

食品电物性在无损检测中的应用研究进展

马荣朝, 秦文*, 吴维雄, 周熙, 张道德, 辛松林

(四川农业大学信息与工程技术学院, 雅安 625014)

摘要: 现代农业和食品加工的快速发展, 使农产品的品质检测技术显得非常重要。无损检测技术已成为食品科学的一个重要研究热点, 利用电物性对农产品品质检测、分级筛选等方面已显示出特殊的优越性。该文从农产品的含水量、可溶性固形物含量、新鲜程度等指标的检测及食品干燥、油炸、发酵、冷冻等过程的在线检测方面, 阐述了利用电物性的食品无损检测技术的研究现状, 也提出了今后进一步研究的方向和目标。

关键词: 食品; 电物性; 无损检测

中图分类号: TS207

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0278-06

马荣朝, 秦文, 吴维雄, 等. 食品电物性在无损检测中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 283- .

Ma Rongchao, Qin Wen, Wu Weixiong, et al. Review of research advances in non-destructive quality evaluation technology of food by dielectric property[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 278- 283. (in Chinese with English abstract)

0 引言

食品物性学已成为食品科学研究和食品工业发展必要的研究领域, 特别是现代工业化、标准化、规模化食品生产的要求, 使得对食品的各种性质从传统的感性认识向定性定量认识的发展成为必然。食品的物理性质包括力学性质、光学性质、热学性质和电学性质等^[1]。其中关于电物性的研究相对较晚, 研究报道较少。物质的电特性包括导电特性和介电特性, 介电特性是生物分子中的束缚电荷对外加电场的响应特性, 它的应用范围非常广泛, 在农产品贮藏保鲜、电加工、品质检测、筛选分级等方面都显示出特殊的优势, 早在 20 世纪 40 年代发达国家就开始进行了研究, 目前主要是日本、美国研究得较多, 处于世界领先水平。中国在 20 世纪 80 年代后才刚开始起步, 尤其是利用电物性对食品品质的无损检测与评价、食品加工过程的控制等方面的研究还相当落后, 很多方面几乎处于空白。

无损检测(NDT) 技术是在不破坏被检对象的前提下, 运用各种物理学的方法如声、光、电、图像视觉技术等手段对物料进行检测分析的一种方法和技术。主要是基于被检物料的物理性质如密度、硬度形态、颜色等, 进

而判定成熟度以及内部的含糖量、糖酸比、水分、内部病变等。主要包括力学方法、电磁学方法、光学方法、放射线法、计算机图像处理技术和电子气味检测法(电子鼻)等^[2]。在获取样品信息的同时保证了样品的完整性, 检测速度较传统的化学方法迅速, 且能有效地判断出从外观无法得出的样品内部品质信息。随着现代物理学、材料科学、微电子学和计算机技术的发展, 无损检测技术也随之迅猛发展起来^[3]。它在一般工业领域作为产品的品质特性测定手段已成为常规方法, 但在农产品和食品加工领域还是一种崭新的概念, 是 20 世纪 80 年代才出现, 但近年来发展迅速, 已成为食品加工业最具活力的一个研究方向, 特别是食品安全问题受到进一步重视后对该技术提出了更高的要求。

利用电物理特性进行农产品及食品品质检测, 为食品加工自动化、品质控制精确化提供了重要手段。无损检测具有直观、可实时、易数字化、可实现三维图像、应用范围广等特点。该领域是计算机技术、应用物理技术、农业科学及食品科学相结合的新兴交叉学科, 其发展速度很快, 已成为食品科学的一个重要研究热点。

1 利用电物性的食品无损检测技术研究现状

食品的组织、成分、结构、状态等都和它们的电物性有密切的关系, 研究和认识食品电物性的意义归纳起来主要有两点: 一是利用食品电物性对食品的成分、组织、状态等品质的检测和评价; 二是在食品加工中最有效地利用其电磁物理性质, 将传统加工方法和电力加工方法合理结合起来, 开发更经济合理的新的加工技术, 如电磁波加工、静电场加工和电阻抗加工等。

收稿日期: 2006-08-14 修订日期: 2007-03-28

基金资助: 四川省教育厅重点项目(2005A031); 四川省教育厅重点实验室项目(2006ZD007); 四川农业大学青年创新基金项目(005301)

作者简介: 马荣朝(1954-), 男, 副教授, 从事食品机械与设备方向的研究。雅安 四川农业大学信息与工程技术学院, 625014

*通讯作者: 秦文, 女, 教授, 博士后。雅安 四川农业大学信息与工程技术学院, 625014。Email: qinwen1967@yahoo.com.cn

利用电特性进行食品品质的检测研究已有几十年的历史,最早在植物的形状、种类及生长过程的检测中得到应用,发展到现在已在水果、蔬菜的成熟度、新鲜度及分选,发酵过程中活菌数的检测,谷物品质检测及分级等方面进行了较广泛的研究,相信进入实用化阶段已为期不远。

1.1 农产品含水率的测定

含水率是了解农产品的新鲜度、保存状态和内部品质的重要指标,也是果蔬分级和贮藏加工时的重要参数。试验表明,含水率与介电常数、电导率等有密切的关系。

粮食是由淀粉、蛋白质、脂肪等高分子有机化合物以及水分和少量矿物质组成的混合物。从电磁理论分析,粮食的介电特性是由粮食的各种成分、分子结构的电性所共同决定的^[4],但大量实验测量表明,失去游离水分的干燥粮食,相对介电常数很小。以小麦为例,通过烘干的小麦,其相对介电常数为3~5,这表明尽管淀粉、蛋白质等是有极分子,但它们表现的极性很弱。而水的相对介电系数高达81,显然影响粮食介电特性的主要因素应是粮食中的游离水分。这就为通过对介电特性的测定而确定粮食含水量提供了理论根据^[5]。任何频率上介电常数随含水率的增加而递增,而损耗因素取决于频率区域和含水率范围而时增时减;阻抗与水分在一定范围内(5%~15%)基本呈对数, $Z = a + \log_b(a, b$ 均为常数)谷物含水率与电阻率及介电常数存在着指数关系,已研制出电阻型和电容型谷物水分快速测定仪,大大方便了谷物的收购、贮藏和运输;利用谷物的电特性,还可进行谷物干燥过程的温度、湿度控制以及在面粉加工过程中,向谷物加水量的控制,以保证干燥和加工面粉的品质。

Nelso S. O. 等^[6,7]通过研究燕麦、大米的电阻,获得了相关的数学模型,通过研究谷物和大豆的介电常数,进行了谷物和大豆的无损湿度测量;1990年,钱新耀等^[8]开发了在不同频率下,测定种子电阻率和介电常数的测试系统,并研究了蔬菜种子的含水率和测试频率对种子电传导和介电特性的影响,获得了含水率和介电特性的回归方程。1992年,沈以煦^[9]研究了水稻、小麦、油菜籽3种物料电特性,并对实测物料的频率特性及其与物料含水率的函数关系进行了分析和研究。1998年,徐保江等^[10]根据物料的含水率对其介电常数的影响,得出了物料的介电特性与含水率之间的函数关系主要与物料的品种有关,提出了一套简单、易行测定水稻、玉米和大豆3种物料含水率的系统。1998年,尤田束^[11]设计了一种适用于测量谷物、小颗粒种籽和粉状材料介电特性的测试系统并进行了上述物料介电特性的测量。程卫

东^[12]采用同心圆式电容传感器对谷物干燥设备进行在线水分测量及控制,建立了定流量条件下谷物水分同电容传感器振荡频率、谷物温度相关的数学模型。

三代达也等^[13]用近红外光谱光导纤维透射法快速无损检测干燥香肠中的水分,第2个衍射光谱在波长972 nm的波谷时随着干燥香肠水分含量下降而变小。因水分活度和干燥香肠中的水分含量有着很高的相关性,相关系数为0.982,通过用近红外光谱透射法测定水分活度就可以判断干燥香肠中的水分含量,这也为干燥香肠加工过程控制提出了新的方法。Bengtsson和Risman^[14]发现当用3000 MHz检测高含水量食品,介电损耗因子随被测物湿度的增加而上升。Nelson分别用20、300、2450 MHz频率检测谷物类发现谷物的湿度与介电损耗因素间存在负线性相关关系。Favreau^[15]研究在2450 MHz下枫糖浆介电损耗在湿度35%~98%范围时的变化,得出介电损耗因子随湿度的上升而下降的结果。Funebo和Ohlsson^[16]研究了2800 MHz湿度44%~67%范围内介电损耗因子将出现一个峰值。在奶酪加工中,湿度是影响其成品品质的重要因素。

1.2 果蔬可溶性固形物和酸度的测定

由于果蔬的种类之间以及不同品种之间有较明显的差异,其电特性也不同。这种差异使得对果品电特性的研究在国内外还未得到广泛的重视。含糖量和酸度是果蔬品质的一个重要衡量指标,其大小直接影响着果品的品质和口味。1997年,加藤宏郎^[17]对西瓜的试验研究表明,含糖量与电阻和电导率等有关。现在已利用电导率进行柑橘有机酸和含糖量的定量测定,开发了相关的仪器和方法,正在进入实用阶段。同时,还对西瓜的密度和内在质量的关系进行了研究,提出通过电容测量西瓜的体积,通过电平衡测量质量,从而得出了新的自动密度分类系统,用以测量西瓜的空洞度。孙光伟^[18]依据直流电动机工作在软特性区间内,其转速随着转动转矩变化而变化的机理,研制出一种能够在奶粉生产过程中实时检测乳浆浓度的传感器,具有结构简单、体积小、成本低、精度高的特点。Chen P.^[19]进行了用NMR技术高速在线检测鳄梨成熟度的可行性研究。Ryszard Ż. 等^[20]利用电特性参数值电容 C ,电导 G ,阻抗 Z 和电阻 R 等检测苹果汁的浓度和品质,从而达到了生产过程的在线监控。

1.3 新鲜果蔬品质的检测

近年来,有一些关于果蔬贮藏和分级的过程中电特性应用的相关报道。Thompson和Zachariah^[21]在300~900 MHz的频率范围对苹果的介电特性进行了研究,发现苹果的介电特性随其成熟度的不同而变化,未成熟果的介电常数在这个频率范围内几乎保持不变,而

成熟的苹果随频率的增加而减少。McLendon 和 Brown^[22]对梨的介电特性在 0.5~5 kHz 的频率上进行了测试,测试结果显示梨的介电常数和损耗角正切随频率增长而呈减少趋势;相反,随着梨的逐渐成熟,两者均逐渐增大。加藤宏朗^[23]对果品的试验研究发现,在 100 Hz~100 kHz 频段内,随着苹果新鲜度降低,其果肉阻抗趋于增加,相对介电常数和介质损耗因数下降,由此研制出最早真正意义上的介电特性果蔬无损检测系统,采用一台基于电桥原理的阻抗分析仪(YHP, 4192A),首先测定水果的阻抗矢量 Z ,求得阻抗绝对值、相位角、串并联等效电阻、等效电容 C 等参数,在频率为 10 Hz~13 MHz 的范围内进行 32 点扫描测定,并由微机控制和处理。张立彬^[24]在 1996 年采用平行平板电极研究了金帅苹果切片组织的介电特性与新鲜度的关系,得出了在 10~100 kHz 的频率范围内,当苹果的新鲜度降低而没有受损腐烂时,其果肉组织相对介电常数和损耗因素下降,等效阻抗趋于增加,苹果的介电特性与新鲜度具有明显的相关性。胥芳^[25]1997 年研究了用无损检测方法测定桃子在储藏过程中电特性的变化,得出在 12~100 kHz 的频段内,当最佳测试频段为 15 kHz 以下时,随着储藏时间的增加,桃子的等效阻抗、相对介电常数和介电损耗减小,当桃子开始腐烂时,电特性数值出现一个大的反复。1997 年,李劲等^[26]研究了人工电磁场环境及由高电场而派生的放电环境对芒果、柑桔、苹果等水果采后生理的影响,结果表明:利用一定的电场和放电环境可以延缓水果在储藏中的衰老过程,有利于保鲜。胥芳^[27]以苹果和梨为试验对象,研究了低频段水果电特性参数的频率特性及其与水果品质特征之间的关系,提出了基于电特性参数可以实现水果在线无损自动化评价和自动分级的结论。2002 年胥芳^[28]等人提出了基于电特性参数无损检测的水果品质自动分选系统分类阈值的确定方法,对苹果的分类准确性在一定条件下可达到 80% 以上。郭文川^[29]研究西红柿的成熟度与电特性之间的关系,得出了西红柿的成熟度与相对介电常数和等效阻抗之间有明显的关系,在一定频率下,未熟果的相对介电常数和等效阻抗最大,微红组的居中,成熟果的最小,所以可以通过检测西红柿的电特性值来判断其成熟度。郭红利^[30]2004 年以猕猴桃为对象,借助于自行设计的测试系统,研究了测试条件、电激励信号、果品种类和破损等对猕猴桃介电特性参数的影响,得出猕猴桃的相对介电常数随夹持力和夹持时间的增加而增大;在极板直径小于果径时,电容随极板面积的增加而增大;在室温条件下,相对介电常数和损耗角正切随温度的增大而增大,电阻率随温度的增大而减小;猕猴桃介电参数的电压特性有一“电压临界值”,当

信号电压大于临界值时,电容和电阻迅速减小,损耗角正切急剧增大。秦文^[31]提出了用电容法测定胡萝卜贮藏过程中的新鲜度的可行性。从宋金亚^[32]的试验可知,利用介电特性无损检测方法来评定苹果的内部品质在技术和原理上都具有可行性,应用前景非常广阔。

1.4 对发酵过程一些指标的检测

发酵过程的影响因素很多,如发酵液的成分、溶解氧含量、温度、pH 值等。其中生物量的浓度是确定发酵产物得率的一个重要指标,传统的控制方法是离线检测,难以实现发酵的自动控制。18 世纪末人们就认识到,微生物的存在会影响发酵液的电特性。对发酵液的电特性参数进行监控,实现对发酵过程的实时在线检测成为近年研究的热点。从电学角度来说,一切物质的电特性都可以用电导率和电容率来表征。发酵液的介电特性与其化学成分,酵母浓度,温度等诸多因素有关。不同的发酵产品对发酵过程的要求检测指标各不相同。

在清酒发酵过程中发酵液的温度和酸度的控制是产品品质的关键因素。1996 年,Hideyuki 等^[33]研究清酒发酵过程中的麦芽浆的电导率,得出发酵过程中电导率和温度之间关系和其在 15℃ 时电导率和氨基酸酸度的一元线性回归方程: $L_{15} = 153.28F + 209.62$ ($R^2 = 0.94$),可以通过发酵过程中麦芽浆导电率的测量,控制清酒发酵的最适温度以及用电导率测量仪实现对发酵过程麦芽浆的酸度的实时在线检测,最终实现生产的自动化控制。1999 年,王贻俊和 Olsson L. 等^[34]以含酵母的啤酒麦芽汁为研究对象,得出了介电常数与酵母浓度和测试频率具有相关性,发酵液中酵母浓度越大,介电常数也越大,提出了优于传统干重法和光密度法的新的实时在线检测方法。2002 年,乔晓艳等^[35]利用发酵液在无线电频率范围内的电容率是测量频率与菌体浓度的函数,提出了一种实时在线检测发酵过程菌体浓度的新方法,设计了检测传感器和自动检测系统,并且以面包酵母菌发酵过程在线检测实验验证了该检测方法及其检测系统的可行性。

1.5 对食用油的品质及油炸过程的检测

在油炸过程中油脂会发生一系列的化学变化,使维生素和饱和脂肪酸被破坏,同时产生对人体有害的致癌物质。所以,在不损坏产品的同时对油炸过程中油劣化程度和产品品质实行实时在线检测是十分重要的。

C. W. Fritsch 等^[36]比较了用植物氢化油,动植物油,大豆油对土豆油炸脆化加工过程中油的介电常数变化和油极性化合物总量、过氧化值、碘价等指标之间的关系,提出可以通过测量介电常数来实时在线检测油的劣化程度。羽仓义雄^[37]研究了用大豆油油炸冻肉丸的过程中介电特性、温度、水分等参数随着时间的变化规

律及电容和解冻终点,加热终点之间的关系,提出通过对油的电容检测可以评价油的劣化程度,准确判断冻肉丸加工的最佳加工时间和温度。羽仓义雄^[38]从食用油脂的电容-温度的关系曲线与DSC曲线之间的关系着手,提出了用电容测定油脂融点的可行性。佐佐木芳浩^[39]用自制的网状平行板电极测量油炸用油的介电特性,结果表明:油炸过程中电导的变化趋势是先上升,后下降,油炸过程中由于水分的蒸发导致电容随之下降,电导、油脂品质指标和水分蒸发率之间存在线性关系,提出了利用电物性对油炸加工过程实现无损检测的可能性。

1.6 对调理食品加工过程的检测

荒木元章^[40]研究了小麦、马铃薯等5种淀粉糊化、老化过程中电特性的变化,结果显示在淀粉加热过程中,介电常数呈曲线变化,中间有一跃变区域,跃变的转折点与用DSC曲线分别得到的转折点一致,从而能准确地描述淀粉质原料的糊化和老化过程。羽仓义雄等^[41]进一步研究了煮饭过程中电容的变化规律,根据电容的变化来准确确定煮饭的时间。孙永海^[42]等用图像处理方法提出了在线自动检测膨化食品表面质量的新途径。

1.7 对干燥过程的检测

干燥食品加工是一种传统的食品加工方式,对其干燥过程的控制是食品加工十分重要的环节,一般的控制方法是检测加工过程中的含水率变化和感官检测性状变化等,但是都很难准确地检测干燥箱中产品水分的变化,控制操作复杂且准确度不高。2005年,秦文等^[43]选用新鲜胡萝卜、葱为材料,研究干燥过程中原料电物性及水分含量变化规律的相关性,提出水分的变化规律可以用相对应点的电容的变化来说明,从而对干燥终点的非破坏性及连续性检测和控制成为可能。土肥贞夫等^[44]以胡萝卜和鸡肉为研究对象,测量了样品干燥过程中电容、重量、温度等参数,实验证明了电容与湿度的显著相关性,提出对加工过程无损在线检测。Kent M.等^[45]利用奶粉干燥过程中的介电特性,在微波频率下监控奶粉加工过程中的水分变化,从而提高产品的质量。

1.8 鱼品质及鱼冷冻粉碎过程的检测

鱼肉贮存过程中容易发生一系列的化学反应而导致其品质劣变。A. Mateo^[46]研制出自动可见的金枪鱼品质检测系统,可以在市场销售时快速准确评价鱼的品质。食品冷冻粉碎是冷冻和粉碎2种加工技术的结合,加工材料在冷却到冻结到脆化点以下,利用其低温脆性使物料粉碎,不仅节约能源还有利于保持粉碎产品的色、香、味及活性物质的性质不变。特别适用于热敏性食

品的加工。所以脆化温度的确定是精确高效地进行粉碎的重要因素。2004年,米村道子^[47]研究了冻结鱼粉碎过程中的电特性和脆化温度的关系,从而为利用介电特性确定最适宜冷冻粉碎温度提供了理论依据。

2 展 望

随着无损检测技术与计算机技术、数字图像处理技术、电子测量技术的结合,使实时成像技术、层析射线照相技术、数字辐射成像技术,简单、快速、准确的综合检测方法和多种检测手段的研究已经成为无损检测技术的主要发展方向^[47]。经过国家“十五”攻关,在肉类、粮食及苹果等农畜产品品质无损检测技术方面取得了重要进展,研究成果达到国际先进水平。

笔者认为今后还应从以下方面进一步开展深入系统的研究:

1) 结合不同农产品的生理特性、生化特性,采用电学理论、热学理论及力学理论进行综合研究,力争能寻找到农产品物料电特性的共性,建立农产品电特性信息数据库,为农产品电加工及品质控制提供依据;

2) 研究感病品种和抗病品种之间电特性的差异,开展利用物料的电特性进行农产品安全预警技术的研究,为快速发展的农产品物流管理提供更多更好的检测手段;

3) 采用多技术信息融合理论和最优融合层面选择原则,研究计算机视觉、低频率电磁波等不同类型传感器的信息相互性,建立多个高精度识别模型,开发出农产品品质无损检测系列产品;

4) 开展利用电特性对食品加工过程特别是主食加工过程在线监控技术的研究,为食品加工过程的自动化和精确化提供依据。

[参 考 文 献]

- [1] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 283 - 294.
- [2] 陈 斌, 黄星奕. 食品与农产品品质无损检测新技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 58- 60.
- [3] 应义斌, 韩东海. 农产品无损检测技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 6- 8.
- [4] 杨荣辉. 电容式粮食水分仪的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2003.
- [5] 徐广文. 介电特性在粮食物性测量中的应用分析[J]. 武汉食品工业学院学报, 1996, 4: 5- 10.
- [6] Nelson S O, You T S. Microwave dielectric properties of corn and wheat kernels and soybeans[J]. Trans of the ASAE, 1989, 32(1): 242- 249.
- [7] Nelson S O. Mathematical model for the dielectric

- constant of rice[J]. Transaction of the ASAE, 1992, 35 (5): 1533– 1536.
- [8] 钱新耀. 种子的静电特性及电力分级机研究[D]. 镇江: 江苏工学院, 1987.
- [9] 沈以煦. 水稻小麦油菜籽电特性的测试[J]. 北京农业工程大学学报, 1992, (3): 1– 6.
- [10] 徐保江, 张本华, 张淑珍. 根据物料的电特性快速测定含水率的试验研究[J]. 沈阳农业大学学报, 1998, (1): 65– 68.
- [11] 尤田束. 一个改进的农产品介电特性的测试系统[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 217– 220.
- [12] 程卫东, 柏雪源, 王相友. 干燥过程中谷物水分在线测量系统[J]. 农业机械学报, 2000, 31(2): 53– 56.
- [13] 三代达也, 杉雅昭, 丰岸裕, 等. Nondestructive determination of moisture content in dry sausage using near infrared (NIR) transmittance method [J]. Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 1995, 42(6): 436– 441.
- [14] Bengtsson N E, Risman P O. Dielectric properties of food at 3 GHz as determined by a cavity perturbation technique. II [J]. Measurements on food materials. J. Microw. Power. 1971, 6: 107– 123.
- [15] Favreau V S, Soble, Raghavan G S V. Dielectric properties of maple sap and syrup at 2.45 GHz [J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1997, 32 (2): 96– 100.
- [16] Funedo, Ohlsson T. Dielectric properties of fruits and vegetables as a function of temperature and moisture content [J]. J Micro Power, 1999, 34(1): 42– 54.
- [17] Kato Koro. Electrical density sorting and estimation of soluble solid content of water melon [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 67(3): 161– 170.
- [18] 孙光伟, 牟英峰. 乳浆浓度在线检测传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2001, 8: 8– 10.
- [19] Chen P, McCarthy M J, Kauten R, et al. Development of a high-speed NMR technique for sensing maturity of avocados [J]. Trans of the ASAE, 1996, 39(6): 2205– 2209.
- [20] Ryszard Żywica, Grażyna P. Application of food products electrical model parameters for evaluation of apple purée dilution [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67 (4): 413– 418.
- [21] David R Thompson, Gerald L Zechariah. Dielectric theory and bioelectrical measurements [J]. Trans of the ASAE, 1971, 14(2): 211– 215.
- [22] Mcclendon B Derrell, Brown R H. Dielectric properties of peaches as a maturity [J]. Index ASAE Paper, 1971, 71 – 332. St. Joseph, Mich, 49085.
- [23] 加藤宏郎, 高周波. インピーダンスによる農産物の非破壊鮮度判定 [J]. 农业机械学会志, 1988, 5(5): 55– 61, 5 (6): 99– 107.
- [24] 张立彬, 胥芳, 周国君, 等. 苹果的介电特性与新鲜度的关系研究 [J]. 农业工程学报, 1996, 12(3): 186– 190.
- [25] 胥芳, 张立彬, 周国君. 无损检测桃子电特性的试验研究 [J]. 农业工程学报, 1997, 13(1): 202– 205.
- [26] 李劲, 邓泽官, 姚宏霖, 等. 电磁和放电环境对水果采后生理影响的研究 [J]. 高电压技术, 1997, (1): 10– 12.
- [27] 胥芳, 张立彬, 计时鸣. 基于介电特性的水果品质无损检测方法研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2001, 29(3): 230 – 239.
- [28] 胥芳, 计时鸣, 张立彬, 等. 水果电特性的无损检测在水果分选中的应用 [J]. 农业机械学报, 2002, 33(2): 53– 58.
- [29] 郭文川. 西红柿成熟度与电特性关系的无损检测研究 [J]. 农业现代化研究, 2002, 23(6): 485– 490.
- [30] 郭红利. 猕猴桃的电学特性与无损检测技术的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [31] 秦文, 羽仓义雄, 陈宗道, 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): 155 – 160.
- [32] 宋金亚. 基于介电特性和灰色理论的苹果内部品质无损检测方法研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.
- [33] 川秀幸, 加藤肇一, 锅岛弘明, 等. 清酒发酵过程中导电特性的研究 [J]. Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 1996, 43(9): 983– 991.
- [34] 王贻俊, Olsson L. 生物量浓度实时在线检测方法的研究 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2000, 27(4): 387– 390.
- [35] 乔晓艳, 贾莲凤. 生物发酵过程菌体浓度在线检测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2003, 11(5): 324– 327.
- [36] 王璋. 食品化学 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999.
- [37] Yoshio Hagura. Non-destructive and continuous measurement of food process using dielectric properties [J]. Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 2004, 51 (3): 109– 114.
- [38] 羽仓义雄, 铃木宽一. Melting point measurement of edible fats and oils using electric capacity [J]. Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 2002, 49(4): 272– 276.
- [39] 佐々木芳浩. 电特性を利用したフライ工程のインライン計測に関する研究 [D]. 日本广岛: 广岛大学, 2004.
- [40] 荒木元章. 利用介电特性对含淀粉类食品的糊化、老化过程的解析 [D]. 日本广岛: 广岛大学, 2002.
- [41] 羽仓义雄, 铃木宽一. A non-destructive and continuous measurement of gelatinization of rice cooking process [J]. Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 2002, 49 (6): 416– 421.
- [42] 孙永海, 赵学笃, 景璐. 膨化食品表面质量的自动检测

- [J]. 农业机械学报, 1999, 30(1): 63– 67.
- [43] 秦文, 陈宗道, 羽仓义雄, 等. 食品的介电特性在食品干燥过程中的在线无损检测技术[J]. 食品发酵与工业, 2005, 31(8): 52– 57.
- [44] SadaoTohi, Yoshi Hagura. Measurement of change in moisture content during drying process using the dielectric property of foods[J]. Food Science Technology, 2002, 8(3): 257– 260.
- [45] Kent M, Meyer W, Schilz W, et al. An online microwave instrument to monitor the solids content of milk[J]. Dairy Technology, 1993, 46(3): 96– 99.
- [46] Mateo A, Soto F, Villarejo J A. Quality analysis of tuna meat using an automated color inspection system[J]. Aquacultural Engineering, 2006, 35(1): 1– 13.
- [47] 米村道子. 电特性測定を利用した冻结鱼体の最適加工温度の決定[D]. 日本广岛: 广岛大学, 2004.

Review of research advances in non-destructive quality evaluation technology of food by dielectric property

Ma Rongchao, Qin Wen^{*}, Wu Weixiong, Zhou Xi, Zhang Daode, Xin Songlin

(Institute of Information and Engineering Technology, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: It is become a very important area to measure the quality of agricultural products for the quickly development of agricultural and food process. Non-destructive technology of food has become the focus of researches in food science field. Inspection by using the dielectric property is widely adopted and has unique advantages in quality inspecting and grading. The research advances in non-destructive technology of food by dielectric property is reviewed from the measurement of moisture, soluble solid content, freshness and online evaluation of drying, oil-frying, fermentative, freezing process of food. Some new ideas of study on non-destructive detection in the future are pointed out.

Key words: food; dielectric property; non-destructive detection