

射频识别(RFID)技术在食品溯源中的应用研究进展

Advances in the application of RFID technology in food traceability systems

赵训铭¹ 刘建华²

ZHAO Xun-ming¹ LIU Jian-hua²

(1. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江工业大学海洋学院, 浙江 杭州 310014)

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 2. Ocean College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

摘要:射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术操控简单、灵活、实用,已被应用于食品溯源系统中,旨在保障食品原料的质量安全。文章介绍了食品安全与溯源概念及 RFID 技术,综述了其在乳品、畜产品、水产品、果蔬等食品溯源系统中的应用研究进展,分析了 RFID 技术的优势及其推广应用难点,为食品的质量安全溯源体系提供理论指导。

关键词:食品安全; RFID; 溯源; 研究进展

Abstract: RFID technology is simple, flexible and practical. It has been applied to food traceability systems to ensure the quality and safety of food materials. In this paper, the concept of food safety and traceability, and RFID technology are introduced. The research progress in food traceability systems such as dairy products, animal products, aquatic products, fruits and vegetables is summarized. And the advantages of RFID technology and its application difficulties are analyzed. This paper will provide the theoretical guidance to a traceability system for food quality and safety.

Keywords: food safety; RFID; traceability; research progress

1 食品安全与溯源体系的技术需求

随着中国社会经济的发展和人们生活水平的日益提高,人们的食物消费观念已由“吃得饱”向“吃得好”转变,对食品的质量安全和营养结构提出了更高要求。当下,中国食品行业尚存质量安全隐患,近年来出现了一系列

影响食品质量安全问题。

从供应链角度看,食品的生产、加工、流通、销售环节都可能产生食品质量安全问题。在生产环节,环境污染和农药兽药的不规范使用都会带来较大的食品安全隐患;在加工环节,添加剂使用不规范、卫生管理不规范、生产工艺落后等会造成食品添加剂超标、微生物污染、加工过程产生大量有害物质等;而在流通环节,运输条件不合格、包装材料不达标、掺假造假现象等均可能导致大量的食品安全问题;在销售环节,贮存条件不合格、产品滞销导致的超保质期销售等也会产生诸如微生物含量超标等质量安全问题。因此,设法有效地控制食品供应链的每一个环节,将食品安全隐患降到最低。

食品安全溯源,指在食品生产、加工、流通、销售等各个环节中,涉及食品质量安全的相关信息能被顺向追溯(“生产源头”至“销售终端”)或被逆向回溯(“销售终端”至“生产源头”),从而使得食品在各个环节的质量安全得到有效控制^[1]。食品安全追溯体系是一种设计能应用于食品生产、加工、流通、销售等各环节中,追踪某一产品及其特性的信息记录与应用系统,该系统记录食品各个环节中的信息流,并且保障信息流的连续性。当发现不安全因素时,可以通过溯源或追踪来识别问题产品的源头以及流向,有利于有效、精确地召回食品^[2]。现代的食品安全溯源体系主要是建立在 RFID、WSN、二维码、物联网、区块链技术上,使得参与食品安全控制各相关方进行互联,实现食品安全溯源。

近年来,RFID 技术作为一项简单易控、实用灵活的溯源应用技术,已被广泛应用于交通管理、物流运输、医药及食品生产等行业^[3-4],其在食品行业追溯系统中的应用已成为保障食品安全、追查事故责任的重要环

基金项目:浙江省科技厅重点研发项目(编号:2017C02006)

作者简介:赵训铭,男,浙江工业大学在读本科生。

通信作者:刘建华(1982—),男,浙江工业大学副教授,博士。

E-mail: jhliu@zjut.edu.cn.

收稿日期:2018-11-23

节^[5-7],已广泛应用于乳制品、畜产品、水产品、果蔬品、茶叶和酒类等食品中。

2 RFID 技术及其原理

无线通信识别是识别技术的一个里程碑式的发展,其特别之处在于识别的非接触性和识别的自动性、智能性。射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术是其发展最快、最完善、应用最广的一种类型,其信息存储量大,可同时自动识别多个目标,识别效率远高于人工识别且识别结果客观、正确率高,环境条件及其变化对识别结果几乎无影响,可进行长时间的连续性的识别作业。RFID 系统组成并不复杂,系统主要包括标明身份的电子标签(依据电源的有无又分为有源电子标签和无源电子标签),查验身份的标签读写器,以及用于通讯的天线等几部分^[8]。

与人工识别相比,条形码、磁卡、IC 卡等识别技术大大方便了消费者,识别效率和正确率大幅度提高^[9-11]。而上述这些识别技术与 RFID 相比,后者显示出诸多优越性:①机动性强,适合各种环境与条件;②组织系统性强,在复杂目标的识别与管理方面轻松自如;③技术性强,装备其标签的物体既能达到一定的智能化程度,又能与系统进行实时的信息交流。因此,RFID 识别技术应用于食品的溯源追踪便在情理之中了。

3 RFID 技术在食品溯源中的应用研究

3.1 RFID 技术在乳品中的应用

乳品是中国最重要的食品原料之一,乳品行业在最近十几年发展十分迅猛,据统计,目前中国乳业市场规模约 2 500 亿元,该数据还将不断增加^[12]。但乳品长期存在的质量安全问题一直是限制其发展的瓶颈,加强监管保障国产乳品质量与安全对中国乳业发展至关重要。保障原料乳的质量与安全是保障乳制品质量与安全的基础,是首要关键点。而要保证原料乳质量,首先必须建立可溯源的奶牛养殖系统,系统涵盖奶牛养殖的各个问题关键点;其次是运用现代化养殖与管理技术,尽量高效率、低成本;另外,基于奶牛的健康是合格奶源的基础,防止和控制奶牛的各种疫情。

在国外,利用 RFID 技术和 WSN 技术的结合在奶牛健康监测与食品质量监督等方面已进行了深入研究。Andonovic 等^[13]利用 WSN 技术,将多节点的无线传感器佩戴于每一头牛的颈部区域,既能监测牛群集体活动特征又能监测牛个体活动特征,通过这种实时监测奶牛活动特征的变化,可以及时有效发现疫情或重大疫情。Warren 等^[14]的方法简单直观,主要针对牛个体,直接在牛体上安装心电图仪器,通过监测牛的心跳频率来判断牛的健康状况,汇总个体资料便可得出牛群的健康状况。澳大利亚的溯源追踪系统比较发达,包括畜牧标示体系

以及追溯体系,RFID 技术不仅已经广泛应用于养殖环节的动物识别,而且也广泛应用于牛羊等肉制品的溯源^[15]。通过对奶牛个体生命体征和健康状况的实时监控可在源头上规避了原料乳的安全隐患。

在中国,农业的高度机械化生产与监控跟发达国家相比尚处于发展阶段,但基于 RFID 技术应用在奶源质量安全控制上也取得了一些进展。蔡文青等^[16]运用 RFID 技术得到了原料乳追溯管理模型。模型启动过程如下:在挤奶时奶牛的位置正好处于读写器的感应范围,通过认读牛体上的电子标签,就能即时识别奶牛的身份以及该头奶牛的其它完整信息资料,了解和分析管理系统的数据库之后,牧场管理员便能及时掌握奶牛的产奶量、原料乳的各类指标、奶牛的健康指数等,进而量身定制综合管理方案,保证高品质饲料及时准确供应给高产奶牛,既均衡又高营养的饲料供给泌乳旺盛期的奶牛。通过检测原料乳中体细胞含量,可以判断奶牛是否患有乳房炎等病症,对于患病的奶牛,及时建立治疗方案,详细记录治疗过程,以及使用药物剂量和治疗效果。有了这样的原料奶质量安全控制过程,才能保证原料奶合格并安全地进入后面的消费环节。庞超等^[17]创建了更为复杂和完善的模型,该模型将 RFID 技术与 WSN 技术相合,研究了奶牛养殖信息采集与传送方法,溯源网络架构形成、信息交互与转换等方面内容。该模型对牛舍内部各节点及牛舍间各节点的通信距离都有准确的规定,从而保证了较高的信息数据传送率。运行结果表明,该模型运行稳定,性能可靠,数据信息发送快速准确,方便用户采集。通过 WSN 网络,读写器节点可直接接入到数据中心,即可在线查询多种信息,包括饲养记录、繁殖记录、保健记录等。此外,系统还能对管理人员进行提醒,应用前景广阔。苏中滨等^[18]将重点放在乳制品方面,运用 RFID 技术,通过编码形式研究了乳制品质量与安全的溯源技术,所编制溯源码的信息覆盖面广,涵盖了饲养场地、奶桶、奶缸、奶槽车容器信息和物流信息,乳制品加工企业名称与资质、乳制品检测机构名称与资质、乳制品加工班次日期和批次等各种重要信息,使得奶源信息得到全面可追溯。此外,丁玄等^[19]利用 RFID 技术对乳制品溯源系统进行了初步构建,能够实现消费者使用标识在该产品上的电子标签,通过查询终端,便可以查询到产品的整个生产加工环节。使得生产加工过程透明化、信息公开化。相较于国外针对奶牛个体的 RFID 技术的应用,中国目前的研究更倾向于对牧场工业化养殖过程的监控,通过获取奶牛养殖各个环节反馈的信息进而提高牧场的乳品品质。

3.2 RFID 技术在畜产品中的应用

由于养殖和加工技术的不断提高,多年来中国畜牧业得到快速发展,各类畜产品产量持续高速增长,畜产品质量得到大幅度提升,基本能够满足国民的需求。但是

限制中国畜产品进一步发展的因素依然存在,主要因素是畜产品质量与安全问题。从全球视角看,重大食品安全事件时有发生,畜产品也不例外,众所周知的世界范围内的疯牛病、口蹄疫、禽流感等疫情的爆发和流行,严重阻碍了各国经济尤其是食品行业的发展,限制了人民生活水平的提高。近期发生的非洲“猪瘟”又给各国带来了巨大的经济损失和食肉恐惧。由此可见,利用近年来快速发展的 RFID 技术对畜产品建立跟踪与追溯体系显得特别重要与迫切^[20-21]。

英国从 21 世纪开始,对出生牛犊在 20 日内强制安装标识标签。该标签内容丰富而详实,记载了每一头牛的出生信息,成长发育信息,进口牛的相关进口详细资料,农场里奶牛活动信息、疫情信息与死亡信息,并形成数据库,保证每头牛的情况一目了然^[22]。澳大利亚的追溯体系讲究政府与民众互动,监管部门通过互联网建立公共平台,同时向牧民提供 RFID 电子耳标,该耳标具有唯一识别编码,在价格上也会得到政府补贴。牧民在使用 RFID 耳标饲养动物时,首先需要在网站上登记注册,随后系统会跟踪记录该只动物在整个饲养过程中的全部信息,追溯性资料完整^[23]。美国实施的是分阶段过渡管理策略,最初段使用耳标认证方式,该耳标标注了包括企业信息在内的多项内容;中间段是由个体耳标认证逐步过渡到射频读取;如今完全采用 RFID 技术和电子标签,信息内容涵盖工厂加工和集市等各个环节,各环节都安装了 RFID 数据资料读取器,随时可得到可追溯信息^[24]。通过 RFID 技术与互联网平台的构建,让牧场与消费者之间实现了畜产品生产加工等各个环节的信息对称。

在中国,自 2003 年起,一些较具规模的养殖场也陆续开始采用 RFID 技术并取得了较好的效果。焦玉聪等^[25]建立了肉产品质量与安全追溯系统,其技术核心是利用成熟的二维码技术,并集成电脑通信与信息库技术,从而形成完整的溯源体系。畜牧养殖过程中,在动物身体上安装专用 RFID 标签,以方便各类管理员随时采集并录入牲畜的生长信息、生长发育信息、饲料供给信息、疫情与药品使用信息、畜牧原料肉的检验检疫信息等,并能够将所有信息传至溯源系统的数据中心。牲畜宰杀前需查阅所有 RFID 标签信息,确认牲畜经过了防疫环节且未患病的情况下才能宰杀和进入下一步的流通环节。宰杀后,RFID 溯源信息又要增加新的内容,除了宰杀前二维码包含的信息外,还将宰杀单位、宰杀的日期、宰杀肉质量等其他计量信息一并打印到二维码,并与胴体肉一道进入下一步的检疫环节。同样,宰杀后的肉品经过检验检疫,也需将检疫的信息结果传至追溯系统数据中心。中心会将与检验检疫有关的所有信息,比如检验结果、检验时间、检验单位名称等,全部同样输入到二维码中,并与肉品一道进入物流环节。运输环节运输工具很重要,

要求先读取信息后再进行装卸,例如汽车运输,先读取汽车信息,内容包括汽车车牌号、所属运营单位、汽车检验消毒单位等等,再进行装卸。肉品装卸后,溯源采集器都会及时录入相关信息,内容包括装卸时的环境情况、装卸时间、装卸出发地与目的地,以及车载 RFID 卡数据等,并对信息数据进行处理生成对应的加密信息。最后一道是销售环节,售卖商将所获肉品信息与基本经营户信息合并成溯源二维码,此二维码具有唯一性,它与肉品基本包装单位一起流入到千万消费者手中,便于消费者溯源。自此完成了肉产品的追溯,同时保障了肉产品的品质与安全。

宋薇^[26]设计了专门针对猪肉的安全追溯系统。对猪肉生产流水线进行分段,针对各个加工环节的主要特点,该溯源系统从硬件、网络以及软件方面进行量身定制,对不同种类猪肉制品采取一一对应的定位方式,既能快速查询猪肉制品又能精确到具体是哪一种产品。程静等^[27]构建了 RFID 中间件追溯模型,该模型有 3 层结构即边缘层、数据层和应用层。RFID 中间件具有多种强大功能,它不仅能进行信息的平滑处理,重复过滤,进行数据聚集与分组,而且能为后续环节继续提供综合信息,包括加工、物流、销售等各个环节。赵秋燕等^[28]研究的重点是分析与对比,分析内容包括有机 RFID 标签的特点,对比内容包括条形码、无机 RFID 标签等,从技术特征方面为 RFID 的应用提供了参考。马从国等^[29]研究重点是监控的完整性,构建了猪生长条件与环境的监控系统,运用模糊神经网络控制计算方法,取得理想的效果。申光磊等^[30]引入了“RFID+条形码”技术,对牛个体进行一一标示,对牛肉也进行分班、分批、分次进行标示,在牛肉生产、加工和销售环节中,采集各个关键控制点的信息,并将所采集信息传送到信息中心,从而实现了牛肉品的追溯。

中国南方大部分地区的夏季处于长时间的湿热气候,容易滋生各类疫情,对畜产品的加工生产造成较大的影响。因而,RFID 技术在畜产品中的应用仍需要在中国得到更广泛的普及。通过 RFID 技术的应用能够及时避免不合格的畜产品流通到市场与消费者手中。

3.3 RFID 技术在水产品中的应用

中国的水产品总量名列世界第一并持续了 20 多年不变^[31],其中,动物水产品作为人类最优质食品来源之一是水产品中的主流。多数动物水产品富含优质蛋白质和多种氨基酸,脂肪含量低但相对而言不饱和脂肪含量高,其中具有功能性的 ω -3 脂肪酸含量特别丰富,综合营养成分均衡。因而,水产品的质量和安全关系到中国水产行业的长期稳定发展,建立水产食品的可追溯系统已势在必行,而 RFID 技术无疑是最具潜力的解决方案。

2009 年,陈雷雷等^[32]提出了基于 RFID 系统的水产

品可追溯系统的框架体系,也指出了 RFID 技术在应用过程中会遇到的一些难题。颜波等^[33-34]基于前人的研究设计构建了水产品可追溯平台,其核心技术基于 RFID 和 EPC,平台包含以下子系统:养殖监管、加工监管、配送监管、销售监管、查询管理。该技术从养殖地出水到销售店上架全部使用 RFID 标签,信息涵盖养殖基地、加工中心、物流、销售等各个环节,追溯查询方式就是扫描基本单位包装上的条形码。EPC 标识产品具有唯一性,而 RFID 电子标签内的 EPC 编码可以改写,改写可使标签重复利用,企业的材料成本和管理成本可以大幅度下降。夏俊等^[35]的溯源系统相对比较复杂与完整,综合考虑广大消费者、相关政府管理机构以及有关企业 3 个方面,通过分析水产品存在的主要质量与安全问题,应用物联网的理念构筑了水产品的溯源体系,并且示范了具体实践和应用。以 RFID 和二维码对中华绒螯蟹蟹苗种进行标识,综合运用 GPS 和 GIS 技术,构筑了基于 Web 的该蟹精细养殖物联网智慧系统,形成了质量的全过程动态溯源体系。RFID 技术在水产品加工中的应用虽起步较晚,但目前已达到了较高的技术成熟度,可普及开来。而同样也需要行业内更多的关注与参与,以解决各类特殊环境下的技术难点,使得 RFID 技术能够在各不同种类的水产品加工中得以广泛应用。

3.4 RFID 技术在果蔬中的应用

果蔬是人类最重要的食品原料之一。果蔬从农田采摘到餐桌需经过较长时间的流通运输,且因多种果蔬具有极易腐烂、极易变质等特点,在流通过程中存在高损耗问题,相关的流通成本约占最终价格的 2/3^[36]。因此,必须高度重视果蔬的高损耗现实,重视因腐烂变质导致的食用安全问题。为保障果蔬的质量与安全,目前已有很多研究者将 RFID 技术应用于果蔬的追溯。

李彪等^[37]构建了新疆哈密瓜的追溯系统。该系统同样基于 RFID 和二维码技术,融合了信息库技术、互联网技术等,详细采集了哈密瓜的田间种植、产地采购与包装、物流与销售各环节的信息数据。这些数据有助于政府部门对哈密瓜质量实行有效监管,也便于消费者了解到想要的信息,达到放心消费的目的。沈敏燕^[38]综合运用 RFID 等网络技术,构建了水果蔬菜类的冷链物流追溯系统。以子系统的形式进行分配与管理,系统包含果蔬的生产、批发、物流、销售、监督与检测及追溯查询等子系统。各子系统具有对应的信息数据库,子系统的功能也是独自发挥的。利用编码标识果蔬从产地到消费的各个环节,能使溯源信息完整无缺。蒲皎月等^[39]的 RFID 技术设计主要针对中小型企业者。系统采取统一编码、集中管理信息库的方式,在蔬菜的种植与预加工、蔬菜的物流与仓储、蔬菜的销售等环节,进行 RFID 技术的规范化监管,无论企业多么分散都能实现统一监管,并且细致

到具体环节。刘世明等^[40]的监管追溯视角较独特,从检验部门实际管理角度出发,构建了基于 RFID 技术的蔬菜安全追溯系统。系统包括业务框架模块、技术框架模块和安全保障体系模块,并进一步涵盖蔬菜种植基地、蔬菜加工厂、蔬菜进出口岸和销售点的功能需求,并制定了追溯系统的接口标准。运行结果表明了该溯源系统既可靠又有效。目前针对果蔬种植加工中的食品安全问题更多地集中在农药残留、兽药残留的检测,该方向虽能实现监控,但并未从源头上消除隐患,而 RFID 技术的应用则实现了这一要求,再辅以管理部门的相关法规的制定将进一步完善果蔬行业食品安全的控制。

3.5 RFID 技术在其他食品中的应用

RFID 技术在其他食品中也得到了广泛的应用。江进^[41]针对茶叶构建了茶叶品质量安全追溯体系。该技术同样基于 RFID,先在茶园设放 RFID 标签,采集记录茶叶种植生长情况,施肥信息,虫害程度及喷施农药情况,采摘时间及当时的气候情况等信息,然后将以上信息上传到溯源系统信息处理中心,这是第一道环节。采摘后的鲜叶加工是第二道环节,此过程收集的信息包括茶叶的来源,鲜叶加工的企业名称,加工的主要技术参数等。第三道环节是茶叶的包装与成品,除采集有关包装的普通信息外,建立茶叶成品的 RFID 标签与茶园 RFID 标签之间的紧密关联,以方便消费者追溯。茶叶制品的仓储、物流和销售的所有相应信息数据构成了第四道环节。由于 RFID 电子编码的唯一性特征以及能以相对应的 ID 编号存储,只要把 ID 编号与茶叶流通环节的数据信息捆绑,就可以完成基于 RFID 电子标签的溯源过程。

何飞等^[42]研究了较为有效的基于 RFID 技术的酒类溯源防伪系统。系统嵌入高频 15693RFID 标签芯片,此芯片具备独有特征:标识符唯一,采用对称密码计算法,单向身份鉴别,存储器部分应符合商务部有关规定和标准,芯片有防止被复制的功能。将该系统应用到酒类企业中,从酒类酿造加工、酒产品流通、酒产品销售、甚至酒终端消费等各个环节,都有明确可靠的信息数据可查询追溯。由此可见,该溯源系统可全面提升企业的运营效率和管理水平,杜绝假酒,净化酒类市场,保障消费者健康。刘鹤^[43]以射频技术和数据库为基础,设计了基于 RFID 的冷冻冷藏食品的物流仓储管理系统,可有效提高冷冻冷藏食品的仓储管理效率。

随着相关软件性能的进一步优化和硬件功能与设计的日趋完善,RFID 技术将渗透到更多食品品类的溯源中,也将为消费者提供更全面的食品安全信息。

4 结论

食品安全问题是现代人们日益关注的焦点,通过建立溯源体系可以有效保障食品安全。RFID 作为一种易

于操控、简单实用、灵活的技术,是食品安全溯源体系中最重要技术之一。RFID 节约了成本,减少了人工操作的误差,提高了工作效率,目前已被许多国家应用于乳品、畜产品、水产品、果蔬等食品生产和流通各环节的溯源系统中,很大程度上保障了食品及其原料的质量与安全。但是,RFID 的广泛推广与应用还存在以下问题:① RFID 标签价格偏高,还有进一步降价的技术空间;② RFID 技术缺乏相关标准,如信息内容、信息流程、软件、阅读器、标签等尚需建立统一标准;③ 有些食品信息采集困难,例如水产品;④ 食品原料种类繁多,溯源信息千差万别,分门别类信息工作量巨大;⑤ 缺乏相应技术人才,尚待培养;⑥ 缺乏大量研发经费投入以提升技术;⑦ RFID 的技术集成及应用是最大难点。

参考文献

- [1] 张榆辉,余永成,蔡水狮. RFID 技术在食品安全溯源方面的应用[J]. 现代食品, 2015(19): 54-56.
- [2] SHANAHAN C, KERNAN B, AYALEW G, et al. A framework for beef traceability from farm to slaughter using global standards: an Irish perspective [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 66(1): 62-69.
- [3] ILIE-ZUDOR E, KEMENY Z, BLOMMESTEIN F V, et al. A survey of applications and requirements of unique identification systems and RFID techniques[J]. Computers in Industry, 2011, 62(3): 227-252.
- [4] DOMDOUZIS K, KUMAR B, ANUMBA C. Radio-Frequency Identification (RFID) applications: A brief introduction[J]. Advanced Engineering Informatics, 2007, 21(4): 350-355.
- [5] MCMEEKIN T A, BARANYI J, BOWMAN J, et al. Information systems in food safety management[J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 112(3): 181-194.
- [6] 余平祥,巫远媚,胡月明,等. RFID 食品安全可追溯系统读取率优化策略研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 132-136.
- [7] 张姝楠,郭波莉,潘家荣. RFID 技术在食品全程跟踪与追溯中的应用[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(9): 148-151.
- [8] 王洪亮,高晏波. 谈谈 RFID 技术的应用[J]. 衡器, 2006, 35(1): 18-21.
- [9] CURTIN J, KAUFFMAN R J, RIGGINS F J. Making the most out of RFID technology: a research agenda for the study of the adoption, usage and impact of RFID[J]. Information Technology & Management, 2007, 8(2): 87-110.
- [10] 张欣露,王成,吴勇,等. 集成传感器电子标签在农产品溯源体系中的应用[J]. 农业机械学报, 2009(S1): 129-133.
- [11] 罗清尧,熊北海,杨亮,等. 基于超高频 RFID 的生猪屠宰数据采集方案[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 370-375.
- [12] 申海朋,付廷振. RFID 技术在乳制品追溯解决方案中的应用[J]. 食品安全导刊, 2015, 10(4): 72-73.
- [13] ANDONOVIC I, MICHIE C, GILROY M, et al. Wireless Sensor Networks for Cattle Health Monitoring[C]// International Conference on ICT Innovations. 2009: 21-31.
- [14] WARREN S, MARTINEZ A, SOBERING T, et al. Electrocardiographic pill for cattle heart rate determination[C]// International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society. 2008: 4 852.
- [15] PETTITT R G. Traceability in the food animal industry and supermarket chains[J]. Revue Scientifique Et Technique, 2001, 20(2): 584-597.
- [16] 蔡文青,梁斌. 基于 RFID 技术的原料奶安全溯源管理的研究及实现[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(7): 1 473-1 475.
- [17] 庞超,何东健,李长悦,等. 基于 RFID 与 WSN 的奶牛养殖溯源信息采集与传输方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 147-152.
- [18] 苏中滨,郭媛媛. 基于物联网的乳制品溯源系统编码技术研究[J]. 东北农业大学学报, 2014(8): 110-117.
- [19] 丁玄. 基于 RFID 技术构建乳制品溯源系统的初步研究[J]. 食品工程, 2016(4): 17-20.
- [20] LIDDELL S, BAILEY D V. Market opportunities and threats to the US pork industry posed by traceability systems[J]. International Food & Agribusiness Management Review, 2001, 4(3): 287-302.
- [21] ROSENVOLD K, ANDERSEN H J. Factors of significance for pork quality-a review[J]. Meat Science, 2003, 64(3): 219-237.
- [22] 陈一天,余爱民. 无线射频识别技术及其在畜牧业动物管理中的应用[J]. 南方农村, 2005(4): 52-54.
- [23] 柳建龙. RFID 肉食品安全信息追溯[J]. 安全 & 自动化, 2006(10): 96-99.
- [24] National Food Animal Identification Task Force. National Identification Work Plan[R]. Colorado: National Institute for Animal Agriculture (NIAA), 2002.
- [25] 焦玉聪,张立新,等. 基于 RFID 及二维码的肉制品质量安全溯源系统[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(5): 215-218.
- [26] 宋薇. 基于 RFID 的猪肉安全溯源系统的设计与实现[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- [27] 程静,贾银江,关静. RFID 中间件在肉牛养殖溯源系统中的应用[J]. 农机化研究, 2015(5): 224-228.
- [28] 赵秋艳,汪洋,乔明武,等. 有机 RFID 标签在动物食品溯源中的应用前景[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 154-158.
- [29] 马从国,赵德安,刘叶飞,等. 猪肉工厂化生产的全程监控与可溯源系统研制[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 121-125.
- [30] 申光磊,咎林森,段军彪,等. 牛肉质量安全可追溯系统网络化管理的实现[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 170-173.

(下转第 225 页)

- M. Production of uniform droplets using membrane, micro-channel and microfluidic emulsification devices [J]. *Microfluidics & Nanofluidics*, 2012, 13(1): 151-178.
- [70] SOLANS C, SOLÉ I. Nano-emulsions: Formation by low-energy methods[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2012, 17(5): 246-254.
- [71] YANG Ying, MARSHALLBRETON C, LESER M E, et al. Fabrication of ultrafine edible emulsions: Comparison of high-energy and low-energy homogenization methods[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 29(2): 398-406.
- [72] MISHRA P R, AI S L, MÜLLER R H, et al. Production and characterization of Hesperetin nanosuspensions for dermal delivery[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2009, 371(1/2): 182-189.
- [73] GUPTA A, ERAL H B, HATTON T A, et al. Nanoemulsions: formation, properties and applications[J]. *Soft Matter*, 2016, 12(11): 2 826-2 841.
- [74] BADOLATO G G, AGUILAR F, SCHUCHMANN H P, et al. Evaluation of long term stability of model emulsions by multisample analyticalcentrifugation [C]// AUERNHAMMER G K, BUTT HJ, VOLLMER D. *Surface and Interfacial Forces-From Fundamentals to Applications*. Berlin: [s.n.], 2008: 66-73.
- [75] YAO Ming-fei, XIAO Hang, MCCLEMENTS D J. Delivery of Lipophilic bioactives: assembly, disassembly, and reassembly of lipid nanoparticles[J]. *Annual Review of Food Science & Technology*, 2014, 5(1): 53-81.
- [76] ZHANG Yi-xin, HE Sheng-hua, LI Yue-ming, et al. The physical stability and digestibility of β -carotene in oil-in-water sodium caseinate nanoemulsion[J]. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 2016, 11(2): 864-871.
- [77] SALVIA-TRUJILLO L, MCCLEMENTS D J. Enhancement of lycopene bioaccessibility from tomato juice using excipient emulsions: Influence of lipid droplet size[J]. *Food Chemistry*, 2016, 210: 295-304.
- [78] DONSI F, ANNUNZIATA M, SESSA M, et al. Nanoencapsulation of essential oils to enhance their antimicrobial activity in foods[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(9): 1 908-1 914.
- [79] MAJEED H, FEI Liu, HATEGEKIMANA J, et al. Bactericidal action mechanism of negatively charged food grade clove oil nanoemulsions[J]. *Food Chemistry*, 2015, 197(Pt A): 75-83.
- [80] GHOSH V, MUKHERJEE A, CHANDRASEKARAN N. Eugenol-loaded antimicrobial nanoemulsion preserves fruit juice against, microbial spoilage[J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2014, 114(1): 392-397.
- [81] KARTHIK P, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Enhancing omega-3 fatty acids nanoemulsion stability and in-vitro digestibility through emulsifiers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 187: 92-105.
- [82] GALUS S, KADZINSKA J. Food applications of emulsion-based edible films and coatings[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 45(2): 273-283.
- [83] SALVIA-TRUJILLO L, ROJAS-GRAU M A, SOLIVA-FORTUNY R, et al. Use of antimicrobial nanoemulsions as edible coatings: Impact on safety and quality attributes of fresh-cut Fuji apples[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2015, 105: 8-16.
- [84] RADI M, AKHAVAN-DARABI S, AKHAVAN H R, et al. The use of orange peel essential oil microemulsion and nanoemulsion in pectin-based coating to extend the shelf life of fresh-cut orange[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2017, 42(2): e13441.
- [85] ZAMBRANO-ZARAGOZA M L, GUTIÉRREZ-CORTEZ E, REAL A D, et al. Fresh-cut Red Delicious apples coating using tocopherol/mucilage nanoemulsion: Effect of coating on polyphenol oxidase and pectin methylesterase activities[J]. *Food Research International*, 2014, 62(8): 974-983.

(上接第 216 页)

- [31] 李晓川, 翟毓秀, 王联珠. 建立健全我国水产品可追溯体系的若干问题[J]. *农产品质量与安全*, 2006(4): 14-17.
- [32] 陈雷雷, 金淑芳, 李俊. 基于 RFID 的水产食品可追溯体系研究[J]. *农业科学研究*, 2009, 30(1): 51-54, 70.
- [33] 颜波, 石平, 黄广文. 基于 RFID 和 EPC 物联网的水产品供应链可追溯平台开发[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 172-183.
- [34] 颜波, 石平. 基于物联网的水产养殖智能化监控系统[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 259-265.
- [35] 夏俊, 凌培亮, 虞丽娟, 等. 水产品全产业链物联网追溯体系研究与实践[J]. *上海海洋大学学报*, 2015, 24(2): 303-313.
- [36] 李琳, 范体军. 基于 RFID 技术应用的鲜活农产品供应链决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(4): 836-844.
- [37] 李彪, 蒋平安, 宁松瑞, 等. 基于 RFID 和二维码技术的新疆哈密瓜溯源系统[J]. *农机化研究*, 2014(8): 196-201.
- [38] 沈敏燕. 果蔬类农产品冷链物流信息溯源研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.
- [39] 蒲皎月, 张海辉. 基于 RFID 技术的中小型企业蔬菜溯源系统设计[J]. *农机化研究*, 2015(4): 207-210.
- [40] 刘世明, 陈建宏, 张宗平, 等. 基于 RFID 的供港蔬菜安全监管溯源系统[J]. *计算机系统应用*, 2014, 23(2): 42-47.
- [41] 江进. 基于 RFID 的茶叶产品质量安全溯源体系研究[J]. *现代计算机*, 2017(13): 59-62.
- [42] 何飞, 马纪丰, 梁浩, 等. 基于 RFID 技术的酒类溯源防伪系统研究与应用[J]. *现代电子技术*, 2015, 38(8): 99-102.
- [43] 刘鹤. 基于无线射频识别技术的冷冻冷藏食品物流仓储管理系统[J]. *食品与机械*, 2016, 32(1): 121-124.