

食品智能仓储、包装技术与高端装备研究进展

郭志明^{1,2}, 张鹏敏¹, 李兆丰³, 徐斌¹, 石吉勇¹, 邹小波^{1,2*}, 陈坚^{3*}

¹ 江苏大学食品生物与工程学院 江苏镇江 212013

² 江苏大学 中国轻工业食品智能检测与加工重点实验室 江苏镇江 212013

³ 江南大学未来食品科学中心 江苏无锡 214122)

摘要 在食品制造与供给全球化背景下,树立并践行“大食物观”,构建多元化食物供给与高效综合利用体系,是食品稳定安全供给的基本保障,其中仓储、包装技术及其装备在食品提质增效方面发挥着重要作用。智能感知、无线定位、远程控制等新兴技术促进食品仓储提档升级,人工智能、纳米材料和生物科技推进食品包装智能化、绿色化,结合食品仓储与包装智能化高端装备支撑食品制造高质量发展。本文分析食品仓储、包装技术与装备行业的发展态势,综述智能仓储、包装的关键技术与装备研究进展,指出智能仓储、智能包装和高端装备发展的核心问题,最后阐述仓储、包装关键技术与装备的发展趋势。该领域应以国家战略规划为引领,以食品仓储、包装高端装备为引擎,以技术革新、绿色发展和跨界融合形成新质生产力驱动食品制造高质量发展。

关键词 食品仓储; 智能包装; 高端装备; 智能制造

文章编号 1009-7848(2025)01-0012-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.01.002

随着全球化和人口数量的不断攀升,食品安全、品质保障及其可持续发展战略地位凸显。践行“大食物观”,构建多元化食物供给体系,是保障国家食品稳定安全供给的客观要求。作为食品生产和消费大国,中国是全球食品工业可持续发展的主要贡献者,对推动全球绿色转型,构建全球食品安全体系扮演着重要角色。为了深入贯彻“十四五”智能制造发展规划》和国家“双碳”战略,我国食品仓储、包装技术及高端装备行业在国家战略引领下,通过技术创新,推动产业转型升级,加快高质量发展^[1-2]。

食品仓储、包装技术是通过综合措施控制食品质量变化,减少食品损失,最大限度延长食品固有质量的学科^[3]。食品工业进入 4.0 时代,智能仓储、包装技术及高端装备逐步融入食品贮藏加工领域。智能仓储及包装系统具有智能化的数据处理和高效的信息传递技术,可靠的包装策略及满

足全流程识别控制的软、硬件条件,可提高社会生产效率,降低运作成本,扩大经济效益,同时有利于消费者获取食品信息,增加消费者获得食品安全性和质量的途径^[4]。食品智能仓储、包装体系的应用价值较传统包装方式有了很大的提高。我国食品仓储、包装技术及装备向智能化、绿色化方向发展,将提高我国食品工业在国际的影响力和竞争力。当前,我国食品仓储、包装行业正处于高质量发展阶段,通过引入互联网计算机技术和高端装备,对保障食品安全和质量,提升行业整体水平,支撑可持续发展战略具有重要意义^[5]。高端装备是指高技术、高附加值的先进工业设施设备,主要包括传统产业转型升级和战略性新兴产业发展所需的高技术高附加值装备。食品高端装备的研发是智能工厂进行无人作业的必要手段。在智能仓库中引入高端装备,能够实现更精确的仓储环境和食品质量监测以及食品运输,进而保障食品在贮藏和运输中的品质控制和资源有效利用。

随着食品仓储、包装技术与装备的深入发展,标志着我国食品工业在由 4.0 到 5.0 时代稳步推进^[6]。通过科学技术创新和多学科融合,推动我国食品仓储、包装技术和装备制造水平赶超发达国家,筑牢食品产业安全屏障,优化资源配置,降低能耗并减少环境污染,促进行业可持续发展。鉴于

收稿日期: 2025-01-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2101105,2023YFE0107100,2022YFD2100604);国家自然科学基金项目(32472431,W2412103)

第一作者: 郭志明,男,博士,教授

通信作者: 邹小波 E-mail: zou_xiaobo@ujs.edu.cn
陈坚 E-mail: jchen@jiangnan.edu.cn

此,本文重点概述我国现阶段食品智能仓储、包装与装备的研究进展,亟待解决的关键核心问题以及未来发展趋势;梳理现有成果和发展不足,为实现食品仓储、包装及装备智能化转型与绿色高效发展提供参考。

1 我国食品仓储、包装技术与装备行业发展现状

1.1 行业发展保持稳定态势

近年来,我国食品仓储、包装及装备行业总体发展态势良好。中国包装联合会统计显示,2023年我国包装行业规模以上企业 10 632 家,全国包装行业累计完成利润总额 601.97 亿元,同比增长 9.46%;增速比去年同期提高 23.47%^[7]。物联云仓数据显示,全国仓库总面积 41 229.4 万 m²,同比增长 6.1%^[8]。海关总署统计显示,包装装备和仓储搬运机械进出口总额度总计 1 528.92 亿元,同比增长 14.9%^[9]。这些数据表明行业发展稳中求进,出口保持稳步增长。

1.2 科技创新促进产业技术革新

在《关于加快推进快递包装绿色转型的意见》《中国包装工业发展规划(2021—2025)》《“十四五”现代物流发展规划》《国务院关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》等政策的推动和引领下,行业坚持创新驱动发展,加大科技创新投入和技术攻关,积极开展原始创新和技术集成应用创新。食品包装行业正在向高透明度、绿色可持续、便捷、互动性强的方向稳步发展;仓储资源运营向数字化管理、可视化逐步迈进;装备行业在数字化监控、节能降耗、信息化远程管理、设备集成优化、车间交钥匙工程设计、质量追溯等方面取得了明显进步。初步实现了食品仓储、包装技术与装备同人工智能(AI)、大数据、云计算、互联网、机器人等新技术的融合发展。

1.3 关键核心技术及装备薄弱阻碍行业发展

当前国际局势变乱交织,百年变局加速演进,食品仓储、包装和装备行业产品出口受其影响。与欧美发达国家相比,企业规模相差巨大,行业内产品性能及核心技术缺少竞争力和垄断力,尤其是高端装备在国际贸易中处于劣势。行业内部普遍存在研发投入不足,自主创新能力不强的

问题。企业、科研院所和高等院校专业化研究团队和平台少,高端关键技术及装备攻关力度弱,具有自主知识产权的产品供给不足,严重制约了行业创新驱动和高质量发展。

2 食品智能仓储、包装关键技术与装备研究进展

随着食品工业 4.0 时代的深入推进,食品仓储、包装及装备研究取得显著进步:互联网信息技术进入仓储管理体系,建立智能食品仓库数字孪生模型,实现对仓库各要素的实时监控、控制;智能包装中引入天然响应性材料、传感器和无接触信息载体,实现了实时、精确、绿色无污染;机械装备行业加大技术创新和产品开发力度,逐步向自动化、高速化、数字化转型。智能仓储、包装技术及装备在食品贮藏加工领域打开新局面。

2.1 智能仓储研究进展

2.1.1 仓储智能管理系统 智能管理系统是智能仓储体系的重要一环,集成了互联网、信息化、自动化等技术的企业内部仓储管理系统。智能仓储的实现需要先进的信息处理和管理技术,包含各类监控系统和管理系统,例如智能监控系统^[10]、搬运系统^[11]、储存系统^[12]、自动分拣系统^[13]和仓库信息管理系统^[14],以及相对复杂的控制调度算法,完成对货物储存过程的全程监控与调配(图 1)。结合智能算法和远程控制技术可以实现对不同货物存储环境的调节,智能仓储不仅提高了仓储作业效率,解放劳动生产力,避免货物的损坏和丢失,还可以合理化设计区域布置,节约土地资源。

智能仓储管理系统的研究从仓储空间布局、仓储物流作业、货位分配、运行绩效、路径优化等多方面入手。常见的技术包括系统布置设计(SLP)^[15]、EIQ 分析、ABC 分类方法^[16]、网络分析法(ANP)^[17]、Flexsim 和 AnyLogic 物流仿真软件模拟等^[18]。食品种类多样,智能仓库功能有所差异,导致对智能仓库管理系统提出更高的要求,因此需针对实际需求从多角度考虑。例如,从优化系统运行时间的角度出发,针对仓储系统运行绩效和存储策略问题,分析仓储系统的优、劣^[19]。随着智能仓库对动态补货需求的增加,需更加准确地计算出仓库空间利用率,通过使用连续时间马尔可夫链分析框架,解

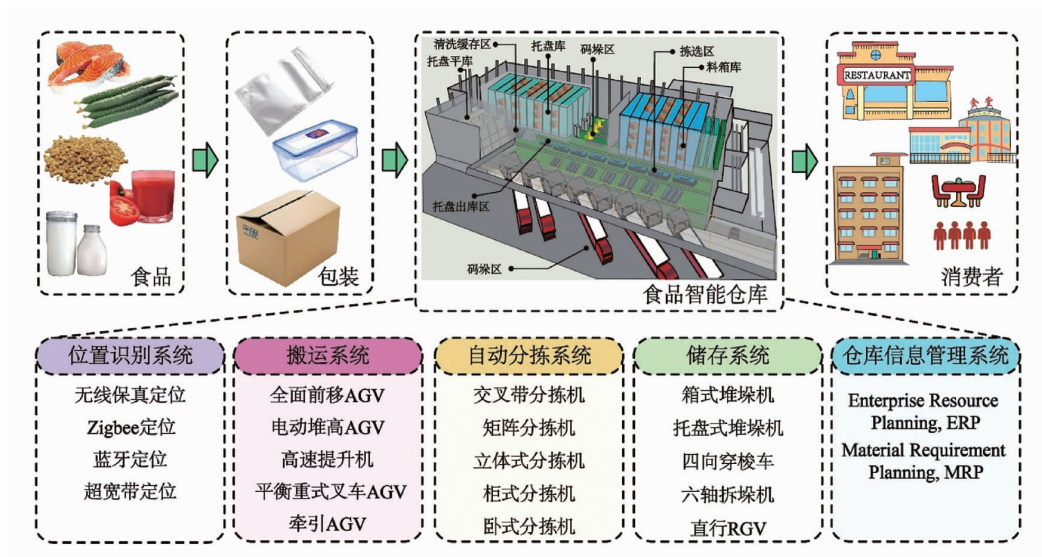
析空间浪费的主要因素,建立智能码垛仓库的空间利用率计算方法,确定运输路线,实现空间利用率最大化^[20]。亦可从物品相关性和周转频率出发,利用 Flexsim 软件仿真优化货架布局^[18]。针对于优化运输路线,研究人员利用优化种子法建立具有类别约束的联合订单分批及拣选路线问题分析,提高拣选效率^[21];利用 AI 算法,对障碍物进行聚类分析,提高避障能力,优化路径,减小运行效率^[22]。AI、大数据、云计算和互联网技术的介入是实现仓储管理智能化的必要手段。不同算法和仿真软件与仓储管理思路的结合,使国内智能仓储管理系统优化研究取得重要进展。

2.1.2 仓储智能监控 仓储环境监控和管理系统要实现的最基本功能是根据当前仓库所存储的货物种类制造相应的存储环境,因地制宜,实现智能仓储个性化管理。这与以往的人工定时、定点监测通过积累经验,结合实际情况做出主观判断和决策的管理方式大不相同。仓储智能监控分为环境因子监控和目标物检测 2 个方面。

食品仓储环境是影响食品质量和安全性的重要因素,因此需要通过食品仓库中的温度、冲击载荷、振动、倾斜运动、相对湿度和光照等环境因子实时监控,以确定仓储条件是否适宜当前货物^[23]。基于环境因子的监控,智能仓库及时调整,防止食品变质以及对仓库环境的污染。同时,记录

仓储过程中环境变化情况,以对变质或损坏的食品负责。另外,复杂的仓库环境使不同区域的环境因子所处范围有所不同,需要同时测量仓库内多个区域的环境因子参数以实现整体调节^[24]。随着嵌入式技术的发展和新型传感器的出现,环境信息监测和相关设备的控制迎来改变,提高了检测精度,降低了监控系统建设、更新升级和维护的费用。Ji 等^[25]提出一种利用智能汽车对烟叶仓库进行温湿度监测的方法。小车配有多个检测传感器、UWB 系统、WiFi 模块,具有实时报警和定位功能;同时可以检测烟叶存储仓中的温湿度数据,并将数据传输至终端。

仓储信息监控是一种基于目标空间位置和物流信息统计的实时监控手段。它将监控目标所处区域及信息加以识别,涉及定位和自动识别等多项技术。定位技术包括无线保真(WIFI)定位、Zigbee 定位、蓝牙定位和超宽带(UWB)定位^[26]。自动识别技术包括 RFID 识别技术,条形码识别技术,NFC 等。实时监控食品的空间位置可以实现项目统计的自动化,提升仓库的数字化水平,合理规划食品作业流程,避免资源浪费,推动智能仓储的柔性化发展。例如,以冷链物流立体仓库的运行场景为研究对象,建立全映射、多维仿真的五维数字孪生模型,实现对仓库各要素实时可视化和监控,并提出支持系统关联决策的模型优化策略。该策



注:ERP:企业资源计划;MRP:物料需求计划。

图 1 食品智能仓储全程监控与调配流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of food intelligent storage monitoring and deployment process

略可以智能地调整仓库温控区域的负载和热分布,在相同储存条件下,新鲜蔬菜的损失率降低了 25%~30%^[27]。多传感器融合模型可用于解决冷链过程中“断链”缺乏监管等问题,然而在供应链的上、下游间信息数据信任度差的问题需要进一步研究解决^[28]。

2.2 智能包装研究进展

2.2.1 指示型包装 为了达到对贮藏和销售过程中食品实时监控的目的,指示型包装需要对环境温度、贮藏时间、二氧化碳和挥发性含氮化合物等物质的浓度作出响应,包括 pH 指示器、时间-温度指示器(Time-temperature indicator, TTI)和气体泄漏指示器等类型^[29]。指示型智能包装通常由响应性材料和固体支撑两部分组成。其中响应性材料以化学合成或天然的色素为主。其中,化学合成色素包括二甲基黄、酚红、溴甲酚绿、甲基橙、甲基红、氯酚红和溴百里酚蓝等,其优点是它们可以批量生产,具有化学稳定性,并可以提供一个明确的新鲜度指示。而天然色素有姜黄素、甜菜红碱、胭脂红酸、花青素等具有无毒、可生物降解和可广泛使用的优势。

pH 指示器是基于酸碱反应化学原理的智能包装,可以反映食品中微生物或酶引起的质量变化程度^[30]。通常,pH 指示剂以标签或涂层的形式添加到包装材料中。当包装内的食物开始变质时,由于细菌或酶氧化食品中的营养物质产生挥发性化合物,因此改变包装内的 pH 值(图 2a)。随着包装内环境 pH 值的改变,使得固定在支撑材料中的 pH 敏感染料发生不可逆的颜色变化^[31]。在聚乙烯醇/秋葵胶多糖复合薄膜中加入玫瑰花青素,制备用于检测虾新鲜度的比色膜,实现了在 pH 范 2~12 范围发生显著的颜色变化,对挥发性氨表现出较高的敏感性,并且比色膜可显示肉眼可见的颜色变化,以区分虾的新鲜度^[32]。

TTI 是一种可以贴在包装内部,反映食品在储运过程中时间和温度的智能包装^[33]。其原理是利用温度作为隐射食品中物理、化学、微生物或酶的反应程度的重要指标,反映食品成分的变化程度。TTI 可以通过在不同时间和温度条件下动态的颜色变化,反映食品的腐败程度(图 2b)。基于此,利用 TTI 指示器的颜色变化与时间、温度的关系,开

发基于美拉德反应的冷敏感指示器,反映冷冻海鲜的新鲜度。由于指示器的颜色变化与鲭鱼的总挥发性碱性氮含量之间存在良好的相关性($R^2 = 0.98$),因此冷敏感指示器可以很好地反映鲭鱼的新鲜度^[34]。

气体泄漏指示器通过指示剂被激发后的颜色变化(图 2c),进行包装的完整性检测^[35]。在气调保鲜时,常出现高二氧化碳、低氧气的环境,包装的完整性决定保鲜效果。研究人员基于氧化-还原染料(亚甲基蓝^[36])、光致变色半导体材料催化剂(WO_3 ^[37])和聚合物载体,开发了这类气体泄露指示器。这些指示器应具有高灵敏度、易得性、稳定性以及对目标气体存在不可逆反应等特点。Huang 等^[38]使用石墨烯、 TiO_2 、甘油、羟乙基纤维素、亚甲基蓝和聚乙烯醇构建了用于检测改性气氛包装(MAP)完整性的视觉比色氧指示器,可在不破坏包装的情况下检测 MAP 的完整性。

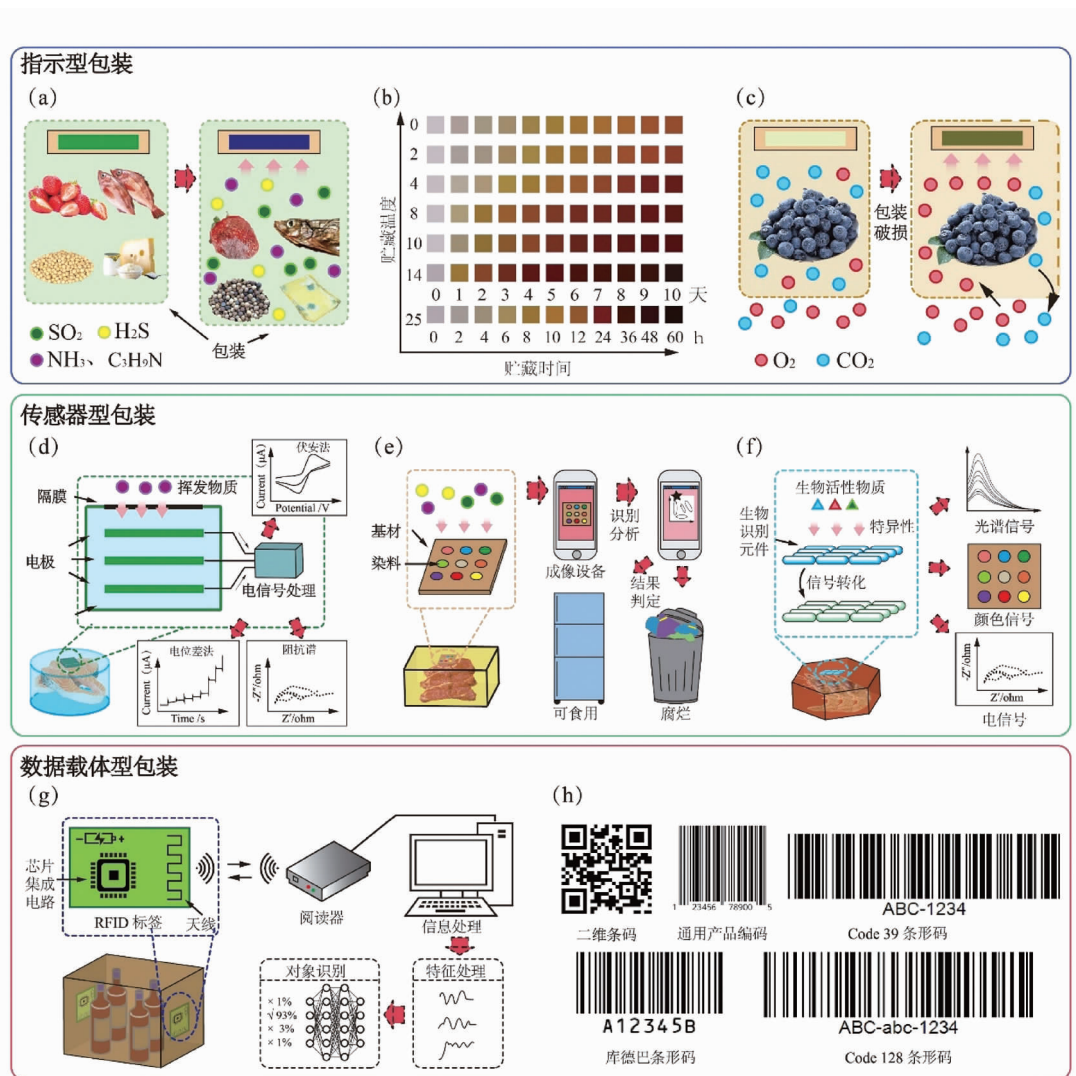
2.2.2 传感型包装 传感型包装是一类利用电子设备对食品的颜色、导电性、发光等物理化学性质进行采集并转化为电信号,进而实现对食品新鲜度检测的智能包装^[39]。传感型包装主要包括化学性传感器智能包装和生物性传感器智能包装,它们具有强专一性、低检测限和高重现性等优势,然而也存在 2 个明显的缺陷:传感器和食品接触使化学物质迁移致食品污染;此外,开发和应用成本高。

目前,常见的化学型传感器智能包装包括电分析气体传感器智能包装和比色阵列气体传感器智能包装。在食品品质监测过程中,营养成分受生物酶和微生物的影响,分解成胺类化合物、 H_2S 、 CO_2 、 H_2 、硫醇、酮和吡嗪等挥发性物质。通过气体浓度的检测,间接监控食品新鲜度。电分析气体传感器智能包装的工作原理是将化学反应转化为电信号,从而建立被测气体的成分、浓度与输出电信号的关系(图 2d),最终实现目标气体的定性分析和定量检测^[40]。例如,利用在二维过渡金属碳化物(Ti_3C_2Tx)上原位生长 TiO_2 ,制备的具有近场通信和微控制器系统的集成电路报警系统,达到及时、准确地反映猪肉、鱼和虾的腐烂过程的目的,具有生物相容性、可批量生产等优点^[41],然而易受环境因素的干扰。

比色阵列传感器则可以弥补感官仿生技术存在的环境敏感缺点,实现对多种分子结构、化学性质相近的单一组分分析物的识别或对复杂分析物的区分^[42]。该技术是基于阵列上的所有分子识别单元识别气味分子信息,并将其转化为光学信号输出,应用于不同物质的区分和识别,从而实现了对复杂混合物的识别检测(图 2e),通常采用光谱或成像 2 种方式采集信号^[43]。例如,将交叉反应气敏染料封装在树脂微珠,浸渍在 1 个低成本的纸基材中制备比色阵列传感器,以智能手机摄像头作为颜色信息获取设备,达到准确监测鸡肉老化和最终变质的目的^[44]。随着纳米材料和光纤传感技

术的加入,化学型传感器的选择性和灵敏度可以进一步提升^[45]。

生物型传感器智能包装是一类对食品中的特征性抗原物质、特征酶以及核酸、抗原、微生物变化敏感的包装材料(图 2f),其可以应用于生鲜农产品农药残留方面监测^[46]。丛昊洁^[47]利用二氧化锰纳米酶类氧化酶活性,建立了多色比色生物传感器,成功用于 37, 25, 4 °C 环境中储存 0~288 h 的鲫鱼和对虾鲜度的评价,实际样品加标回收率为 90.63%~102.00%,并构建了鲜度评价小程序。另外,生物型传感器智能包装也可以利用便携式拉曼光谱仪与智能手机相结合,建立新型智能手机/



注:a. pH 指示器;b. TTI;c. 气体泄漏指示器;d. 电分析气体传感器;e. 比色阵列传感器;f. 生物型传感器;g. 射频识别技术;h. 条形码。

图 2 智能包装示意图

Fig.2 Schematic diagram of intelligent packaging

SERS 双读取微流控免疫分析平台,用于食物中过敏蛋白(α -la)的检测,该方法的检出限为 0.011 ng/mL^[48]。

2.2.3 数据载体型包装 数据载体型智能包装通过射频识别和条码识别等数据识别设备,对食品从生产到销售全流程的信息溯源,实现防止假冒和自动追溯^[49]。此类自动化标签识别技术极大地提高了数据采集效率和追溯精确性,还可以达到降低运输成本,提高食品质量和安全性的目的。

射频识别技术在应用时需将芯片集成到食品包装表面,其成本较高,常被用于海鲜产品、乳制品等高附加值食品的品质监控,对其冷链运输期间新鲜度进行实时监控并记录^[50-51]。射频射线(RF-Ray)系统基于不同物体具有不同反射特征的原理来标记信号,通过建立基于卷积神经网络的特征提取模型,从多径信号中提取物体的反射特征,实现对目标食品的检测^[52]。RF-Ray 系统的准确率可达到 97%以上,并且在不打开包装的情况下,仍可使用射频识别设备检测包装内部物品是否被非法替换,以提高食品在运输中的安全性(图 2g)。

条形码是一种光电式扫描设备可读的符号,通过条、空模块宽窄比例的不同,代表特定字符,以承载不同的数据信息^[53]。市场上常见的条形码包括通用产品编码(UPC)条形码、库德巴条形码(Coda bar)、CODE 39 条形码和 CODE 128 条形码、二维条码(QR)等(图 2h)。由于标签成本低且可通过移动设备识别,条形码成为常用的标识产品和库存控制的符号。条码识别系统使得追溯产品的序列号、生产日期、有效期、位置和生产批次等信息更加便捷。随着条形码技术的发展,可将条码张贴于弯曲农产品表面,使得单个果蔬农产品的信息溯源成为可能,并且在 iOS 和 Android 平台上均可使用,可读性在 89.5%以上^[54]。射频识别技术和条形码技术已成功用于食品信息溯源和食品全流程追踪。

2.3 高端装备研究进展

2.3.1 食品包装中的高端装备 食品包装机械是实现产品包装高速化、自动化、多功能化的根本保证,可以达到大幅度提高生产效率,降低劳动强度,改善劳动条件,节约材料,降低成本,提高产品

质量的目的。目前,食品装备企业加大创新产品和技术开发力度,在吹瓶技术、无菌罐装、智能酿造、乳品柔性无菌纸盒罐装、异形瓶机器人灌装、精酿啤酒装备生态链等众多产品技术方面都有突破,缩小了我国的产品装备技术与国际先进水平的差距。自 2017 年至今,世界知识产权组织统计发现中国与食品包装设备相关的专利高达 12 010 项,食品机械装备得到突飞猛进的发展(图 3,图 4)^[55]。2021 年后,本领域的年度专利申请量呈下降趋势,表明该领域进入成熟期或者短暂调整期,技术趋于成熟。

食品包装机械通常需要具有运动速度快,包装效率和动作精度高,清洁方便,包装速度可灵活调整和通用性强的特点。Starbloc 超级一体机适用于 200~2 500 mL 的 PET 瓶,包含吹瓶、旋盖、灌装、贴标 4 个模块,最高产能高达 72 000 瓶/h,可满足饮料、水、乳品、调味品等多种产品的罐装需求。高速智能包装生产线可实现以 15 000 瓶/h 的速度罐装白酒异型瓶。全自动完成纸片输入、产品分道、整列、定位、裹包、胶封和成品输出的 XTB 系列全自动高速智能裹包机,可用于联杯、易拉罐、塑瓶和利乐砖等产品形态,满足啤酒、酸奶、调味品等各种液态产品包装,产量于 21 000~48 000 杯/h 之间。

2.3.2 食品仓储中的高端装备 智能仓储通过对叉车、输送带、无人搬运车等货物运输设备的控制提高货物搬运作业能力,并根据设备操作时的反馈数据对产品显示可视化的监控和追踪,从而节省大量的人力,提高分拣效率和仓储效率,同时提高了仓储的安全系数。随着国内智能化食品仓储革新的逐步推进,出现大量的高端装备,包括车载式智能温控、自主控温式智能立体库^[56]、蓄冷周转箱^[57]、末端冷链无人配送装备等。另外,互联网+、物联网、工业互联网、智能计算、数字孪生、区块链、AI、物流自动化、5G 通信和工业机器人等先进技术均开始在仓储技术装备业集成应用。物流机器人与 AI 及工业互联网发展叠加,针对自动搬运、智能分拣、货物存储、自动装卸、场内输送等场景实现食品智能仓储无人化作业^[58]。

近年来,我国食品仓储设备研发应用呈现高速发展趋势。中国与食品保藏设备相关的专利高

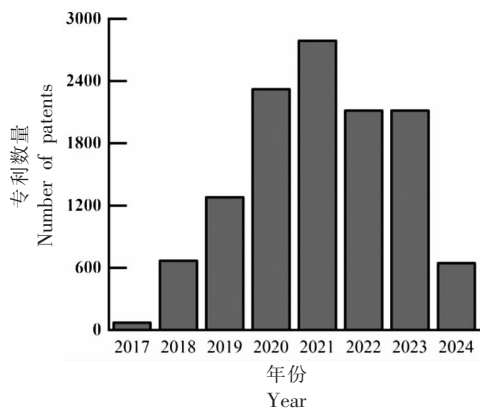


图3 中国2017—2024年食品包装机械发明专利趋势图^[55]

Fig.3 Trend chart of invention patents of food packaging machinery in China from 2017 to 2024^[55]

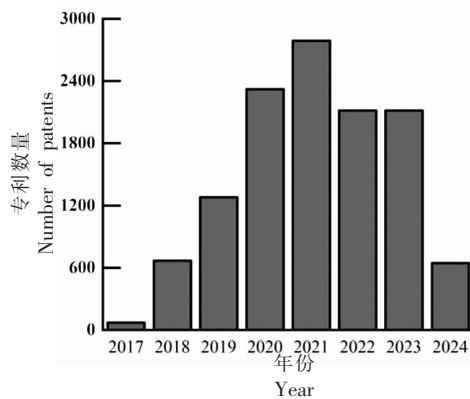
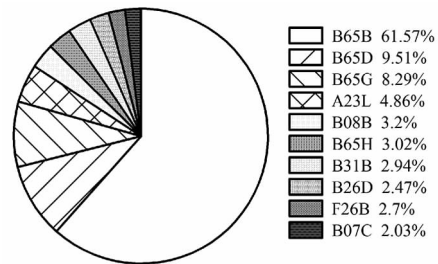


图5 中国2017—2024年食品保藏机械发明专利趋势图^[55]

Fig.5 Trend chart of invention patents of food storage machinery in China from 2017 to 2024^[55]

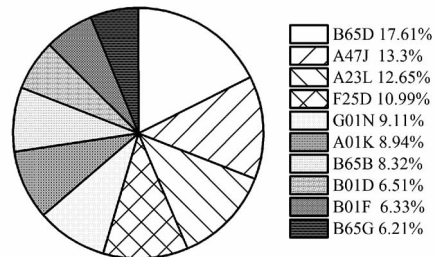
达 22 903 项，其中以运输、包装和储存(B65D、B65D)为主题的专利有 3 807 项,占据总量的 23.81%，以制冷设备(F25D)居多。另外,家用设备(A47J)有 2 126 项目,居于第 2 位(图 5,图 6)^[55]。多层高压电极托板保鲜柜的研制解决了保鲜柜高耗能、保鲜能力差、能源浪费严重、空间利用率差和安全性能不足的问题^[59]。双温冷库具有不同的温度储存槽,在达到食品冷藏、保鲜要求的同时,还能达到防止两间冷库串味的效果,为多温度冷库的研发提供了实际案例^[60]。除贮藏设备外,托盘式高速堆垛机、穿梭机器人、立体分拣系统、协作拣选机器人等高端运输为食品智能仓储提供新生力量。据国家知识产权总局调查显示,2023 年我国发明



注:B65B:包装物件或物料的机械装置或设备,或方法;B65D:用于物件或物料贮存或运输的容器;B65G:运输或贮存装置,例如转载或倾卸运输机、车间运输机;A23L:食用蛋白质组合物;B08B:一般清洁;B65H:搬运薄的或细丝状材料,如薄板、条材、缆索;B31B:纸、纸板或以类似纸的方式加工的材料制成的容器的制备;B26D:切割;F26B:从固体材料或制品中消除液体的干燥;B07C:邮件分拣。

图4 中国2017—2024年食品包装机械发明专利分类图^[55]

Fig.4 Classification chart of food packaging machinery invention patent in China from 2017 to 2024^[55]



注:B65D:用于物件或物料贮存或运输的容器;A47J:厨房用具;A23L:食用蛋白质组合物;F25D:冷柜;G01N:除免疫测定法以外包括酶或微生物的测量或试验;A01K:禽类、鱼类、昆虫的管理;B65B:包装物件或物料的机械装置或设备,或方法;B01D:分离;B01F:混合,例如溶解、乳化、分散;B65G:运输或贮存装置,例如转载或倾卸运输机、车间运输机。

图6 中国2017—2024年食品保藏机械发明专利分类图^[55]

Fig.6 Classification chart of food storage machinery invention patent in China from 2017 to 2024^[55]

专利产业化率 39.6%,较上年提高 2.9 个百分点^[61]。国内与智能仓库相关研究的发展潜力巨大,值得注意的是,中国的专利申请总量虽最多,但创新高度低于平均水平。

食品高端装备的研发是智能工厂进行无人作业的必要手段,在智能仓库中引入高端装备,能够实现更精确的仓储环境和食品质量监测以及食品运输。高端装备是提升企业工作效率与产品质量,推动产业转型升级,满足多样化消费需求的关键,作为整个产业发展的基础,对食品产业创新发展

具有重要作用。食品高端装备的智能化是食品产业现代化、高端化转型的重要方向,将为食品行业带来更多的创新和发展机遇。

3 食品智能仓储、包装技术与装备发展核心问题

食品智能仓储、包装技术与装备的创新性研究及应用成效显著。为满足我国科技发展愿景和重大战略需求,以下核心问题亟待解决:1)智能仓储管理和测控系统急需升级优化,相关的现代服务业发展滞后。2)新鲜度指示标签和传感器智能包装因安全性和经济效益等问题而鲜有投入使用。3)专用高端装备及其关键器件与国际先进水平仍有差距,智能仓储、包装技术及装备研发赶超发达国家任务艰巨。

3.1 智能仓储核心问题

3.1.1 管理系统智能优化 智能仓储为连接企业自身和终端客户的中转站,是物流环节的重要一环。提高仓储运作效率有利于降低社会运行成本,同时也是提升企业国际竞争力的重要手段。中国目前处于自动化和集成自动化逐步普及的阶段,滞后的仓储现状无法满足社会经济发展带来的更大需求。可通过以下措施进行改进:1)科学优化仓储布局,设计合理的商品仓储管理和仓储分类方法,最大化利用仓储面积,减少产品的搬运距离和出入库时间,减少仓储成本。2)注重引入贝叶斯模型和深度学习等先进技术,建立数字化、网络化、智能化集成绿色仓储管理信息系统,集成库存监控、能源消耗、环境绩效等多维度数据,实现仓储活动的可视化管理。3)响应国家号召,构建服务网络管理体系,促进企业向服务型企业转型。

3.1.2 测控系统转型升级 仓库场景中存在商品流量大、货物与区域分布复杂等问题,而单一的定点测定和检测系统与控制系统的分离,严重影响智能仓储的工作效率。以温度为例,在仓储环境中呈梯度变化;针对需要精细控制的区域,合理设计节点传感器分布,保证检测仪器的稳定性,并建立传感器故障预测方法。将传感器技术、信息传输技术和计算机信息处理技术结合,建立智能监控系统,并保证与货物调动系统的联动,通过数字化手段创造出装备和生产场景的虚拟模型,实现对仓

储环境智能调整,节省资源损耗,同时保证控制界面的人性化,保证高效的人机交互。

3.1.3 节能减排绿色发展 食品仓库节能减排符合社会发展与环境需求,减少不当作业造成的环境与能源威胁,提高食品工业生产效益,促进现代化食品工业的发展。通过科学规划、合理设计,提高土地利用效率,增强节能、节水、节材意识,重视环境保护。采用新能源、节能环保技术和高效节能的仓储设备,例如利用太阳能供电技术代替传统用电模式,降低能耗,减少温室气体排放;同时做好防尘和减少噪音污染等工作。部署先进的能源管理系统,实时监测仓库内的能源使用情况,通过数据分析识别能耗高峰和低效环节,为制定节能减排措施提供依据。同时,对可能产生的污染物排放(例如废水、废气)进行定期检测,确保符合国家环保标准。

3.2 智能包装技术核心问题

3.2.1 提升材料基底稳定支撑 包装材料的稳定性限制智能包装使用寿命,影响智能包装对食品质量信息的有效反馈。智能包装的稳定性包括响应性颜料稳定性、智能标签与基底交联稳定性2个方面。食品工业环境的复杂性使得食品仓储环境出现高温、高湿的问题。天然响应材料的热稳定性较差,容易受到环境的影响。指示标签的基底在高湿环境下容易出现基底与染料分离的问题,进而影响膜的颜色响应效率。

3.2.2 确保食品信息准确反馈 食品新鲜度和位置信息是智能包装的重要属性,食品实际状态和智能包装指示结果之间存在差异会造成严重的食品安全问题。例如,响应性材料有其独特的显色范围、响应性气氛,指示型包装指示剂的选择是影响准确度的关键因素。因此,要考虑每种食品的腐败特性,开发特异性响应性材料以满足应用需求。而传感器智能包装在食品新鲜度和位置信息检测时,需要一定时间做信息处理和数据分析。食品检测系统必须保证信息处理速度。另外,在建模时受样本数量的影响,智能包装的准确度与实际情况之间可能存在差异,导致在食品信息检测时出现假阳性和假阴性结果,影响实际判断。

3.2.3 加强智能包装安全应用 随着人们对环境保护和食品安全的关注日益提高,智能包装领域

对使用生物相容性和生态友好的天然色素和生物聚合物的需求越来越大。许多研究评估了天然植物提取物在智能包装系统中的潜力,以用于不同易腐食品的质量监测^[62-63]。安全问题是智能包装领域尚未在食品市场广泛应用的一项重要原因。这些智能包装在发挥自身功能的同时,包装内部的功能因子会迁移到食品表面,进而影响食品的风味和品质;残留在食品接触材料中的污染物可能会转移到食品中,并最终被消费者摄入^[64]。人们对这些材料的安全问题极为关注,智能包装技术正面临着监管挑战和安全风险。应提高智能包装的安全性,防止其在实际应用时因降解而产毒。

3.3 高端装备核心问题

3.3.1 高端器件创新突破 目前,大部分中、低端零部件已实现国产化,可以满足我国食品工业发展的使用需求,而高性能 PLC、伺服电机、控制单元、气动元器件、密封件、电磁阀、高速轴承、驱动器等高性能装备和高速生产线的高端关键零部件的性能仍难以达到要求。中、高端用户对国产食品装备的电器元件和关键配套设备存在定制国外产品品牌的情况,部分高端精密仪器和专用传感器也依赖进口。这挤压了国内高端器件的市场空间,限制了国产优质电器原件和关键配套器件的发展。研发创新需要从基础零部件、元器件、基础材料和基础工艺入手,实现装备制造向创新研发方向转型,做好基础产业向高级化工作,逐步缩小与发达国家之间的差距。

3.3.2 高端专用装备创制 高精尖产品的性能及核心技术与欧美发达国家的食品机械相比存在差距,在高端装备领域的国际贸易中仍处于劣势,缺少核心竞争力和品牌影响力。改进措施是推动大数据、物联网、5G、区块链、AI 等技术在食品仓储领域的应用。通过技术集成优先在饮料、罐头、乳品、方便食品和酒类等食品加工领域建立自动化包装生产线和智能化立体仓库,推动仓储物流“上云用数赋智”。开发食品智能仓储管理信息系统,提高仓库利用效率。重点研发专用 AGV 小车、高位叉车、高速装箱机、超大龙门式高速码垛机、立体缠绕收缩包装机和智能化装卸车系统及专用设备和车载式智能温控、自主控温式智能立体库、蓄冷周转箱、末端冷链无人配送装备等关键技术。

3.3.3 高端装备的数智化、绿色化 食品工业属于高能耗、高污染和高耗水产业,其仓储、包装环节同样面临材料消耗巨大,回收利用效率低下,以及环境污染严重等挑战。为应对这些紧迫问题,必须依托高端装备的创新与发展。因此需要从设计制造、使用过程、设备回收利用等角度出发,通过深入绿色化技术路径革新,积极构建食品仓储、包装机械绿色制造体系,实现高端装备的数智化、绿色化发展。

4 我国食品仓储、包装技术与装备的发展趋势

4.1 战略引领提升行业竞争力

中国深入推进自贸协定签署与升级,积极加入《全面与进步跨太平洋伙伴关系协定》和《数字经济伙伴关系协定》,自贸协定伙伴不断增多,为食品仓储、包装制造业带来新机遇。出口规模持续扩大,倒逼食品仓储、包装技术与装备制造企业增强基础创新,加快技术提升,提高产品质量,加大出口力度。同时,企业需不断提升产品竞争力,应对国际市场的挑战。智能仓储、包装技术与高端装备研发符合国家的战略导向,有助于满足知识化、信息化、全球化和生态化多方面需求。

4.2 技术创新驱动行业快速发展

食品仓储、包装行业正快速进入数字化运行阶段。利用智能包装和高端装备提升仓储运行效率,通过云计算、大数据、物联网等技术手段实现食品包装、贮藏、运输过程全方位智能化。食品仓储、包装技术与装备智能制造的数字化设计和数字孪生系统得到重点研发,加速技术与高端装备创制。同时,坚持以智能化和数字化发展为主线,加快提升技术水平和装备质量,构建数智平台,推动产品向中高端迈进。

4.3 绿色发展成必然要求

顺应绿色生产、生活方式发展趋势和推进碳达峰、碳中和需要,食品仓储、包装技术与高端装备行业将绿色制造、双碳达标和节能减排作为发展趋势。制造企业建立健全绿色、低碳循环发展的设计制造和管理体系,研究生物及环保材料活性包装等技术,推动新技术新装备创新。同时,把绿色发展理念贯穿到食品仓储包装全领域,以数字

化转型整体驱动智能仓储运行管理和治理方式变革,提升行业绿色智慧发展水平。

4.4 食品先进制造业占据主导地位

物联网、云计算等技术的发展,加快了我国食品仓储、包装技术与装备产业向服务型制造业的转型升级。相关企业应深层次挖掘客户需求,以技术服务为中心,将产品价值拓展至高层次和知识服务,实现产品本体、产品与服务融合的增值,摆脱单一技术服务,向全面智能服务转型,使信息交互与集成协作成为新趋势,最终走向全球网络服务型制造装备企业。

4.5 跨界融合提升产业链稳定性和竞争力

当今世界正经历百年未有之大变局,国际环境日趋复杂,加剧了全球产业链、供应链的本地化、区域化和数字化。未来中国食品仓储、包装技术和装备行业,仍需加强产业链、供应链的稳定性和可靠性,通过跨界融合,推动产业链、供应链的各类企业链条式改造,以龙头企业带动中小企业朝着规模化、集群化、专业化、智能化、高端化方向发展。围绕食品产业链上、中、下游的关键核心技术和产品开展链式突破,构建全生命周期链式创新,整合新资源,提升产业链、供应链稳定性和竞争力。

5 结语

未来食品产业将是食品技术、生物技术和信息技术的高度融合,以食品感知和智能制造为核心的未来食品制造,将保障新生产、新生活方式的美好需求。在物联网、大数据、云计算、人工智能等新兴技术及数智化高端装备的协同推动下,智能仓储、包装技术及装备为食品贮藏加工过程高质量发展打开新局面,可实现生产、包装、贮藏和销售全产业链条的监控和信息溯源。由于国内行业发展仍处于起步阶段,因此存在企业数量多而不强,技术应用广而不深,装备研发多而不精的问题,因此严重制约了行业的创新驱动和高质量发展,而且这种竞争和挑战会持续存在。在新形势下,中国食品工业应以“智能、高端、绿色”为主攻方向,食品智能仓储、包装技术及装备寻求技术突破与创新,进而推进我国食品工业可持续健康发展。

参 考 文 献

- [1] YANG M Y, CHEN L, WANG J J, et al. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(1): 55–80.
- [2] XIA L L, CAO L, YANG Y, et al. Integrated biochar solutions can achieve carbon-neutral staple crop production[J]. *Nature Food*, 2023, 4(3): 236–246.
- [3] WANG L X, TEPLITSKI M. Microbiological food safety considerations in shelf-life extension of fresh fruits and vegetables[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2023, 80: 102895.
- [4] NAMI M, TAHERI M, SIDDIQUI J, et al. Recent progress in intelligent packaging for seafood and meat quality monitoring[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2024, 9(12): 2301347.
- [5] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[N]. *人民日报*, 2021-03-13(001).
Outline of the 14th Five-Year Plan (2021–2025) for National Economic and Social Development and Vision 2035 of the People’s Republic of China[N]. *The People’s Daily*, 2021-03-13(001).
- [6] HASSOUN A, JAGTAP S, TROLLMAN H, et al. From Food Industry 4.0 to Food Industry 5.0: Identifying technological enablers and potential future applications in the food sector [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024, 23(6): e370040.
- [7] 中国包装联合会. 中国包装行业年度运行报告(2023年度)[R/OL]. (2024-02-01)[2025-01-21]. <https://www.cpf.org.cn/product/327.html>.
China Packaging Federation. *China Packaging Industry Annual Operation Report (Year 2023)* [R/OL]. (2024-02-01)[2025-01-21]. <https://www.cpf.org.cn/product/327.html>.
- [8] 物联云仓数字研究院. 2023年12月中国通用仓储市场动态报告[R/OL]. (2024-01-13)[2025-01-21]. <https://m.50yc.com/datareport/180>.
Yuncang Digital Research Institute of Iot. December 2023 China general storage market dynamics report [R/OL]. (2024-01-13)[2025-01-21]. <https://m.50yc.com/datareport/180>.

- com/datareport/180.
- [9] 中华人民共和国海关总署. 海关统计数据在线查询平台[DB/OL]. <http://stats.customs.gov.cn>. General Administration of Customs of the People's Republic of China. Customs statistics[DB/OL]. <http://stats.customs.gov.cn>.
- [10] JIANG J J, WANG H W, MU X W, et al. Logistics industry monitoring system based on wireless sensor network platform[J]. *Computer Communications*, 2020, 155(3): 58–65.
- [11] SIMIC V, DABIC-MILETIC S, TIRKOLAE E B, et al. Neutrosophic LOPCOW-ARAS model for prioritizing industry 4.0-based material handling technologies in smart and sustainable warehouse management systems[J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 143: 110400.
- [12] AHMADI-JAVID A, MANSOURFAR M, LEE C G, et al. Optimal distribution of perishable foods with storage temperature control and quality requirements: An integrated vehicle routing problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 182(1): 109215.
- [13] LIU H W, ZHOU L, ZHAO J H, et al. Deep-learning-based accurate identification of warehouse goods for robot picking operations[J]. *Sustainability*, 2022, 14(13): 7781.
- [14] TONG Q F, MING X G, ZHANG X Y. Construction of sustainable digital factory for automated warehouse based on integration of ERP and WMS[J]. *Sustainability*, 2023, 15(2): 1022.
- [15] HU X L, CHUANG Y F. E-commerce warehouse layout optimization: Systematic layout planning using a genetic algorithm[J]. *Electronic Commerce Research*, 2023, 23(1): 97–114.
- [16] LIU D B, ZHAO X F, WANG Y Y. Items assignment optimization for complex automated picking systems[J]. *Cluster Computing—the Journal of Networks Software Tools and Applications*, 2019, 22: S5787–S5797.
- [17] CHEN Y, JIN Q X, FANG H, et al. Analytic network process: Academic insights and perspectives analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235(16): 1276–1294.
- [18] XU C R, ZHAO M, LI H J. Data-driven simulation methodology for exploring optimal storage location assignment scheme in warehouses[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 198(23): 110627.
- [19] 陈月. 紧致型智能仓储系统运作绩效研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
CHEN Y. Operational performance study of compact intelligent storage systems[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019.
- [20] XU J, CHEN Y. A stochastic analysis of the dynamic space utilization in warehouses[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2025, 138: 115782.
- [21] ZHANG J, ZHANG Y, ZHANG X. The study of joint order batching and picker routing problem with food and nonfood category constraint in online-to-offline grocery store[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2021, 28(5): 2440–2463.
- [22] ZHANG B Q, GAO T Z, CHEN Y B, et al. Research on unmanned transfer vehicle path planning for raw grain warehousing[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2023, 45(4): 6513–6533.
- [23] MARCHI B, ZANONI S. Cold chain energy analysis for sustainable food and beverage supply[J]. *Sustainability*, 2022, 14(18): 11137.
- [24] VANDERROOST M, RAGAERT P, VERWAEREN J, et al. The digitization of a food package's life cycle: Existing and emerging computer systems in the logistics and post-logistics phase[J]. *Computers in Industry*, 2017, 87(2): 15–30.
- [25] JI C, LUAN T T, TANG Z J, et al. MPC-based intelligent car for tobacco warehouse inspection: Proceedings of the 40th Chinese Control Conference (CCC), Jul 26–28, 2021[C]. Beijing: Chinese Control Conference, 2021.
- [26] WICHMANN J. Indoor positioning systems in hospitals: A scoping review[J]. *Digital Health*, 2022, 8: 20552076221081696.
- [27] HU B, GUO H, TAO X J, et al. Construction of digital twin system for cold chain logistics stereo warehouse[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 73850–73862.
- [28] 傅浩. J企业的冷链溯源系统优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
FU H. Research on optimization of cold chain traceability system of J company[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [29] WANG Y X, LIU K, ZHANG M, et al. Sustainable polysaccharide-based materials for intelligent packaging[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 313(1): 120851.

- [30] ZENG Q Y, WANG Y F, JAVEED A, et al. Preparation and properties of polyvinyl alcohol/chitosan-based hydrogel with dual pH/NH₃ sensor for naked-eye monitoring of seafood freshness[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 263(8): 130440.
- [31] HUANG R H, XIA S X, GONG S K, et al. Enhancing sensitivity and stability of natural pigments in pH-responsive freshness indicators: A review[J]. *Food Chemistry*, 2025, 463: 141357.
- [32] KANG S L, WANG H L, XIA L, et al. Colorimetric film based on polyvinyl alcohol/okra mucilage polysaccharide incorporated with rose anthocyanins for shrimp freshness monitoring [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 229: 115402.
- [33] LIU Y, LI L, YU Z M, et al. Principle, development and application of time-temperature indicators for packaging[J]. *Packaging Technology and Science*, 2023, 36(10): 833-853.
- [34] YE B B, CHEN J, YE H W, et al. Development of a time-temperature indicator based on Maillard reaction for visually monitoring the freshness of mackerel[J]. *Food Chemistry*, 2022, 373: 131448.
- [35] KALPANA S, PRIYADARSHINI S R, LEENA M M, et al. Intelligent packaging: Trends and applications in food systems[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 93(4): 145-157.
- [36] JARUPATNADECH T, CHALITANGKOON J, MONVISADE P. Colorimetric oxygen indicator films based on β -cyclodextrin grafted chitosan/montmorillonite with redox system for intelligent food packaging[J]. *Packaging Technology and Science*, 2022, 35(6): 515-525.
- [37] LI H A, WEI J, JIN M L, et al. Colorimetric analysis through electrospun WO₃/PAN membrane for indication of oxygen in food packaging using a smartphone[J]. *Composites Communications*, 2022, 35(2): 101321.
- [38] HUANG S T, LI H J, WANG Y X, et al. Monitoring of oxygen using colorimetric indicator based on graphene/TiO₂ composite with first-order kinetics of methylene blue for modified atmosphere packaging [J]. *Packaging Technology and Science*, 2018, 31(9): 575-584.
- [39] NAMI M, TAHERI M, DEEN I A, et al. Nanomaterials in chemiresistive and potentiometric gas sensors for intelligent food packaging[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 174: 117664.
- [40] ZHAO L Y, ZHOU L Z, DANSOU D M, et al. Development of an electrochemical sensor modified with gold nanoparticles for detecting fumonisin B₁ in packaged foods[J]. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2024, 14(40): 29254-29259.
- [41] ZHANG D Z, YU S J, WANG X W, et al. UV illumination-enhanced ultrasensitive ammonia gas sensor based on (001) TiO₂ MXene heterostructure for food spoilage detection[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127160.
- [42] WANG G N, HUANG S Y, HE H, et al. Fabrication of a "progress bar" colorimetric strip sensor array by dye-mixing method as a potential food freshness indicator[J]. *Food Chemistry*, 2022, 373: 131434.
- [43] HUANG X W, ZOU X B, SHI J Y, et al. Colorimetric sensor arrays based on chemo-responsive dyes for food odor visualization[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 81: 90-107.
- [44] CHEN Y, FU G Q, ZILBERMAN Y, et al. Low cost smart phone diagnostics for food using paper-based colorimetric sensor arrays[J]. *Food Control*, 2017, 82: 227-232.
- [45] MASSON J F. Portable and field-deployed surface plasmon resonance and plasmonic sensors[J]. *Analyst*, 2020, 145(11): 3776-3800.
- [46] ZHU X N, KIM T Y, KIM S M, et al. Recent advances in biosensor development for the detection of viral particles in foods: A comprehensive review [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(43): 15942-15953.
- [47] 丛昊洁. 基于二氧化锰纳米片介导的次黄嘌呤生物传感器在水产品鲜度评价中的应用[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
- CONG H J. Application of manganese dioxide nanosheets mediated hypoxanthine biosensor for aquatic products' freshness evakyation[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2023.
- [48] ZHANG X L, SHI Y H, WU D, et al. A bifunctional core-shell gold@Prussian blue nanozyme enabling dual-readout microfluidic immunoassay of food allergic protein[J]. *Food Chemistry*, 2024, 434: 137455.

- [49] SHAO P, LIU L M, YU J H, et al. An overview of intelligent freshness indicator packaging for food quality and safety monitoring[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 285–296.
- [50] ZHANG Y J, WANG W S, YAN L, et al. Development and evaluation of an intelligent traceability system for waterless live fish transportation[J]. Food Control, 2019, 95: 283–297.
- [51] CHUNG H W, VU H, KIM Y, et al. Subcutaneous temperature monitoring through ear tag for heat stress detection in dairy cows[J]. Biosystems Engineering, 2023, 235(3): 202–214.
- [52] XU H, YIN X Z, ZHU F, et al. RF–Ray: Sensing objects in the package via RFID systems[J]. Ieee Systems Journal, 2023, 17(1): 558–568.
- [53] CHEN T B, DING K F, HAO S K, et al. Batch–based traceability for pork: A mobile solution with 2D barcode technology[J]. Food Control, 2020, 107: 106770.
- [54] QIAN J P, XING B, ZHANG B H, et al. Optimizing QR code readability for curved agro–food packages using response surface methodology to improve mobile phone–based traceability[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 28: 100638.
- [55] WIPO. PATENTSCOPE Simple Search[DB/OL]. <https://patentscope2.wipo.int/search/en/search.jsf>.
- [56] LIU Y H, WANG X L. Single–temperature type intelligent temperature control device with automatic regulation and control function: CN210345649 [P]. (2020–04–17)[2024–10–15].
- [57] WANG F J, MAN A L. Portable food cold storage box: CN113686068[P]. (2021–11–23)[2024–10–15].
- [58] MO Y J, SUN Z C, YU C. EventTube: An artificial intelligent edge computing based event aware system to collaborate with individual devices in logistics systems[J]. Ieee Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(2): 1823–1832.
- [59] 肖招银, 牛胜良, 朱正中, 等. 一种多层高压电极托板保鲜柜: CN118542425A[P]. (2024–08–27)[2024–10–20].
- XIAO Z Y, NIU S L, ZHU Z Z, et al. Multi–layer high voltage electrode tray fresh–keeping cabinet: CN118542425A[P]. (2024–08–27)[2024–10–20].
- [60] 晏松梅, 朱胜兵. 一种食品冷藏保鲜用双温冷库: CN219494516U[P]. (2023–03–03)[2024–10–20].
- YAN S M, ZHU S B. Double temperature cold storage for food refrigeration and preservation: CN219494516U[P]. (2023–03–03)[2024–10–20].
- [61] 国家知识产权局. 2023 年中国专利调查报告[R]. (2024–04–15)[2025–01–13] https://www.cnipa.gov.cn/art/2024/4/15/art_88_191587.html.
- China National Intellectual Property Administration. China Patent Survey Report 2023[R]. (2024–04–15)[2025–01–13] https://www.cnipa.gov.cn/art/2024/4/15/art_88_191587.html.
- [62] HUANG X H, LI J M, HE J J, et al. Preparation of curcumin–loaded chitosan/polyvinyl alcohol intelligent active films for food packaging and freshness monitoring [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 276: 133807.
- [63] WANG C W, LIU C. A pH–sensitive intelligent packaging film harnessing anthocyanin for food freshness monitoring[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(12): 5312–5323.
- [64] ZHAO C C, LIN Q B, XIE C H, et al. Screening and safety assessment of migrating substances released from biodegradable packaging materials into milk[J]. Food Control, 2024, 166: 110755.

Advance of Food Intelligent Storage and Packaging Technology and High–end Equipment

GUO Zhiming^{1,2}, ZHANG Pengmin¹, LI Zhaofeng³, XU Bin¹, SHI Jiyong¹, ZOU Xiaobo^{1,2*}, CHEN Jian^{3*}

¹School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu

²China Light Industry Key Laboratory of Food Intelligent Detection & Processing, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu

³Science Center for Future Foods, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu

Abstract In the context of the globalization of food manufacturing and supply, establishing and practicing the big food concept, constructing diversified food supply and efficient comprehensive utilization system is the basic guarantee of stable

and safe food supplying. Storage and packaging technology and equipment play an important role in improving food quality and efficiency. Emerging technologies such as intelligent perception, wireless positioning and remote control promote the upgrading of food storage, artificial intelligence, nanomaterials and biotechnology promote the intelligent green of food packaging, and support the high-quality development of food manufacturing combined with high-end equipment of food storage and packaging intelligence. This paper analyzes the development trend of food storage and packaging technology and equipment industry, summarizes the research progress of key technologies and equipment of intelligent storage and packaging, highlights the core issues of the development of intelligent storage, intelligent packaging and high-end equipment, and finally expounds the development trend of key technologies and equipment of storage and packaging. Guided by the national strategic planning, with high-end equipment for food storage and packaging as the engine, with technological innovation, green development and cross-border integration to form new quality productivity to drive the high-quality development of food manufacturing.

Keywords food storage; intelligent packaging; high-end equipment; intelligent manufacturing