac{j}{2\pi f C_p} \quad (2)$$

式中：

R——电阻， Ω ；

f——交变电场频率，Hz；

Cp——等效平行电容，F。

导纳Y则为：

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (3)$$

式中：

Y——导纳，S。

等效电路的品质因素可表达为：

$$Q = \frac{1}{\tan(90 - \arctan \frac{X}{R})} \quad (4)$$

式中：

Q——等效电路的品质因素；

X——电抗， Ω ；

R——电阻， Ω 。

食品物料在交变电场作用下，除了表现出以上所述的阻

抗和容抗特性外，其内部束缚的电荷和自由离子还会产生极化现象，具有介电性质。介电特性通常用复相对介电常数 ϵ 来描述，其数学表达式为：

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (5)$$

式中：

ϵ' ——介电常数，表示食品原料贮存电场能量的能力，F/m；

ϵ'' ——介电损耗因子，表示食品原料将电场能量转化成热量的能力，F/m。

将 ϵ'' 与 ϵ' 的比值称为介电损耗角正切($\tan\delta$)，也记为消耗因素D，与品质因素Q呈倒数关系，即：

$$D = \frac{1}{Q} = \tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (6)$$

2 平行板电极检测技术在食品中的应用

2.1 果蔬类的无损检测

采用平行板电极检测农产品时，果蔬类原料与牛奶、食用油和奶酪等具有乳化特性的产品有显著的结构性差异，大多数通过自然生长的植物类原料都由组织细胞构成，植物细胞外层都有一层类似“隔离膜”的结构，如细胞壁和细胞膜，细胞质和细胞外液中含有一定量的电解液，尽管其中的水分子具有较高的介电常数，但其阻抗值都在几百欧姆范围。

Liu Mei等^[15]通过平行板电极方法测定了100 kHz频率下整个甜瓜的阻抗和电容，采用遗传算法和最小二乘支持向量计算法，对甜瓜的糖度进行了分析，获得了高精度的预测和验证模型。以‘嘎拉’苹果为试验原料，王玲等^[16]发现在0.1 kHz频率下，并联等效电阻与果肉硬度、可滴定酸含量存在显著相关性。安慧珍等^[17]对苹果贮藏期间0.10~3.98 MHz范围内的电学特性进行了测量，发现在39.8, 100, 398, 1 000, 3 980 kHz下，其阻抗值、电抗值与可滴定酸含量呈极显著相关($P < 0.01$)，并建立了串联等效电阻、阻抗与苹果硬度、可滴定酸含量的回归方程，通过电学特性反映了苹果在贮藏期间品质的变化。而在相同的频率范围内，刘亚平等^[18]发现在100 Hz下，葡萄贮藏过程中的硬度、粘着性、弹性、咀嚼性等质构参数可以用电抗值进行表征和量化，建立了二次多项式回归模型。经进一步考察证明^[19]，高品质的葡萄具有较高的阻抗、电抗、电感和电阻值，以及较低的相对介电常数和阻抗角，对采后的葡萄果实进行失水处理，利于储藏期间葡萄品质的保持。陈志远等^[5]研究了番茄生长期间的电学参数变化规律，发现在0.5~5.0 MHz的最佳频率区间内，复阻抗和相对介电常数可以作为辨别番茄成熟度的指标，阻抗系数和复阻抗角可以用于鉴别其原料的转色期。

郭文川等^[20]对桃子在贮藏期间电学特性和生理特性进行了研究，结果表明桃子的生理活动引起内部理化成分发生改变，主要是自由水的散失及离子含量的提高，从而导致电学特性发生改变。在1~5 d的贮藏期内，相对介电常数随时间呈现余弦变化规律，损耗角正切单调递减，并建立了两者与乙烯释放量、呼吸强度之间的数学模型。王瑞庆等^[21]采用平行板电极法对货架期限为1~7 d的红巴梨品质进行了

无损检测及研究,测量了 0.1~5.0 MHz 频率内红巴梨的阻抗、电容、电感和电导以及货架期间中其硬度的变化,发现 1 MHz 下的阻抗、电容、电感值与硬度相关性最大,可以用于评估红巴梨的品质。

通过对比有损伤猕猴桃和无损伤猕猴桃的电学特性,唐燕等^[22-23]发现 100 kHz 和 251 kHz 频率下的损耗系数 D 可以作为判断猕猴桃果实是否损伤的敏感电学参数,之后对基于 0.10 kHz~3.98 MHz 下猕猴桃的电学参数与其生理特性进行研究,通过分析两者之间的相关性,找到了可量化各生理特性指标(硬度、可溶性固形物、可滴定酸含量、相对电导率、淀粉含量、原果胶含量、纤维素含量、木聚糖酶活性)的电学参数。廖宇兰^[24]根据尺寸将芒果分成大、中、小 3 种类型,并建立了不同芒果基于介电特性的生理指标如总酸含量、 V_c 含量、总糖含量、水分含量的无损检测方法。邵晓蕾等^[25]利用特征频率 398 kHz 下的阻抗、串联等效电阻、并联等效电容对采后尖柿果实的果肉硬度、可滴定酸含量、可溶性固形物及可溶性单宁含量进行了量化,发现由单宁含量与并联等效电容构建的线性回归方程具有最有效的预测精度且决定系数为 0.967。马海军等^[26-27]对比了正常苹果和感病苹果于储藏期间的电学特性的变化规律,结果表明可以用介电常数、损耗因子和电容值作为这两类果实品质的评判参数。

采用平行板电极检测果蔬时频率范围大多在 10 MHz 以下且样品必须与电极充分接触,但在实际生产中则不广泛应用,原因是阻抗分析仪价格较为昂贵,且操作人员高估仪器本身功能而低估了实际工作环境的复杂性和人为不确定性。在履带式连续无损检测果蔬品质的系统中,采用平行板电极并对其阻抗进行测量具有显著的优势,可作为一个多参数测量的补充方法来应用。

2.2 液态食品品质分析

采用平行板检测食品阻抗的原料对象可分为结构性材料或非结构性材料,结构性材料包括如蔬菜、鱼类和肉类等具有“隔离膜”类的生物组织原料,非结构性材料则为均相的食品原料如乳制品、油脂类和果汁类产品。相对于频率而言,测试电压是独立的,实际测量中平行板间的电极电压一般在 10~300 mV。平行板电极对液态食品的检测主要应用在以下方向。

2.2.1 果蔬汁浓度的预测 Ryszard Zywicka 等^[28]对浓度为 20%,40%,60%,80%,100% 的苹果汁在 0.1~100.0 kHz 频率范围内的电学特性进行了测量,发现不同浓度果汁的阻抗、导纳、电阻和电导差异显著,而等效并联电容、等效串联电容之间的差异不显著,说明此范围内的阻抗、导纳、电阻和电导具有可评估果汁稀释度的潜力。G Pierzynowska-Korniak 等^[29]继而对 3 种不同工艺生产的苹果汁稀释度与电学参数相关性进行考察,发现其阻抗和电阻与果汁稀释度呈现良好的负线性相关,导纳和电导与稀释度之间呈现良好的正线性相关。

2.2.2 液态食品化学成分含量的检测 B A Lawton 等^[30]测定了脂肪含量为 0.15%~51.00% (m/m) 的牛奶和冰激凌

在 0.005~200.000 kHz 频率范围内的电导率和容抗,发现 100 kHz 为脂肪含量敏感频率,利用此频率下的电导率和容抗可预测其脂肪含量,准确度介于 $\pm 0.08\%$ ~ $\pm 0.80\%$ 。Ryszard Zywicka 等^[8]选取脂肪含量为 0.03%,1.03%,2.05%,3.03%,4.03%,5.10% 的鲜奶,研究了其在 0.1~100.0 kHz 频率范围内的阻抗、导纳、并联等效电容和串联等效电容的变化趋势,发现以上电学参数与脂肪含量具有良好的相关性,并建立了两者之间的线性模型。

2.2.3 食用油品质的鉴定 为了对食用油品质进行检测和掺假鉴定,Joanna K Banach 等^[4]将黄油与菜籽油按照 90:10,80:20,70:30,60:40 的质量比混合,测量了油脂混合物在 20 Hz~2 MHz 频率范围的阻抗、导纳、并联等效电容、并联品质因子、串联等效电容和串联品质因子,激励电压为 200 mV 时,发现在 20,40,80,100,500 Hz 下,电学参数和菜籽油掺杂比例显著相关(相关系数 $0.943 \leq r \leq 0.989$),建立了两者的线性模型,取得了良好的预测精度。Hu Li-zhi 等^[31]采用 PLS 模型结合主成分分析的方法,分析了橄榄油基于 101 Hz~1 MHz 下的介电常数,对橄榄油是否掺假和掺假比例进行了鉴定和预测,并取得了良好的预测和验证结果。

对液体食品原料阻抗测量所广泛应用的方法是向电极间样品通入交变的电压,可由式(7)得出其阻抗值。也可通过平衡电桥方法进行测量,但技术较为繁琐,代表设备如网络分析仪。通过对样品电流和电压的测试是液体食品原料阻抗测量中最直接的方法。

$$Z = \frac{U}{I} \quad (7)$$

式中:

Z ——阻抗, Ω ;

U ——电压, V;

I ——电流, A。

2.3 其他食品理化品质评估

任何食品原料都具有电学特征且属于无源器件类。无源器件是指材料本身没有“电涌”的来源,只是消耗能量如欧姆电阻、电容和电感。阻抗特性是食品原料在外电场下阻碍电流通过的特性。测量中不需要高强度的电场,而只需要在平行板间施加微小的交变电场以保证在原料上通过的电流和电压为线性关系,同时不引起原料的化学或者物理变化。

由于食品物料的物理形状、化学成分对其电学性质存在很大影响,因此,为了获得稳定可靠和普适性的测试结果,采用平行板电极法检测食品的电学特性多选用质地和成分均匀的样品。为了鉴别 PSE(pale, soft and exudative)肉、RFN(red firm and non-exudative)肉和 DFD(dark, firm and dry)肉,Marta Castro-Giráldez 等^[32]对屠宰后 12,24,48 h 和 7 d 的猪肉进行了 pH 值、 L^* 值和失水率的分析,并测定了 40 Hz~4 MHz 频率范围内猪肉的介电谱图,结果发现 PSE 肉和 DFD 肉在熟化过程中介电谱变化明显,而 RFN 肉的介电特性变化不显著;经 24 h 熟化之后,PSE 肉、DFD 肉与热鲜肉的介电常数和介电损耗因子呈现出显著的差异,并提出

利用 0.14, 0.50, 300.00 kHz 下的介电特性, 可以对肉品质进行分级, 鉴别出低品质肉。王松磊等^[33]研究了常温和冷藏条件下羊肉的电学特性, 选取的激励电压为 0~5 V, 信号频率为 1~4 kHz, 发现当测试条件为电压 2~4 V, 频率 2~4 kHz 时, 可获得较稳定可靠的阻抗值与损耗系数值, 并观测到在 1.9 kHz 下, 羊肉组织的电学参数发生明显的 α 频散; 常温和冷藏两种储藏条件下, 电导随储藏时间单调递增, 两参数呈现三次多项式关系, 而阻抗随储藏时间的增长缓慢下降; 由于在电压 3.9 V 和频率 3.6 kHz 下, 不同部位羊肉的电导值具有显著差异, 因此可凭借此条件下的电导特性对羊肉做出鉴别。

为了实现乳品品质的电学检测, 金亚美等^[34]分析了全脂乳粉和脱脂乳粉在 1 kHz~10 MHz 频率段的介电特性, 发现脂肪和乳糖含量的不同造成了两者介电常数和介电损耗因子的显著性差异; 杨哪等^[35]对 3 类巴氏杀菌的全脂乳、低脂乳、脱脂乳的电学特性进行了研究, 建立了 RC 等效电路以及稀释比例与其阻抗、相位角之间的数学回归模型, 并发现在 207 Hz 下的低脂乳的相位角和储藏时间呈对数关系, 决定系数为 0.889。

张蕾^[36]对新鲜鸡蛋和不同储藏期间的鸡蛋介电特性和理化品质进行了研究, 发现在激励电压 0.8 V 及频率 0.1~1.0 MHz 的测试条件下, 新鲜鸡蛋的相对介电常数与代表鸡蛋新鲜度的哈夫单位、蛋黄指数之间存在显著的相关性, 但未发现储藏鸡蛋的介电性质与理化品质的相关关系。秦文等^[37]对胡萝卜在储藏期间的电容与新鲜度的变化规律进行了探索, 发现胡萝卜色泽、硬度、水分含量随储藏时间发生明显改变, 可以做为判断胡萝卜新鲜度的指标, 0.1~1.0 kHz 频率范围下的电容值和储藏期胡萝卜的新鲜度指标呈现出线性相关性。马倩等^[38]和金亚美等^[39]分别对黄瓜盐渍和醋渍期间的电学特性做了研究, 找到了黄瓜理化成分含量预测的特征频率及敏感电学参数, 对黄瓜盐分和水分的浸渍调味类产品的重要理化指标进行了量化。

交流电压和电流通过放置于食品原料表面的电极传入检测对象, 并将农产品原料中的组织或细胞、蛋白质看成由阻抗大小不同的基本单元器件经过串、并联组成的一个复杂而庞大的电路系统。由于不同组织间或同种组织的不同取向上细胞结构、形态、排列方式及细胞膜的离子通道的结构和数目均不同, 因此表现出不同的阻抗差异。

3 讨论

食品原料的阻抗测量技术是从材料学和通信技术中引入的, 平行板电极除了用于电子器件的电学测量外, 同样被广泛应用于农产品原料的阻抗测试, 随着目前越来越多的生物阻抗测量设备的出现。平行板技术作为一种电介质的电学参数检测技术, 可快速和无损地对食品成分进行定性和定量分析, 但实际应用也具有一定的局限性, 测量频率通常在 100 MHz 以下。食品原料的电学参数也受诸多因素的影响: ① 温度、压力等外界环境因素^{[6,11][14]30-36}; ② 激励电压和信号频率等测试条件^{[9,26-27][36]23-24}; ③ 样品理化成分和生理状态等内在因素^[4,17-20,23]。

目前基于平行板技术的食品原料电学检测研究主要集中在通过测试电压幅值、信号频率的变化来对其理化成分和生理状态进行定量分析, 建立模型后再利用电学参数对验证样本的理化指标做出回归分析。介电常数虽然可以通过阻抗测量的方式获取, 但是食品原料的介电特性可作为单独的电学参数进行分析, 通常情况下阻抗参数与材料测量时平行板电极间的空隙及其充满电极的材料比率有关联, 但介电常数则与此无关。目前, 针对温度和环境压力对食品原料电学参数的影响研究相对较少。温度和环境压力属于食品加工和储藏工艺中的重要参数, 所以研究环境因素变化下的食品电学特性, 对食品加工条件的优化具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] Hewlett-Packard. Solutions for measuring permittivity and permeability with LCR meters and impedance analyzers[Z]. Palo Alto: Agilent Technologies Co. Ltd., 2006.
- [2] 王瑞庆, 冯建华, 徐新明, 等. 果蔬电学性质的测试技术及影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2012(19): 321-325.
- [3] Pliquett U. Bioimpedance: a review for food processing[J]. Food Engineering Reviews, 2010, 2(2): 74-94.
- [4] Banach J K, Zysica R, Nieradko I, et al. Studies on determination of mathematical relationships between rapeseed oil content and electrical properties of butter and fat mixes[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 11(4): 346-351.
- [5] 陈志远, 张继澍, 刘亚龙, 等. 番茄成熟度与其电学参数关系的研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(4): 826-830.
- [6] 杜光源, 唐燕, 郭嵩光, 等. 温度对‘嘎啦’苹果电参数的影响[J]. 食品科学, 2012(18): 294-297.
- [7] 周永洪, 黄森, 张继澍, 等. 火柿果实采后电学特性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 117-122.
- [8] Zysica R, Zysica R, Kielczewska K. An attempt of applying the electrical properties for the evaluation of milk fat content of raw milk[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(2): 420-424.
- [9] 郭文川, 郭康权, 王乃信. 电激励信号的频率和电压对果品电特性的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 62-65.
- [10] 邓云, 王竹怡, 钟宇, 等. 射频技术及其在低水分活度食品中的应用[J]. 食品与机械, 2013, 29(3): 250-253.
- [11] Saranga S, Sudhir K Sastrya, Lynn Knipeb. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(3): 351-356.
- [12] Piyasena P, Dussault C. Continuous radio-frequency heating of a model viscous solution: influence of active current, flow rate, and salt content on temperature rise[J]. Canadian Biosystem Engineering, 2003, 45: 327-334.
- [13] Cong Hai-hua, Liu Fang, Tang Zhong-wei, et al. Dielectric properties of sea cucumbers (*Stichopus japonicus*) and model foods at 915 MHz[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(3): 635-639.
- [14] 贾敏. 介电特性在鲍鱼加工中的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [15] Liu Mei, Jia Zhen-hong, Yao Yong-bo, et al. The model of measuring melons' sugar based on resistance and capacitance[C]//Advanced Computational Intelligence (IWACI), 2011 Fourth Interna-

- tional Workshop on. Wuhan: IEEE, 2011: 34-36.
- [16] 王玲, 黄森, 张继澍, 等. 嘎拉苹果果实品质的电学特性研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(2): 402-407.
- [17] 安慧珍, 马惠玲, 任小林. 苹果果实贮藏期间电学参数与品质指标的关系[J]. 食品科学, 2013, 34(2): 298-302.
- [18] 刘亚平, 刘兴华, 李红波. 葡萄冷藏中电学参数与质地特性变化规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 343-348.
- [19] 刘亚平, 刘兴华. 采后失水处理对葡萄电学特性的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 143-149.
- [20] 郭文川, 朱新华, 郭康权, 等. 桃的电特性及新鲜度识别[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 112-115.
- [21] 王瑞庆, 张继澍, 马书尚. 基于电学参数的货架期红巴梨无损检测[J]. 农业工程学报, 2009(4): 243-247.
- [22] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 损伤对猕猴桃果实电特性的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 6-11.
- [23] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 猕猴桃电特性与生理特性关系研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 97-102.
- [24] 廖宇兰. 基于介电特性的芒果无损检测技术研究[D]. 海南: 海南大学, 2008: 26-50.
- [25] 邵晓蕾, 黄森, 于春阳, 等. 尖柿果实采后电学特性与品质指标的关系[J]. 西北农业学报, 2010, 19(9): 80-87.
- [26] 马海军, 宋长冰, 张继澍, 等. 电激励信号频率对红点病苹果采后电学特性影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 97-101, 96.
- [27] 马海军, 冯美, 张继澍. 100 Hz~3.98 MHz 下苹果虎皮病果实电特性研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 105-109.
- [28] Zywicka R, Pierzynowska-Korniak G, Wojcik J. Application of food products electrical model parameters for evaluation of apple puree dilution[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67(4): 413-418.
- [29] Pierzynowska-Korniak G, Zywicka R, Wójcik J. Electric properties of apple purée and pulpy apple juices[J]. European Food Research and Technology, 2003, 216(5): 385-389.
- [30] Lawton B A, Pethig R. Determining the fat content of milk and cream using AC conductivity measurements[J]. Measurement Science and Technology, 1993, 4(1): 38-41.
- [31] Lizhi H, Toyoda K, Ihara I. Discrimination of olive oil adulterated with vegetable oils using dielectric spectroscopy[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(2): 167-171.
- [32] Castro-Giráldez M, Botella P, Toldrá F, et al. Low-frequency dielectric spectrum to determine pork meat quality[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(2): 376-386.
- [33] 王松磊, 贺晓光, 赵大鹏. 基于介电特性的羊肉品质无损检测[J]. 宁夏工程技术, 2013, 12(1): 30-34.
- [34] 金亚美, 王宁, 孟彤, 等. 全脂乳粉和脱脂乳粉在 1 kHz~10 MHz 下的介电特征研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(8): 152-155.
- [35] 杨哪, 金亚美, 薛丽萍, 等. 利用电学阻抗技术检测巴氏杀菌乳的物理特性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 275-283.
- [36] 张蕾. 鸡蛋介电特性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [37] 秦文, 羽仓义雄, 铃木宽一, 等. 胡萝卜贮藏过程中电容与新鲜度的关系研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 160-162.
- [38] 马倩, 杨哪, 金亚美, 等. 盐渍期间黄瓜理化品质与电学参数的相关性[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(1): 41-47.
- [39] 金亚美, 杨哪, 张晋芳, 等. 真空醋渍黄瓜品质的介电检测[J]. 现代食品科技, 2013, 29(11): 2762-2766.

(上接第 153 页)

- [5] 吕昱, 严敏. 紫薯花色苷的生理功能及分离纯化研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(4): 250-257.
- [6] 沈升法, 吴列洪, 李兵. 紫甘薯颗粒全粉加工专用品种品质指标和策略的初步探讨[J]. 核农学报, 2015, 29(5): 908-915.
- [7] 汤富蓉. 紫色甘薯全粉加工关键技术的研究[D]. 成都: 西华大学, 2011.
- [8] 丁媛媛. 甘薯变温压差膨化干燥技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011: 9.
- [9] 邓资靖. 紫薯全粉加工工艺研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [10] 黄寿恩, 李忠海, 何新益. 果蔬变温压差膨化干燥技术研究现状及发展趋势[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 242-245.
- [11] 宋阳. 变温压差膨化干燥甘薯脆片技术的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012: 8-9.
- [12] 何新益, 冯瑞伟, 黄宗海, 等. 冬枣变温压差膨化干燥工艺的研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(4): 126-128.
- [13] 马寅斐, 朱凤涛, 周元妍, 等. 非油炸膨化紫薯脆片加工工艺研究[J]. 中国果蔬, 2012(1): 56-58.
- [14] 毕金峰, 丁媛媛, 王沛, 等. 胡萝卜变温压差膨化干燥影响因素研究[J]. 食品与机械, 2009, 25(5): 14-17.
- [15] 高鹤, 易建勇, 刘璇, 等. 响应面法优化番木瓜变温压差膨化干燥工艺[J]. 食品科学, 2014, 35(24): 51-56.
- [16] 郭婷, 邓放明, 何益新. 预处理方式对甘薯变温压差膨化干燥产品品质的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 202-204, 250.
- [17] 罗红霞, 宋阳, 汪长刚, 等. 变温压差膨化干燥对甘薯片营养成分及微观结构影响的研究[J]. 食品工业, 2013, 34(11): 12-15.
- [18] 揭小玲. 紫薯全粉品质特性及紫薯饼干加工技术研究[D]. 福建: 福建农林大学, 2013: 14-25.
- [19] 蒲传奋, 唐文婷, 张岩, 等. 紫薯全粉间护色及干燥工艺的研究[J]. 食品科技, 2014, 39(3): 125-127.
- [20] 崔璐璐, 林长彬, 徐怀德, 等. 紫马铃薯全粉加工技术研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(5): 221-224.
- [21] Giusti M M, Wrolstad R E. Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. Current protocols in food analytical chemistry[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2001: F1.2.1.1-1.2.13.
- [22] Saigusa N, Terahara N, Ohba R. Evaluation of DPPH-radicalscavenging activity and antimutagenicity and analysis of anthocyanins in an alcoholic fermented beverage produced from cooked or raw purplefleshed sweet potato(Ipomoea batatas cv. Aya-murasaki) roots[J]. Food Science and Technology Research, 2005, 11(4): 390-394.
- [23] 张森, 李燮昕, 张振宇, 等. 紫薯颗粒全粉加工工艺优化[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 175-178.