

预制食品供应链品质监控与区块链溯源技术研究进展

曾新安^{1,2}, 曹诗林^{1*}, 马骥², 成军虎², 汪浪红¹

(¹广东省食品智能制造重点实验室 佛山科学技术学院 广东佛山 528000

²华南理工大学食品科学与工程学院 广州 510641)

摘要 随着生活节奏的提速,在新消费模式与疫情常态化的影响下,具有种类丰富、方便快捷等特点的预制食品逐渐在市场上普及。近年来,在国内兴起的预制食品,不仅可实现餐饮业标准化生产、降本增效,也提高了消费者烹饪的便捷程度。预制食品的品质、新鲜程度与食品安全风险受到研究人员及公众的广泛关注。本文探讨预制食品品质监控的现场检测装备、品质感知智能标签,以及基于区块链、物联网的溯源技术研究现状与存在问题,并对未来发展方向进行展望。

关键词 预制食品; 品质监控; 溯源; 区块链

文章编号 1009-7848(2022)10-0048-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.10.006

近几年来,我国预制食品产业呈现迅猛发展势头,各地纷纷布局预制食品产业,一个万亿级的新蓝海正在开启。预制食品产业的发展,一是积极践行习近平总书记所倡导“大食物观”,让中国饭碗端得更好、更健康,有助于国民食物结构的调整及各种食物资源的协同开发,进一步提升国民的健康水平;二是推动乡村振兴与共同富裕的加速器,是由“菜篮子”转变为“菜盘子”的重要途径,一头连接田间地头,一头连接市场餐桌,从种植到加工再到运输和销售,是延伸农产品产业链、提升价值链、打造供应链的有效手段,有效带动一、二、三产业融合发展;三是后疫情时代盘活食品工业经济发展的主要抓手,是迎合新时代年轻时尚元素的重要体现,预制食品已成为年轻人的“新宠”,通过秘制配方、独特风味、字号品牌等抓住消费群体,满足预制食品个性化产品市场需求。

预制食品是以农产品、禽类畜类产品、水产品等为主要原料,经过洗涤、切割、配制加工等过程

后,可以直接烹饪的预制食品(也称预制食品、快手菜等)^[1]。预制食品烹饪方便、选择丰富,能满足全国不同地域、不同人群的口味,逐渐被餐饮业和家庭所接受和使用,同时也使得预制食品的品质、新鲜程度以及相关的食品安全问题引起越来越多的关注^[2]。

目前预制食品行业存在规模化企业少,行业集中度低,产业链条长,自动化程度有待提高,与国人消费理念有差异等问题。此外,由于预制食品发展迅速,许多小餐饮企业、小作坊的加入导致制作过程不规范、添加剂滥用、原料不新鲜、食品添加剂滥用等问题,对监管和溯源工作带来挑战。在预制食品的冷链运输方面,存在全过程冷链运输和储存难保障,冷链物流信息易断链,预制食品品质难以实时检测与监控等问题。鉴于此,建立预制食品的品质监控体系以及食品安全溯源系统,从原材料、生产加工、仓储物流、市场流通等过程进行全链条的有效追溯,实现从源头到终端的把控与检查,是一个十分迫切且值得研究的方向。

本文简述预制食品的分类,探讨与预制食品有关的食物无损现场检测技术与装备(机器视觉、近红外光谱、高光谱、拉曼光谱、太赫兹光谱)、预制食品品质智能感知标签(时间-温度标签、pH/气体感知标签)以及基于区块链的食品溯源系统的研究现状和存在的科学与技术难题,并展望其未来研究趋势。

收稿日期: 2022-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(32172348,31972205);广州市科技计划项目(202102080346);阳江市科技计划项目(SDZX20200010);广东省重点领域研发项目(2019B020212004);广东省自然科学基金项目(2022B1212010015,2019A1515110621)

作者简介: 曾新安(1972—),男,博士,教授

通信作者: 曹诗林 E-mail: shilin.cao@fosu.edu.cn

1 预制食品的分类

根据不同的特征, 预制食品有不同的分类方法: 1) 按加工程度可分为毛菜、净菜(一级净菜、二级净菜、三级净菜)、半成品菜、成品菜; 2) 根据生熟程度可分为生制预制食品、熟制预制食品; 3) 根据保存方式可分为常温、冷藏、速冻; 按包装形式可以分为散销、小包装、大包装 3 类; 4) 根据食用方式, 预制食品可分为即配食品、即烹食品、即热食品与即食食品四大类。其中, 即配食品指经过清洗、分切等初步加工而形成的生鲜净菜、小肉块等食品; 即烹食品指需要进行一些烹饪步骤才可食用的半成品材料, 按加工程度可以进一步分为熟料加热调味食品(指经过腌制、调味、滚揉、浅油炸等加工过程, 按份分装后冷藏或常温保存的半成品, 后续需入锅并加入调味品进行炒制)和生料加热调味食品(经过清洗、分切等初步物理加工的肉制品、水产、净菜等, 需要自行搭配配菜和调料, 经过炒制后食用); 即热食品指只需经过加热即可食用的食品, 如速冻快手菜, 包含快餐料理包、自嗨锅、小龙虾、鱼香肉丝、罗宋汤等; 即食食品指开封后可以直接食用的调理制品, 如即食泡椒凤爪、鸡腿和罐头等。

2 预制食品品质监控与溯源领域研究进展

肉类与果蔬的劣变标志物有所不同。果蔬类食品内源变化及微生物外源作用导致品质劣变的相关微生物、代谢及蛋白标志包括类胡萝卜素类、呋喃类、黄酮类、多酚类、核苷酸、萜类、有机酸类、乙烯、乙醇、乙酸乙酯、二氧化碳、醛酮类、呼吸强度等; 大宗肉品、水产的劣变标志主要包括感官特性、色泽、质构、水分、蛋白质、脂肪、核苷酸及三甲胺生成等, 以及各特定腐败菌。现简述与预制食品相关的现场检测装备技术、食品品质感知智能标签、食品溯源系统等方面的研究进展。现场检测装备可用于预制食品生产过程中品质现场检测, 智能感知标签可用于供应链储运过程中的品质实时感知与监控, 食品溯源系统可用于预制食品生产、贮运销过程的安全信息追溯与监管。

2.1 食品品质的现场检测无损装备及技术

食品品质的现场无损检测技术主要包括机器视觉和光谱学技术。机器视觉是人工智能的一个

分支, 通过图像获取装置把带测目标转换成图像信号并传送至专门的图像处理系统中, 将被拍摄目标的像素分布、亮度、颜色等信息转换成数字信号并通过运算提取目标的特征, 进而根据判别结果来控制现场生产设备的后续工作。

基于光谱学技术的食品快速无损检测方法可有效弥补传统检测方法检测周期长, 效率低, 对产品有破坏性等问题。利用光谱学方法实现食品无损检测, 是当前的研究热点。通过光谱检测设备获取食品样本的光谱学曲线, 结合数据挖掘、机器学习等方法从光谱曲线中提取出特征信息(波长、强度、峰位置等信息), 并将其与食品的新鲜度、劣变标志物的含量等信息进行关联, 研究目标样品内部成分信息和结构信息。现有的用于食品无损检测的光谱学设备包括: 近红外光谱、高光谱、拉曼光谱、太赫兹光谱设备。

2.1.1 机器视觉技术在食品检测中的应用 机器视觉技术在食品现场检测中应用广泛, 可用于烘焙产品^[9]、肉制品^[9]、鱼类^[9]、水果和蔬菜^[9]和预制食品。该技术利用基于计算机与人工智能的自动化评估预测系统替代传统的手动检查方法, 提高效率以及判断正确率。

2.1.2 近红外光谱 近红外是介于可见光和中红外之间的电磁辐射波, 波长范围 780~2 526 nm, 可再细分为近红外短波(780~1 100 nm)和近红外长波区域(1 100~2 526 nm)^[7]。利用近红外光谱对食品样品进行检测, 是可通过建立食品样本结构和特性与近红外光谱检测数据特征值之间的关系进行定量和定性分析, 实现样品的快速无损检测。近红外光谱分析技术的优点包括样品无需预处理、不损坏样品、多通道检测, 可对固体、液体、胶体等不同形态的样品进行检测。近红外光谱检测设备繁多, 主要可分为 3 类: 实验室设备、分选设备、便携式设备^[8]。近红外光谱现已用于分析果蔬^[9]、肉类^[10]、水产^[11]、奶制品等食品中的糖、脂肪酸、蛋白、氨基酸等含量。

2.1.3 高光谱 高光谱成像技术结合图像技术和光谱技术, 可以同时获得物体的二维图像信息和光谱维信息。不同物质因化学组成不同而具有不同的光谱信息(C-H、N-H 和 O-H 基团的泛音和组合), 基于此, 可利用高光谱成像技术获取食物

表面或内部的信息,实现无损检测^[12]。获得高光谱数据有3种基本成像方法,即:点扫描成像、线扫描成像、面扫描成像和一次成像。常用的是线扫描成像和一次性扫描。根据光源、成像光谱仪和相机等不同,高光谱系统可获得300~2 500 nm波长范围的光谱数据,并提取感兴趣区域的平均光谱和图像特征^[13]。

监测和保持肉类的新鲜度对确保供应安全食用的肉类至关重要。Baek^[14]提出一种短波红外(SWIR)高光谱成像系统,结合偏最小二乘回归(PLSR)模型和特征选择方法,预测新鲜猪肉中的总挥发性碱性氮(TVB-N)含量。

目前能表征水果或蔬菜新鲜度的指标相对缺乏,即使想要提高产品质量也无从下手,最终导致食物的损失和浪费。Guo等^[15]对西兰花中的硫代葡萄糖苷含量以及硫代葡萄糖生物合成基因对采后胁迫的转录表达进行评估,发现西兰花中硫苷生物合成途径与其采后贮藏期间的衰老进程相一致。他们应用基于机器学习的高光谱图像(HSI)分析、分解和亚像素目标检测方法来评估芥子油苷水平,检测西兰花的采后衰老,为评估花椰菜新鲜度提供一种可行方法。

由于大部分预制食品成分复杂,不同批次产品难以保持稳定且同一产品不同部位成分也有所不同,因此其包装上的营养标签难以准确代表食品的实际成分。利用高光谱成像技术不仅可以预测食品主要成分的总体组成,而且可以对主要成分的分布可视化,解决上述问题。Gou等^[16]研究腌制食品,确定预处理高光谱图像的最佳方案,并选择具有代表性的高光谱数据,在极度异质的样本中建立准确的预测模型,研究采集异质切片肉和均质未切片干腌肉的高光谱图像(400~1 000 nm),采用偏最小二乘(PLS)回归模型预测脂肪、水、盐和蛋白质含量,分别在不同数据集中测试。从干腌火腿切片的整个表面建立的PLS预测模型,是预测脂肪、水分、盐和蛋白质含量最准确的模型,说明高光谱成像技术在可视化检测包装火腿中不同成分的分布具有应用潜力^[16]。

2.1.4 拉曼光谱 拉曼光谱是采用非弹性散射光分析样品材料的一种光学测量技术。来自光粒子的能量首先转移一部分到材料中的分子,然后将

剩余的能量作为非弹性光散射发射^[17]。拉曼光谱的产生主要与散射光的强度及拉曼位移映射有关。在分子振动过程中因极化率发生变化而引起的键延伸和弯曲的振动模式信息都可以通过拉曼光谱获得。拉曼光谱作为一种无损的定性、定量分析方法,目前被应用于表征化学物质的分子结构,识别分子中存在的官能团,实现化学分子的指纹识别等。

拉曼光谱不仅可以提供物质分子的半宽、半高、去偏比、振动频率、峰宽、峰位变化、谱峰强度等信息,而且对样品的结构和分子键非常敏感。每个样品或分子都有自己的“指纹”。拉曼光谱仪可以获得拉曼光谱,主要包括傅里叶变换拉曼光谱、色散拉曼光谱(DRS)、空间偏移拉曼光谱(SORS)、共振拉曼光谱,显微共聚焦拉曼光谱。

拉曼光谱法作为一种快速、灵敏的检测方法,可以推广到酒^[18]、肉类^[19]、乳制品、饮料成分和品质的检测,在食品安全检测中具有广阔的应用前景。Ellis等^[18]采用近红外(1 064 nm)激发手持拉曼光谱技术对多种酒精饮料进行过罐鉴别。Pedersen等^[19]利用拉曼光谱PLSR建模方法预测肉的腐败过程,通过拉曼谱线表征蛋白质结构及持水力的变化。

2.1.5 太赫兹光谱 太赫兹(THz)光波是指介于毫米波和光波之间的非常小的一个间隙,这一波段区间也被称为THz间隙。具有特殊性质的太赫兹光波波长区间为0.03~3 mm(0.1 THz到10 THz),太赫兹光波具有电子学与光子学的综合特性。相比于其它类型的光谱,太赫兹光谱具有瞬态性、相干性、安全性、光谱分辨特性及选择透过性等独特性。物质的太赫兹光谱中包含许多物理、化学信息及多种分子振动模式,如低频振动、分子转动、晶体声子振动及氢键拉伸扭曲等。根据太赫兹光区域的光子能量特性,分子的振动活性可以用太赫兹光谱研究^[20]。

太赫兹技术被广泛应用于食品质量和安全检测中,如含水量检测、肉类检测及食品掺假检测等。太赫兹光谱的一个重要应用就是透视成像,在包装食品的无损检测领域具有巨大前景。如Liu等^[21]采用一种太赫兹光谱结合吸收系数光谱积分面积的方法,对槐树蜂蜜中的糖浆含量进行定量

检测。刘欢等^[22]利用太赫兹时域光谱技术对烘焙食品中的水分含量进行检测。齐亮等^[23]建立了一种基于 THz 光谱分析技术的猪肉新鲜 *K* 值(品鲜度)无损检测新方法。

2.2 食品品质感知智能标签

食品品质感知智能标签可在无需直接接触食品的情况下,对包装中食品的新鲜程度进行实时感知,它有别于传统的色谱法或电子传感器,具有无源(不需使用电池)、成本低、快速可靠、识别方法简单(通过肉眼观察颜色变化或通过手机 APP 可识别)等优点。将智能标签用于预制食品,特别是鲜切类预制食品的新鲜度感知,具有很好的应用前景。常见的食品智能感知标签包括温度、气体/pH 等不同种类。

2.2.1 时间-温度指示标签 时间-温度指示标签(TTI)可以感知和记录食品所处的环境温度变化,通过自身产生不可逆的改变来体现环境维度的累积变化,因此可用于预制食品冷链运输过程中防止冷链断链监控^[24]。时间-温度标签包括物理型^[25]、化学型^[26]、酶型^[27]。

2.2.2 气体或 pH 指示标签 食品新鲜度感知中常见的可被智能标签检测的特征标志物包括二氧化碳和胺类物质。二氧化碳是多数微生物生长过程中的主要代谢物,也是果蔬采后呼吸作用中的主要代谢物。由于二氧化碳溶于水后呈酸性,因此可以利用酸碱指示剂指示。根据不同食品释放二氧化碳规律的差异,以及气调包装内二氧化碳浓度的特征,采用不同 pH 指示剂指示。肉类在劣变过程中会产生总挥发性盐基氮(TVB-N),该类物质会显著改变食品包装内微环境的 pH 值。通过 pH 响应性材料对包装中的 pH 值进行指示,可实时感知肉类制品的新鲜度。

常见的 pH 指示剂可分为天然指示剂和人工合成指示剂。花青素、姜黄素、茜素、紫草素、类胡萝卜素是常见的天然 pH 指示剂。由于天然色素作为显色的 pH 指示剂更加安全,因此其在食品领域的应用前景更优。下面介绍基于天然 pH 指示剂的食品智能标签。

1) 花青素,是自然界一类水溶性色素,主要是花色苷水解的有色苷元产物,广泛存在于植物中。花青素是果蔬中常见的呈色物质,具有较好的

光热稳定性,可在较宽的 pH 值范围内发生颜色变化,可用于 pH 值指示^[28]。从玫瑰花萼^[29]和竹节花^[30]中提取出的花青素已被成功用于猪肉^[31]、鸡肉^[32-33]的新鲜度感知。

2) 姜黄素,一种从姜黄植物中提取的天然多酚化合物。动物实验和临床试验表明,姜黄素具有多种生物活性,如抗炎、抗病毒、抗菌、抗氧化和抗癌活性。姜黄素在不同的 pH 值下结构会发生酮烯醇互变异构,从而引起颜色变化。在酸性和中性条件下,姜黄素以二酮形式存在,在碱性条件下,姜黄素以酮-烯醇结构存在,且更易被分解^[34]。研究表明,姜黄素可负载在纤维素^[35]、壳聚糖和卡拉胶^[36]等天然聚合物,以及聚氧化乙烯(PEO)等合成聚合物,用于猪肉^[35]、鸡肉^[37]、鱼肉类^[38]制品的新鲜度感知。

3) 茜素(1,2-二羟基蒽醌, $C_{14}H_8O_4$),是从茜草根部分提取的媒介染料,是古代红色染料和现代生物研究的染色剂。在溶液 pH 值变化时,茜素的分子结构会发生质子转移现象,在酸性条件下呈黄色,碱性条件下呈紫色^[39]。茜素被成功负载在包装膜上,用于鱼肉^[40]、牛肉^[41]的新鲜度感知。

4) 紫草素(萘醌色素),来源于原产新疆的中药——紫草干根的一种亲脂性红色素。紫草素的主要化学成分是紫草素和紫草醌,比花青素更加稳定^[42]。紫草素被成功用于鱼^[40]、虾^[43]、猪肉^[43]的新鲜度感知。

2.3 食品安全溯源体系

食品安全溯源体系指在食品产、贮、运、销各个环节(包括种植养殖、生产、流通以及销售与餐饮服务)中实现食品安全相关信息能够被顺向追踪和逆向回溯,从而使得食品相关的生产经营活动时刻处于监控之中的系统。食品安全溯源体系的参与主体包括原料供应、生产加工、供应链贮运销、终端消费者。记录参与主体的信息,有效推动食品安全监管,增强消费者信心,为食品安全提供保障。

2.3.1 传统食品安全溯源系统 我国的食品安全溯源系统建立时间较国外短,与发达国家相比存在一定差距。传统的溯源系统存在一些问题:1)供应链系统信息化标准不统一,数据不连通;2)以手工录入数据为主,数据全面性不足;3)溯源系统核

心数据易被篡改。近年来,随着相关技术的发展,逐步出现基于物联网技术和区块链技术的区块链溯源系统。

2.3.2 基于物联网技术的食品溯源系统 物联网技术指综合利用各种信息传感器、射频识别技术、卫星定位系统、红外感应器、激光扫描器等各种装置和技术,实时采集任何需要监控的对象的声、光、电、热、力学、生物、化学信息,通过网络实现任何物体与网络链接,实现对监控对象的智能化感知、识别和管理的过程。

通过物联网技术可实现对食品生产环节的实时监控与反馈。比如:利用非接触式射频识别技术(Radio frequency identification,RFID)可实现食品信息的非接触感知^[44];利用二维码实现溯源系统与移动终端的无缝对接^[45],利用无线传感网络技术实现溯源数据的传递^[46];利用GIS/GPS/北斗等物流跟踪定位技术,实现食品物流过程的准确跟踪与实时定位^[47]。

由于食品生产、贮、运、销过程中所涉及主体众多,实时监控消耗资源多,溯源系统数据量巨大且复杂等原因,溯源系统存在体系管理效率低,难度大以及数据存储的安全性较低,尚难实现防篡改等问题。

2.3.3 基于区块链技术的食品溯源系统 区块链是去中心化的分布式数据库,由若干数据区块组成的链条^[48]。每个区块均有保存信息,区块通过各自产生的时间顺序链接成链条,被保存在所有服务器(区块链节点)中。区块链的节点为整个区块链系统提供算力与储存空间。由于区块链节点由若干参与主体持有,修改区块链中的信息必须征得半数以上节点同意并修改所有节点的信息,篡改区块链中的数据几乎无可能。与传统网络相比,区块链具有2个主要特点:去中心化和数据防篡改,因此其信息真实可靠,无法篡改,可以解决主体间相互不信任的问题。这说明区块链在溯源领域应用前景巨大。区块链基础技术包括4个方面:去中心化分布式存储、非对称加密、共识机制、智能合约。

目前,利用区块链技术进行食品溯源引起越来越多研究人员的兴趣。Tian^[49]构建了结合物联网和区块链技术的食品供应链溯源系统。Kim等^[50]开

发了一个基于以太坊区块链的“农场到餐桌”的全流程溯源管控APP,利用APP把以太坊区块链系统和可交换GS1全球商品标识条码的物联网设备有机结合。Lin等^[51]开发了一个基于区块链技术和电子产品代码信息服务(Electronic product code information services standard,EPCIS)的食品安全追溯系统,为了缓解物联网+区块链系统存在的数据爆炸问题,该系统利用链上数据和链下数据协同管理的方式降低单节点存储的数据量。Mondal等^[52]提出基于区块链的物联网架构,在架构中使用基于对象证明(Proof of object)的身份验证协议,以及工作量证明协议(Proof of work,POW),该架构通过集成在网络层的区块链框架和集成在物理层的RFID传感器实现实时、准确、不可篡改的食品供应链溯源。

3 预制食品品质监控与溯源领域当前存在的问题

我国在预制食品品质监控与溯源领域还存在较大短板,这主要归因于我国预制食品供应链智能管控体系不完善,物流信息易断链,基于区块链等信息技术的全供应链品质管控与溯源平台缺乏等,主要表现在以下几个方面:

1) 现场检测技术装备适用性差、效率低 我国生产的高光谱、多光谱、近红外检测装备在稳定性、准确性等方面与国外差距大,相关技术产业化应用程度低;中式餐的预制食品成分较单一农产品更为复杂,其品质劣变机制与不同光谱信号、图像信息等的实时响应的机制不明晰。预制食品的现场检测技术装备实用性差,检测效率低。

2) 品质劣变及环境关键信号实时感知手段匮乏,数据采集难 用于预制食品质量及新鲜度检测的商业化指示标签,检测信号单一,使用效率低,目前主要为肉品新鲜度感知指示标签。针对其余品类的预制食品,其品质劣变因子快速可视化检测智能标签的研究不足,产业化应用难度较大。

3) 多传感器数字化集成技术落后,信息融合技术较低 当前物联网、大数据、云计算等在农业领域虽有一定的发展和突破,但是针对预制食品供应链载具中传感器采集到的温度、湿度、气体、振动、地理信息等环境信息采集信号,与预制食品

生产线现场检测装备以及预制食品包装中智能标签所得品质感知数据等多源异构数据的实时采集、数据融合的相关技术仍有不足,易形成信息断链(图 1)。

4) 跨链、高效、协同的区块链溯源数字信用平台缺乏 我国溯源应用大部分采用的是公信力、综合性能低于联盟链和私链,没有实现数据跨链、跨平台流转。高性能、高安全区块链技术欠缺,缺乏跨链、高效、协同的预制食品产后全供应链品质管控与溯源数字信用平台。

4 预制食品品质监控与溯源技术未来研究展望

4.1 预制食品现场检测技术与装备

预制食品成分相比于其对应的生鲜农产品原料更加复杂,其中不仅含有生鲜农产品原料,还含有调味品、汤汁等。其现场检测与表征的复杂度较高。现有的现场检测技术主要针对果蔬、肉品、水产的单个品类,对集成了多个品类的食品检测研究较少。对需要检测的具体品类的预制食品成分进行深入分析,根据营养成分配比,对其不同成分分别制定检测方案。比如,需要利用机器视觉和光谱学技术等手段检测预制食品中果蔬成分的劣变标志物(类胡萝卜素、黄酮类等)、水分和挥发物成分的变化;采用近红外、高光谱仪器,结合化学计量学与机器学习技术,建立肉品、水产产后品质特征(色泽、硬度、感官、蛋白质降解)的劣变谱图模型;通过多种仪器检测相结合的方法解决预制食品测量过程中水汽/水分、包装物对光谱数据的干扰,结合人工智能算法与多模态信息融合技术建立视觉、光谱数据与品质劣变的关系。

4.2 预制食品智能感知标签

基于花青素、姜黄素等天然环境响应物质的食品智能标签已有一定的发展,然而,天然产物易被氧化和褪色,导致检测效果不稳定。基于此,可通过两种途径解决:1)对天然响应物质进行改性、包埋,增加其稳定性和抗氧化特性;2)利用聚集诱导发光材料、超分子材料、金属纳米颗粒、量子点等新型材料制备智能感知标签材料。此外,可在常见的肉品 pH 智能感知标签、时间-温度标签的基础上,开发针对物流环境感知的温度、湿度、气体、



Fig.1 Integrated information acquisition system concerning about field detection and supply chain information of prefabricated food

异常震动的环境信号感知材料。此外,深入研究品质劣变、环境信号变化与智能感知材料响应特征之间的科学联系,建立继续计算模拟的智能感知材料理性设计算法。

4.3 预制食品品质监控数据的采集与利用

目前,基于窄带物联网(Narrow band internet of things, NB-IoT)技术的供应链运输设备的检测器相对成熟,如温度、湿度、二氧化碳、氧气传感探头,以及基于 GIS/GPS 和北斗卫星定位系统的物流追踪技术。然而,运输载具信息与前文所述食品包装上智能标签感知的品质信息、生产线现场检测信息来源不同,且数据类型与格式多变(多元异构信息)。如何实时处理与分析采集多源异构的预制食品溯源信息是其难点。开发轻量级、高性能、分布式的计算系统,借助数据压缩技术等轻量级计算技术,降低系统计算负荷并解决系统响应延时间问题是今后研究的方向。

4.4 基于区块链的预制食品溯源体系

由于预制食品供应链主体众多、供应环节长、物联网终端设备巨大,对便捷、高效、安全的区块链技术的需求极高,因此,如何研发高性能的基于链式数据结构、非对称加密、共识机制、智能合约的区块链支撑技术;如何在实现区块链溯源的同时保障交易信息、食品配方和秘方信息、个人隐私

信息的真实性和安全性;如何利用智能合约对溯源系统的事件、异常情况进行管控,实现区块链和供应链的协同;如何构建可视化的监管溯源系统

以及方便终端消费者使用的溯源小程序,都是未来需要研究的方向(图2)。

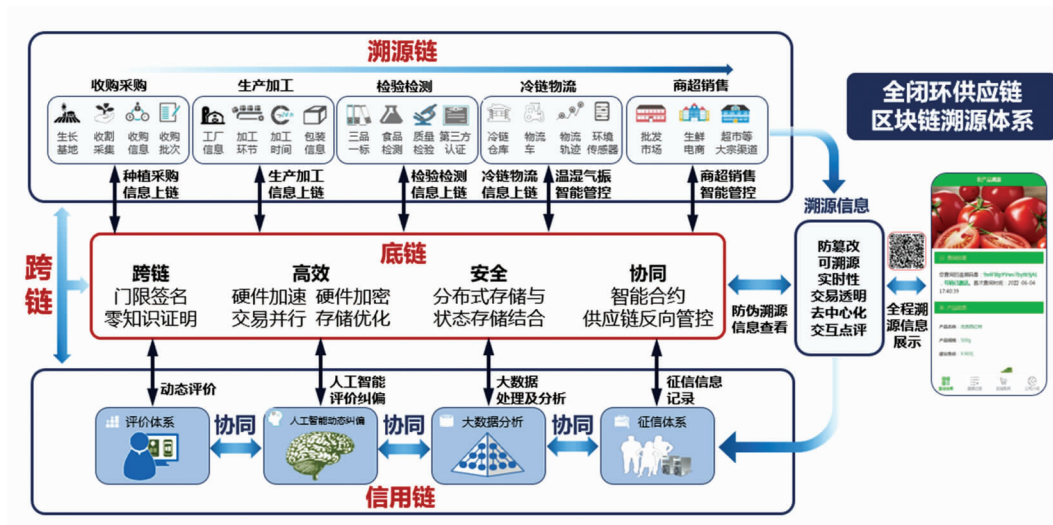


图2 预制食品区块链溯源系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of blockchain traceability system for prefabricated food

5 总结

预制食品行业的良性发展不仅关系田间地头的乡村振兴,而且关系国人消费观念的变革,对于实施乡村振兴战略、扩大内需和促进消费有着十分重要的意义。我国预制食品产业发展仍处于起步阶段,存在许多问题,在预制食品品质监控、溯源等领域存在许多不足。本文简述了预制食品现场检测装备、品质智能感知标签、溯源体系当前研究存在的不足以及未来发展方向。期待越多越完善的预制食品品质监控与溯源技术能促进产业的高质量发展,提升服务竞争力,激发市场活力,推进全产业链经济提质、增效。这需要各级政府、食品科研工作者与企业通力合作,协同攻关,引导预制食品产业健康、有序、可持续发展。最终满足人民群众日益多元化的食物消费需求,推动实现全民健康。

参 考 文 献

[1] 王卫, 张锐, 张佳敏, 等. 预制菜及其研究现状、存在问题和发展展望[J]. 肉类研究, 2022, 36(9): 37-42.

WANG W, ZHANG R, ZHANG J M, et al. Status quo, problems and future prospects of prepared dishes[J]. Meat research, 2022, 36(9): 37-42.

[2] 李冬梅, 张雪迪, 毕景然, 等. 中式预制菜肴产业的传承与创新[J/OL]. 中国食品学报: 1-8. (2022-10-11)[2022-10-18] https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=ZGSP20221010000&uniplatform=NZKPT&v=wSbCBPA3_fb13ux-nc7cLDIRfViydzg--HSPyBfllacy3VNri_bHCtBzqjRnLzr.

LI D M, ZHANG X D, BI J R, et al. Inheritance and innovation of Chinese prepared dishes industry [J/OL]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology: 1-8. (2022-10-11)[2022-10-18]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=ZGSP20221010000&uniplatform=NZKPT&v=wSbCBPA3_fb13ux-nc7cLDIRfViydzg--HSPyBfllacy3VNri_bHCtBzqjRnLzr.

[3] ABDULLAH M Z, AZIZ S A, DOS MOHAMED A M. Quality inspection of bakery products using a color - based machine vision system[J]. Journal of Food Quality, 2000, 23(1): 39-50.

[4] TAN F, MORGAN M, LUDAS L, et al. Assessment

- of fresh pork color with color machine vision[J]. *Journal of Animal Science*, 2000, 78(12): 3078–3085.
- [5] MERY D, LILLO I, LOEBEL H, et al. Automated fish bone detection using X-ray imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 105(3): 485–492.
- [6] AL-MARAKEBY A, ALY A A, SALEM F A. Fast quality inspection of food products using computer vision[J]. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2013, 2: 4168–4171.
- [7] CORTÉS V, BLASCO J, ALEIXOS N, et al. Monitoring strategies for quality control of agricultural products using visible and near-infrared spectroscopy: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 85: 138–148.
- [8] BEGHI R, BURATTI S, GIOVENZANA V, et al. Electronic nose and visible-near infrared spectroscopy in fruit and vegetable monitoring[J]. *Reviews in Analytical Chemistry*, 2017, 36(4): 20160016.
- [9] MISHRA P, WOLTERING E, BROUWER B, et al. Improving moisture and soluble solids content prediction in pear fruit using near-infrared spectroscopy with variable selection and model updating approach[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 171: 111348.
- [10] PRIETO N, ROEHE R, LAVÍN P, et al. Application of near infrared reflectance spectroscopy to predict meat and meat products quality: A review[J]. *Meat Science*, 2009, 83(2): 175–186.
- [11] HUANG X, XU H, WU L, et al. A data fusion detection method for fish freshness based on computer vision and near-infrared spectroscopy[J]. *Analytical methods*, 2016, 8(14): 2929–2935.
- [12] PU H B, WEI Q Y, SUN D W. Recent advances in muscle food safety evaluation: Hyperspectral imaging analyses and applications[J/OL]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022: 1–17. (2022-09-19) [2022-10-18]. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2121805>.
- [13] CHEN Y N, SUN D W, CHENG J H, et al. Recent advances for rapid identification of chemical information of muscle foods by hyperspectral imaging analysis[J]. *Food Engineering Reviews*, 2016, 8(3): 336–350.
- [14] BAEK I, LEE H, CHO B K, et al. Shortwave infrared hyperspectral imaging system coupled with multivariable method for TVB-N measurement in pork[J]. *Food Control*, 2021, 124: 107854.
- [15] GUO X, AHLAWAT Y K, LIU T, et al. Evaluation of postharvest senescence of broccoli via hyperspectral imaging[J]. *Plant Phenomics*, 2022, 2022: 9761095.
- [16] ELMASRY G M, FULLADOSA E, COMAPOSADA J, et al. Selection of representative hyperspectral data and image pretreatment for model development in heterogeneous samples: A case study in sliced dry-cured ham[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 201: 67–82.
- [17] XU Y, ZHONG P, JIANG A, et al. Raman spectroscopy coupled with chemometrics for food authentication: A review[J]. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 131: 116017.
- [18] ELLIS D I, MUHAMADALI H, XU Y. Rapid through-container detection of fake spirits and methanol quantification with handheld Raman spectroscopy[J]. *Analyst*, 2018, 144(1): 324–330.
- [19] PEDERSEN D K, MOREL S, ANDERSEN H J, et al. Early prediction of water-holding capacity in meat by multivariate vibrational spectroscopy[J]. *Meat Science*, 2003, 65(1): 581–592.
- [20] AFSAH-HEJRI L, HAJEB P, ARA P, et al. A comprehensive review on food applications of terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(5): 1563–1621.
- [21] LIU W, ZHANG Y, LI M, et al. Determination of invert syrup adulterated in acacia honey by terahertz spectroscopy with different spectral features[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(5): 1913–1921.
- [22] 刘欢, 韩东海. 基于太赫兹时域光谱技术的饼干水分定量分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, 5(3): 725–729.
LIU H, HAN D H. Quantitative detection of moisture content of biscuits by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2014, 5(3): 725–729.
- [23] 齐亮. 基于太赫兹光谱技术的冷鲜猪肉新鲜度检测方法[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
QI L. Detection methods of chilled pork freshness with terahertz spectroscopy[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018.

- [24] 王静伊, 岳崇泽, 王之强, 等. 时间-温度指示器在食品智能包装中的应用研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业, 2022: 1-10. (2022-05-24)[2022-10-18] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1802.TS.20220523.1536.001.html>.
- WANG J Y, YUE C Z, WANG Z Q, et al. Research progress of time-temperature indicator (TTI) in intelligent food packaging[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2022: 1-10. (2022-05-24) [2022-10-18] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1802.TS.20220523.1536.001.html>.
- [25] JAFRY A T, LIM H, SUNG W K, et al. Flexible time-temperature indicator: A versatile platform for laminated paper-based analytical devices[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2017, 21(3): 1-13.
- [26] GALAGAN Y, SU W F. Fodable ink for time-temperature control of food freshness: Novel new time-temperature indicator[J]. Food Research International, 2008, 41(6): 653-657.
- [27] BRIZIO A P D R, PRENTICE C. Development of an intelligent enzyme indicator for dynamic monitoring of the shelf-life of food products[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 30: 208-217.
- [28] BECERRIL R, NERIN C, SILVA F. Bring some colour to your package: Freshness indicators based on anthocyanin extracts[J]. Trends In Food Science & Technology, 2021, 111: 495-505.
- [29] ZHANG J, ZOU X, ZHAI X, et al. Preparation of an intelligent pH film based on biodegradable polymers and roselle anthocyanins for monitoring pork freshness[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 306-312.
- [30] KOSHY R R, KOSHY J T, MARY S K, et al. Preparation of pH sensitive film based on starch/carbon nano dots incorporating anthocyanin for monitoring spoilage of pork[J]. Food Control, 2021, 126: 108039.
- [31] CHOI I, LEE J Y, LACROIX M, et al. Intelligent pH indicator film composed of agar/potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 122-128.
- [32] KUREK M, HLUPIĆ L, ŠČETAR M, et al. Comparison of two pH responsive color changing bio-based films containing wasted fruit pomace as a source of colorants[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(9): 2490-2498.
- [33] CHAYAVANICH K, THIRAPHIBUNDET P, IMYIM A. Biocompatible film sensors containing red radish extract for meat spoilage observation[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 226: 117601.
- [34] NOUREDDIN S A, EL-SHISHTAWY R M, AL-FOOTY K O. Curcumin analogues and their hybrid molecules as multifunctional drugs[J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2019, 182: 111631.
- [35] ZHANG X, LI Y, GUO M, et al. Antimicrobial and UV blocking properties of composite chitosan films with curcumin grafted cellulose nanofiber[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106337.
- [36] ZHOU X, YU X, XIE F, et al. pH-responsive double-layer indicator films based on konjac glucomannan/camellia oil and carrageenan/anthocyanin/curcumin for monitoring meat freshness[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106695.
- [37] YILDIZ E, SUMNU G, KAHYAOGU L N. Monitoring freshness of chicken breast by using natural halochromic curcumin loaded chitosan/PEO nanofibers as an intelligent package[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 170: 437-446.
- [38] CHEN H Z, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Novel pH-sensitive films containing curcumin and anthocyanins to monitor fish freshness[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105438.
- [39] EZATI P, RHIM J W. pH-responsive chitosan-based film incorporated with alizarin for intelligent packaging applications[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105629.
- [40] EZATI P, BANG Y J, RHIM J W. Preparation of a shikonin-based pH-sensitive color indicator for monitoring the freshness of fish and pork[J]. Food Chemistry, 2021, 337: 127995.
- [41] EZATI P, TAJIK H, MORADI M. Fabrication and characterization of alizarin colorimetric indicator based on cellulose-chitosan to monitor the freshness of minced beef[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 285: 519-528.
- [42] HAN J, WENG X, BI K. Antioxidants from a Chinese medicinal herb - *Lithospermum erythrorhizon* [J]. Food Chemistry, 2008, 106(1): 2-10.
- [43] DONG H, LING Z, ZHANG X, et al. Smart colorimetric sensing films with high mechanical strength

- and hydrophobic properties for visual monitoring of shrimp and pork freshness[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 309: 127752.
- [44] ALFIAN G, RHEE J, AHN H, et al. Integration of RFID, wireless sensor networks, and data mining in an e-pedigree food traceability system[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 212: 65–75.
- [45] MISHRA N, MISTRY S, CHOUDHARY S, et al. Food traceability system using blockchain and QR code[M]. Springer: IC–BCT 2019, 2020: 33–43.
- [46] PANG Z, CHEN J, ZHANG Z, et al. Global fresh food tracking service enabled by wide area wireless sensor network[C]. 2010 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). Ireland: IEEE, 2010.
- [47] QU X H, ZHUANG D F, QIU D S. Studies on GIS based tracing and traceability of safe crop product in China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(6): 724–731.
- [48] ROGERSON M, PARRY G C. Blockchain: Case studies in food supply chain visibility [J]. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2020, 25(5): 601–614.
- [49] TIAN F. A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of things[C]. The 14th International conference on service systems and service management. Dalian, China: IEEE, 2017.
- [50] KIM M, HILTON B, BURKS Z, et al. Integrating blockchain, smart contract–tokens, and IoT to design a food traceability solution[C]. 2018 IEEE 9th annual information technology, electronics and mobile communication conference (IEMCON). British Columbia, Canada: IEEE, 2018.
- [51] LIN Q, WANG H, PEI X, et al. Food safety traceability system based on blockchain and EPCIS [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 20698–20707.
- [52] MONDAL S, WIJewardena K P, KARUP-PUSWAMI S, et al. Blockchain inspired RFID–based information architecture for food supply chain [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(3): 5803–5813.

Recent Advances on Quality Monitoring and Block–Chain Traceability Technology of Prefabricated Food Supply Chain

Zeng Xinan^{1,2}, Cao Shilin^{1*}, Ma Ji², Cheng Junhu², Wang Langhong¹

(¹Guangdong Key Laboratory of Food Intelligent Manufacturing, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong

²School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract With the increase of the pace of life, under the influence of the new consumption mode and regular epidemic prevention and control, prefabricated food with rich varieties, convenient has gradually come into demand in the market. The prefabricated food in China can not only realize the standardized production of catering industry, reduce costs and increase efficiency, but also improve the convenience of consumers' cooking. The quality, freshness and food safety risks of prepared food are widely concerned by researchers and the public. This paper discusses the recent advance and challenges of field detection equipment for quality monitoring and smart label of prefabricated food, and traceability technology based on blockchain and the Internet of Things. Finally, the author made a outlook on the future development direction.

Keywords prefabricated food; quality monitoring; traceability; blockchain