

doi:10.12301/spxb202400331

文章编号:2095-6002(2024)03-0001-10

引用格式:左敏,王菲,宋绍义,等. “智慧+食品监管”:发展历程、应用现状与未来方向[J]. 食品科学技术学报,2024,42(3): 1-10.



ZUO Min, WANG Fei, SONG Shaoyi, et al. “Intelligence + food regulation”: development process, current application status, and future direction[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024,42(3):1-10.

“智慧+食品监管”:发展历程、应用现状与未来方向

左敏^{1,2}, 王菲^{1,3}, 宋绍义^{1,4,*}, 颜文婧^{1,4}, 戴欣然^{1,4}

(1. 北京工商大学农产品质量安全追溯技术及应用国家工程研究中心, 北京 100048;

2. 北京物资学院, 北京 101149; 3. 北京工商大学食品与健康学院, 北京 100048;

4. 北京工商大学计算机与人工智能学院, 北京 100048)

摘要:大食物观为食品产业的未来发展提出了新的需求。随着食品产业的扩大和升级,影响食品安全的因素将变得越来越复杂,因而带来更为艰巨的食品安全风险防控任务。只有保障业态安全,食品产业才能健康和顺利发展。当前,有限的监管资源和力量与食品产业中繁重复杂的监管任务之间的矛盾日益凸显,传统的监管手段和方式难以满足食品产业的高质量发展需求。数据驱动下的计算机科学和智能技术为食品监管提供了技术切入点。在食品产业链中,实时采集各种信息形成“数据智能”,发展食品行业的智慧监管技术,有助于建设规范有序、协同高效的食品产业生态环境,为食品行业高质量发展提供保障。介绍了食品产业中智慧监管从初始到繁荣的发展历程,分析了智能技术在食品全产业链和食品监管体系数字化建设中的应用,指出了以安全为底线,以品质监测、营养分析、风味评估为新导向的食品智慧监管未来发展方向,探讨了食品行业智慧监管面临的机遇和挑战,希望为食品监管的智能化和高质量发展提供技术参考。

关键词:人工智能;食品监管;安全保障;风险防范;大食物观

中图分类号: TS20; TP18

文献标志码: A

大食物观以顺应人民群众对美好生活的向往,满足人们多元化的消费需求为导向,对食品产业的未来发展提出了新的要求,拓展和延伸了传统食品安全观。以营养、健康、绿色、创新为特征的食品产业未来发展,需要通过技术创新、生产要素优化配置、产业深度转型升级来推进。这个过程必然引起生产者、生产资料和生产方式的重构,继而为食品监管带来新的需求和挑战。信息技术,尤其是大数据、人工智能等技术的进步,在各行各业都引发了产业创新,智慧监管也应运而生。在食品行业,借助大数据、云计算、人工智能等技术构建的数字化监管服务

平台和系统,对食品产业链进行全程化、精准化、智能化监管,已经在食品安全治理中取得了明显成效。2022年,国务院《关于加强数字政府建设的指导意见》^[1]中进一步强调了大力推行智慧监管,提升市场监管能力的重要性。国家卫生健康委员会发布的《食品安全标准与监测评估“十四五”规划》^[2]中也对食品安全标准、风险监测评估工作提出了新任务、新要求,包括要发挥数字技术引领现代化治理优势,统筹推进食品安全标准与监测评估、营养健康管理等行业监管方面的信息化建设等。面向食品监管中的新需求、新场景、新模式,以“数智”赋能食品行业

收稿日期:2024-04-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2100605)。

Foundation: National Key Research and Development Program of China (2021YFD2100605)。

第一作者:左敏,男,教授,博士,主要从事食品安全管理、监管科学、智能科学方面的研究。

*通信作者:宋绍义,男,副教授,博士,主要从事食品安全管理、监管科学、数字商务方面的研究。

治理,是食品行业创新升级的重要保障。本研究拟聚焦食品行业中的智慧监管现状,梳理和分析智慧监管技术前沿发展方向,为促进智能技术在食品行业中更深入、更广泛应用提供系统的技术参考。

1 “智慧 + 食品监管”的发展历程

智能技术的发展经历了推理、知识工程和数据挖掘阶段,现已迈入智能 4.0——通用智能阶段。通用智能技术能广泛处理各行各业中的复杂任务,也在食品监管中得到了应用和发展。食品智慧监管技术经历了初始、发展和繁荣三个阶段,其发展历程见图 1。智慧监管在食品行业应用的初始阶段,主要侧重于食品检测,如在高质量、大规模的食源性致病菌数据集构建基础上,基于深度卷积神经网络的模型实现面向 6 种常见的食源性致病菌的识别^[3]。该方法可辅助或替代传统检测方法中的人工显微镜检查,突破严重依赖人工判断的传统食源性致病菌检测方法,大大降低检验人力成本和人为误差,为大量检测提供快速、准确、强大的判别结果。在发展阶段,智能技术随大数据和遥感技术扩展至整个食品生产链,人工智能辅助的射频识别(radio frequency identification, RFID)多传感技术可以用于实现可信

食品追溯,提高食品行业的安全管理和质量控制水平^[4]。例如:使用 RFID、物联网和传感器技术面向易腐食品构建的追溯系统,可以提供实时产品信息,减少产品损耗,提升客户的满意度^[5]。在繁荣阶段,随着深度学习、自然语言处理、计算机视觉等智能技术的发展,食品智慧监管从技术到架构,从食品品质监测到食品供应链监管都有了颠覆性的发展^[6],逐步从“事后”的品质安全监测和“事中”的供应链管理向“事前”预测及预警转型。例如:采用时序知识图谱可以预测食品风险水平及其关联有害物质的种类,实现对食品安全事故的预警^[7];采用混合神经网络 UnitFormer 结合电子鼻系统和高光谱系统鉴别花生产品的质量,准确率可以达到 99.06%,为食品市场的质量监督提供了有效的技术解决方案^[8]。目前,智慧监管领域正在食品产业数字化转型的基础上进行“数字大脑”的构建,以进一步促进产业升级。例如:优化食品生产线和供应链,估算食品制作过程中温室气体排放以支持绿色制造,助力“碳中和”和“碳达峰”;收集企业食品生产线和供应链所产生的信息,可以构建食品真实品质信息数据库,基于智能鉴别和评估,发展食品反掺假控制技术。



图 1 “智慧 + 食品监管”的发展历程

Fig. 1 Development process of “intelligence + food regulation”

2 食品行业智慧监管的应用现状

2.1 食品全产业链实时监管

我国政府非常重视“从农田到餐桌”全过程监管制度建设,并多次做出重要规划。实现面向食品产业链的全过程监管,需要在食品生产、加工、流通等各个供应链环节都进行数字化信息采集,并利用智能技术,如机器学习和图像识别等,提升食品供应链监管的效率和准确性,保障消费者“舌尖上的安全”。目前,食品供应链中智慧监管技术的应用情

况如图 2。

2.1.1 食品生产加工环节的监管

传统的食品生产过程往往存在原料检验不严格、加工流程难以精确控制等安全隐患,随着人工智能技术的引入,这些问题得到了有效改善。例如:使用多层人工神经网络(artificial neural network, ANN)开发模型,可以预测消除鸡肉中沙门氏菌的合适温度^[9];使用人工智能技术指导自动化食品加工生产线,可以改进液体食品的微生物检测和质量评估^[10];基于高光谱成像使用智能图像分割技术,可以检测蓝莓在包装过程中的损伤情况^[11];将基于

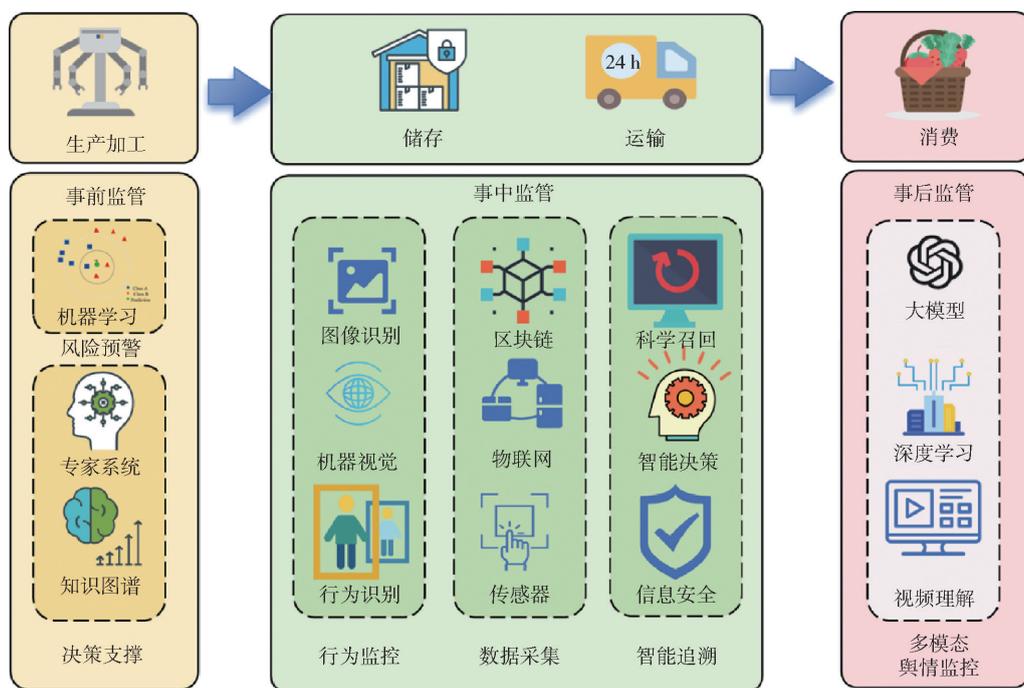


图2 人工智能技术在食品供应链各环节中的应用

Fig. 2 Applications of artificial intelligence in various links of food supply chain

光谱成像的智能传感器用于实时监测肉类食品加工流程,可以保证肉类食品加工过程的质量^[12];数字孪生技术为实现与食品加工生产过程中的传感器数据的实时耦合提供了可能性,可以进一步监测食品加工质量^[13]。

智能技术还可以用于监督食品生产加工过程、产业链损耗、供应链管理等方面。例如:使用基于图像处理 and 流变测量的模糊逻辑分析最少擀制步骤的比萨制作过程,可以减少比萨生产中人工参与过程和烤箱使用,提高加工效率并降低人力和生产资源的浪费^[14];应用实时数字化食品生产物联网的监测系统,可以有效减少加工过程中的原料损耗^[15];采用机器学习算法监测食品的化学物理变化,可以预测食品加工程度及其对健康的影响^[16]。

2.1.2 食品储存运输环节的监管

食品在储存和运输过程中常因温度、湿度控制不当和运输路径追踪困难而面临安全风险^[17]。近年来,智能技术给食品储存运输监管带来了革命性的变革。将人工智能技术应用于食品储运过程中的环境控制和监测,运输途中的潜在风险预测,运输路径的实时优化,可以减少食品在运输过程中的损耗和污染风险,保障食品安全^[18-19]。例如:集成了物联网、互联网,以及深度学习技术构建的 Nemesys 模型,优化了食品贮存的冷藏系统,可以将冷藏温

度控制在食品安全限制范围内^[20];用于预测温度的机器学习模型可以实现冷链断裂的发生率、温度变化趋势等预测,应用于冷链断裂的预警与防控^[21];通过对生鲜食品运输过程中的物联网传感器数据、食品保鲜度、食品保障状态、运输环境和突发事件进行信息采集,并使用支持向量机开发模型,可以对生鲜食品运输过程中的风险进行预测和评估^[22]。

2.1.3 食品消费环节的监管

当前,食品产业的快速增长和消费需求的多样化以及销售形式的多元化给食品消费端带来了一些新问题,尤其是电商直播和网络销售的普及,产生以次充好、虚假宣传等安全隐患,给食品监管带来了新的挑战^[23]。针对食品消费监管环节出现的问题,自然语言处理、图像处理、视频理解等人工智能技术已经被应用于食品消费的监管环节。例如:在食品消费端舆情数据 IfoodCloud 数据库的基础上,运用神经网络技术识别食品安全相关舆论中的公众情绪^[24];面向具有主题复杂性、随机性、弱连续性的食品安全视频数据集,融合语义和图像特征构建深度学习模型,实现面向食品安全主题视频的自动切割^[25];针对不平衡食品安全谣言的文本数据,构建多个评估分类器,实现准确的谣言分类等^[26]。人工智能技术可以为食品产业消费端的智慧监管提供有

效的技术手段。

2.2 食品监管体系数字化建设

我国食品监管体系的数字化建设起步较早,2013年,国家食品安全抽样检验信息系统(简称国抽系统)正式上线运行,服务超过全国3200家食安监管部门和1800家检测机构,提供信息采集、抽检、智能分析等功能。仅2023年,该系统就完成了738万余次国家、省、市和县四级的食品抽样检验工作,实现了5.29批次/千人的食品抽样检验。近年来,随着公众对食品安全要求的提高,进一步利用智能技术优化监管流程、整合资源、减少信息传递环节、加速信息流通,有助于重塑食品监管结构,提升监管效率。如今,食品安全抽样检验工作数字化建设所产生的监管能效已经逐渐显露。通过大数据、云计算和人工智能等手段加强食品产业链的全程监管,实时分析预警风险,为决策提供科学依据,实现监管的精准化、智能化和自动化,构建智慧的社会治理和公平的执法体系,促进食品产业健康发展,保护消费者权益和健康,已成为数字政府治理现代化的重要部分。

2.2.1 食品信息化溯源体系

2015年以来,国务院发布了《关于加快推进重要产品追溯体系建设的意见》^[27]、《关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》^[28]等重要文件。商务部、原国家食品药品监督管理总局、原国家质量监督检验检疫总局、原国家出入境检验检疫局等单位和各地方政府都针对食品追溯体系建设,开展了大量工作。近年来,食品信息化溯源逐渐成为国家对食品行业进行监管的重要途径,并且在智能技术的推动下取得了显著发展。在使用区块链、物联网等技术对食品溯源信息进行采集的基础上,机器学习、图像识别、自然语言处理等模型可以形成“数据智能”,应用于食品安全风险识别、食品安全风险预警,以及供应链管理优化^[29]。例如:通过采用自适应动态分区采样方法收集来自传感器的数据,并构建污染源追踪和回溯算法,可以对市场上潜在受污染食品进行有效召回^[30];结合层次分析法和深度径向基函数神经网络构建的食品安全预警模型,应用于中国某省食品灭菌奶的检测数据实现了风险预测^[31];采用物联网技术(QR码、RFID、条形码阅读器等)设计的食品追溯系统“AgroTRACE”,可以实现水果和蔬菜的全链条溯源,并且支持移动端查询产品信息^[32]。

2.2.2 食品风险监测和预警体系

提升食品安全风险监测评估工作水平是“十四

五”时期主要任务之一。在新的时代背景下,基于初步建立的食品安全监管全过程信息追溯体系,进一步融合智能技术建设食品风险监测和预警体系,可以通过实现食品安全监管事前、事中、事后全覆盖,构建精准防控的科学监管模式,切实提升食品安全治理水平。目前,许多研究团队都已经通过构建智能模型预测食品的状态,实现了面向食品风险的监测和预警。例如:一种结合层次聚类 and 径向基函数神经网络技术建立的食品安全风险预警方法,能够预测肉类产品的变质风险^[33];在小麦重金属含量分级的基础上,应用时间序列预测模型可以实现对小麦重金属污染风险的预警^[34];通过应用传感器技术,监测水果和蔬菜的气体排放、湿度和温度,利用卷积神经网络构建智能模型识别果蔬类型,并预警食品变质^[35]。

智能技术还可以用于食源性疾病的监管,包括预测食源性疾病的发生风险,识别其潜在来源^[36],甚至,可以通过实时获取社交媒体数据追踪食源性疾病发展轨迹^[37]。例如:应用关联规则分析方法,基于食品供应链实时监测数据挖掘食品安全风险的预警规则,并应用于乳制品供应链,取得了很好的预警效果^[38];一种名为TabNet-GRA的食品安全风险预测方法,通过使用灰色关系分析(grey relation analysis, GRA)计算食品的综合风险值,并构建深度学习模型TabNet,对风险值进行预测,面向中国某省熟肉制品实现了安全风险预测^[39]。

2.2.3 食品监管决策体系

科学的决策体系是监督管理能够有效实施的重要保障,运用智能技术对海量数据中的隐藏规律进行挖掘,可以提高决策的科学性和有效性。因此,在食品监管中使用智能技术可以面向当今社会中日益复杂多变的应用场景强化决策,增加监管的服务能效。例如:使用全球快餐加盟店的食品安全报警事件数据集构建可转移关联规则模型,并基于传感器构建实时监控系统,为管理人员提供可靠的可视化信息,提高食品质量管理能力^[40];食品知识图谱的应用也已经在食品科学和工业界发挥作用,包括食品搜索、问答、个性化推荐以及分析和可视化^[41-42],使管理者更容易做出决策;基于大规模食品抽检数据建立的食品安全评估模型,可以帮助监管机构高效地规划监督检查和抽检监测工作^[43]。

2.2.4 与物联网结合的自动化监管体系

随着食品行业的快速发展,生产、运输和消费环

节的参与者及应用场景日益增多,全覆盖面的深度监管需要人力、物力等大量资源。近年来,国家大力发展和搭建数字化的监管服务平台和系统,引入物联网等智能自动化监管技术,旨在提高食品监管效率和服务质量。“十三五”规划期间,国家组织建设和完善了食品安全相关的多个电子信息系统,如食品生产许可、食品经营许可、食品安全抽样检验等系统,这些系统实现了业务流程、数据管理的电子化,并提供了统计分析功能。借助智能技术构建的平台,公众也能参与到食品监管中,形成上下监管互动、信息共享、资源共享的新型监管模式,推动了食品监管自动化的全面发展。在具体应用方面,原国家食品药品监督管理总局已于2014年开始推动部署各地餐饮业的“明厨亮灶”项目,通过物联网采集

厨房的实时监控视频并向网络公众展示。该项目进一步结合物体和行为的识别技术,实现后厨违规行为的自动检测,是食品行业自动化监管的典范。

3 “智慧+食品监管”发展的未来方向

随着社会经济的快速发展,人们对食物的选择不再仅仅满足于基本的生理需求。在“大食物观”方针的指导下,食品行业将更加重视创新技术、健康食品以及行业的绿色可持续发展。我国对于食品行业的安全监管也从数量安全、质量安全向营养、健康拓展。智慧监管技术未来将以支撑新质生产力为导向,以食品安全检查和风险监测为核心,进一步在食品的品质监控、营养分析和风味评价等新兴领域加强应用(图3)。

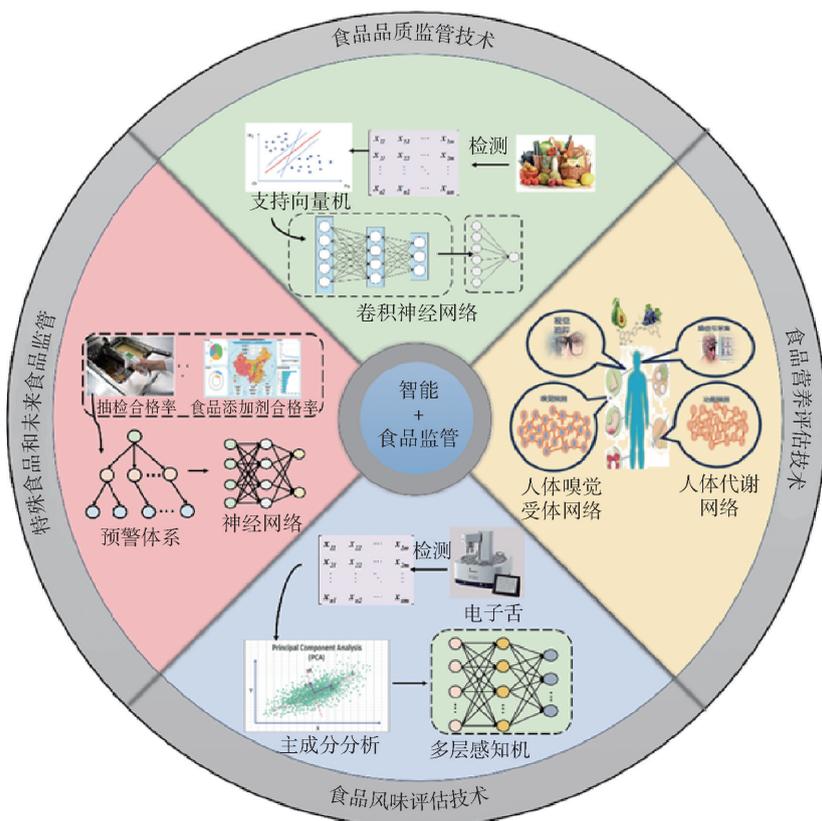


图3 “智慧+食品监管”的未来发展方向

Fig.3 Future direction of “intelligence + food regulation”

3.1 食品品质监管技术

随着深度神经网络技术的进步,智能模型在食品品质监管中的应用越来越广泛。例如:结合卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)和支持向量机构建混合系统,通过面包皮图像识别面包的烘焙阶段,辅助食品工业过程控制^[44];使

用YOLOv3模型分析鱼粉显微图像,准确识别掺假鱼粉^[45];融合频谱变换和CNN技术,准确识别猪肉掺假羊肉,并预测猪肉含量^[46];运用热成像相机获取蜂蜜红外图像,识别糖浆掺假情况^[47]。智能技术已经在食品品质监管中显示出了巨大的应用潜力。

3.2 食品营养评估技术

实施国民营养计划和合理膳食行动是《“十四五”国民健康规划》的关键任务^[48],面向食品的精准营养进行监管,需要对食品产品以及个人膳食进行精准营养评估。现代技术,如机器学习、移动技术和物联网已用于个性化营养评估。例如:利用智能手机收集个人膳食中的食品成分数据,使用专家系统结合神经网络与贝叶斯算法,可以为用户提供准确的膳食建议^[49];使用 Swin Transformer 模型分析食物图像,可以实现对食物中热量、质量,以及脂肪、碳水化合物和蛋白质等成分的无损检测^[50]。另外,基于食品追溯系统获取的全链条数据可以为食品营养评估方法的构建提供全新的整体视角。例如:将人工智能技术应用于果蔬干燥过程,通过减少能源使用,可解决干燥不均匀等问题,最大限度地减少营养成分流失^[51];面向全球粮食供应构建监测系统,比较各国之间粮食供给策略、监管制度、激励方法,及其在膳食营养、食品安全等衡量指标上的绩效,总结相关的经验教训,可以在实现全球范围的粮食可持续发展基础上推进健康饮食的发展^[52]。随着人工智能技术的不断发展,食品营养成分评估以及国民合理膳食监管领域将不断涌现出新技术,从而更好地推进国民健康饮食发展。

3.3 食品风味评估技术

食品的风味对于食品口感和品质至关重要,是食品开发和营销的核心内容。酒类和茶叶等风味特色突出的食品往往也是伪造产品的重灾区,成为食品监管重点关注的领域之一。在食品检测技术中,电子鼻和电子舌等设备可以采集食品风味信息,常被用于食品质量控制、饮料研发、药物评估等多个领域。例如:使用电子鼻可以识别不同产地新鲜烘焙咖啡豆的风味^[53],以及评价肉类、啤酒和果汁的风味品质^[54];电子舌被应用于评定葡萄酒或药物中的苦味^[55]、监测石榴酒的风味变化^[56]和评估蘑菇的鲜味^[57]。

近年来,智能仿生感知技术越来越多地被应用于食品风味识别和评估中。这些技术准确度高、响应快、易于使用且客观性强,为大规模食品风味评估提供了新的解决方案。例如:利用电子鼻收集数据,并结合主成分分析法和多层感知器神经网络构建模型,可以检测海产品的新鲜度^[58];采用电子鼻的数据和多种分析方法,能够实现食用油掺假的检测^[59];通过电子鼻采集咖啡香气数据,并运用人工

神经网络模型,能够预测咖啡的感官描述符^[60];使用神经网络模仿小鼠嗅觉受体系统的工作机制,基于对气味受体特异性的高精度仿生,可以识别中国白酒的香气^[61]。

3.4 应用于特殊食品和未来食品的前沿智慧监管技术

随着人民生活质量的提高,对特殊食品和未来食品的社会需求持续增长。特殊食品旨在满足特定人群的生理需要或病患的营养需要,是按特殊配方专门加工而成的食品。特殊食品需遵守比一般食品更严格的监管标准。未来食品则是依托现代创新科技生产和加工而成的食品(植物基食品、替代蛋白等)。然而,未来食品中的潜在危害和风险因素,及其在生产、加工和流通过程中的风险累积机制尚未完全明确。

特殊食品和未来食品的发展都与前沿创新技术紧密关联,传统的食品监管技术难以应对,而创新技术通常具有较高的数字化水平,能够为智慧监管技术提供内生性发展基础。目前已有针对个人 DNA 提供饮食建议的研究,如一些公司提供的“营养遗传服务”,通过测试用户的遗传信息提供适合用户的饮食建议。因为个体的差异,生产个性化的食品是未来食品的发展趋势之一。基于基因的饮食推荐可能涉及个人隐私,以及耗费大量的资源,现阶段难以普及并进行有效监管。依托于区块链技术,消费者、生产企业和监管方在同一链路信息共享,未来有望能够解决这一难题。

4 机遇与挑战

食品行业的发展关系到国计民生,在国家经济社会发展中占有举足轻重的地位,在“大食物观”方针的指导下,食品行业监管场景迅速增加,监管内容日益多元化,倒逼监管方式不断创新,对智慧监管的需求日益强烈。2022年,国务院印发《关于加强数字政府建设的指导意见》^[1],大力推行智慧监管,积极推动数字化治理模式创新。食品监管作为数字政府建设中的重要环节,其发展水平是衡量社会管理水平和国家法制建设的重要标准。“智慧+食品监管”是食品监管未来发展的必然趋势。此外,许多食品行业的龙头企业,已经初步完成了数字化建设。智能技术的快速发展又掀起了食品产业“数智”化转型的新一轮风潮,目前正是人工智能技术与食品

监管领域深度融合,大有可为的重要战略机遇期。

尽管食品监管与智能技术正在日益紧密结合,智能技术为食品监管提供了越来越多的创新监管方法,但食品监管仍面临重要的问题和挑战。首先,当下食品行业中的监管业务系统不互通,“信息孤岛”林立。我国各级政府都不同程度构建了与监管业务相关的信息系统,这些系统开发的时间不一,使用的技术不同,各地电子政务建设水平参差不齐,导致各部门数据不互联、不互通,造成了大量有效数据资源的浪费。由于尚未形成智慧监管建设统一的技术标准,加剧了“信息孤岛”的繁殖。其次,数据管理水平低,难以开放共享。现阶段我国数据管理的法律法规尚不完善,信息安全技术还有待进一步发展,监管部门之间没有形成“数据共治”机制,难以实现数据共享;食品行业的数据持有者出于商业竞争和信息安全的考虑,在开放数据上缺乏动力,限制了食品监管中“数据智能”的构建。最后,智能技术带来了新的伦理和安全问题。智能模型开发者可能在不易察觉的情况下嵌入不正当算法,而模型的“黑箱”属性,又导致所产生的问题难以被举证。另外,在构建智能模型时,海量的个人数据被采集、挖掘、利用,公民的隐私保护面临巨大挑战,人工智能所引发的隐私泄露风险也层出不穷,成为智慧监管发展的重要挑战。

在机遇与挑战并存的现状下,以数字化赋能食品安全治理,发展智慧监管,是落实食品安全战略、提高公共安全治理水平的重要途径。只有充分发挥智能技术的支撑和保障作用,创新食品安全治理,织密织牢食品监管全链条全覆盖的防护网络,才能保障我国食品产业链自主可控、食品科技高水平自立自强的发展,促进居民营养健康,创造更美好的“舌尖上的中国”。

参考文献:

[1] 国务院. 国务院关于加强数字政府建设的指导意见: 国发[2022]14号[EB/OL]. (2022-06-23) [2024-04-28]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-06/23/content_5697299.htm.

[2] 国家卫生健康委员会. 国家卫生健康委关于印发食品安全标准与监测评估“十四五”规划的通知: 国卫食品发[2022]28号[EB/OL]. (2022-08-11) [2024-04-28]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/23/content_5706481.htm.

[3] CHEN Q, BAO H, LI H, et al. Microscopic identification of foodborne bacterial pathogens based on deep learning method[J]. *Food Control*, 2024, 161: 110413.

[4] SONG C, WU Z. Artificial intelligence-assisted RFID tag-integrated multi-sensor for quality assessment and sensing[J]. *Sensors*, 2024, 24(6): 1813.

[5] ALFIAN G, SYAFRUDIN M, FAROOQ U, et al. Improving efficiency of RFID-based traceability system for perishable food by utilizing IoT sensors and machine learning model[J]. *Food Control*, 2020, 110: 107016.

[6] ZHONG J, SUN L, ZUO E, et al. An ensemble of AHP-EW and AE-RNN for food safety risk early warning[J]. *PLoS One*, 2023, 18(4): 0284144.

[7] SHI Y, ZHOU K, ZHOU M, et al. Temporal knowledge graph for food risk prediction[J]. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 2024, 5(5): 2217-2226.

[8] WANG Z, YANG Y, LIU J. Peanut origin traceability: a hybrid neural network combining an electronic nose system and a hyperspectral system[J]. *Food Chemistry*, 2024, 447: 138915.

[9] OSCAR T P. Neural network model for thermal inactivation of salmonella typhimurium to elimination in ground chicken: acquisition of data by whole sample enrichment, miniature most-probable-number method[J]. *Journal of Food Protection*, 2017, 80(1): 104-112.

[10] KYAW K S, ADEGOKE S C, AJANI C K, et al. Toward in-process technology-aided automation for enhanced microbial food safety and quality assurance in milk and beverages processing[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(6): 1715-1735.

[11] ZHANG M Y, JIANG Y, LI C Y, et al. Fully convolutional networks for blueberry bruising and calyx segmentation using hyperspectral transmittance imaging[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 192: 159-175.

[12] MCVEY C, ELLIOTT C T, CANNAVAN A, et al. Portable spectroscopy for high throughput food authenticity screening: advancements in technology and integration into digital traceability systems[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 777-790.

[13] SHRIVASTAVA C, BERRY T, CRONJE P, et al. Digital twins enable the quantification of the trade-offs in maintaining citrus quality and marketability in the refrigerated supply chain[J]. *Nature Food*, 2022, 3(6): 413.

[14] MAHADEVAPPA J, GROSS F, DELGADO A. Fuzzy logic based process control strategy for effective sheeting

- of wheat dough in small and medium-sized enterprises [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017,199: 93–99.
- [15] JAGTAP S, RAHIMIFARD S. The digitisation of food manufacturing to reduce waste-case study of a ready meal factory[J]. *Waste Management*, 2019,87: 387–397.
- [16] MENICHETTI G, RAVANDI B, MOZAFFARIAN D, et al. Machine learning prediction of the degree of food processing[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2312.
- [17] LIU N, BOUZEMBRAK Y, VAN DEN BULK L M, et al. Automated food safety early warning system in the dairy supply chain using machine learning[J]. *Food Control*, 2022,136: 108872.
- [18] BHUTTA M N M, AHMAD M. Secure identification traceability and real-time tracking of agricultural food supply during transportation using internet of things[J]. *IEEE Access*, 2021,9:65660–65675.
- [19] ZHAO Z, LI X, ZHOU X. Optimization of transportation routing problem for fresh food in time-varying road network: considering both food safety reliability and temperature control[J]. *PLoS ONE*, 2020,15(7):0235950.
- [20] ONOUFRIOU G, BICKERTON R, PEARSON S, et al. Nemesyst: a hybrid parallelism deep learning-based framework applied for internet of things enabled food retailing refrigeration systems[J]. *Computers in Industry*, 2019,113: 103133.
- [21] LOISEL J, DURET S, CORNUEJOLS A, et al. Cold chain break detection and analysis: can machine learning help? [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021,112: 391–399.
- [22] ZHANG G, LI G, PENG J. Risk assessment and monitoring of green logistics for fresh produce based on a support vector machine[J]. *Sustainability*, 2020,12(18): 7569.
- [23] 尹相荣, 洪岚, 王珍. 网络平台交易情境下的食品安全监管:基于协同监管和信息共享的新型模式[J]. *当代经济管理*, 2020,42(9): 46–52.
- YIN X R, HONG L, WANG Z. Food safety regulation in the context of transactions via online platforms: an innovative mode based on co-regulation and information sharing [J]. *Contemporary Economic Management*, 2020,42(9): 46–52.
- [24] ZHANG H, ZHANG D, WEI Z, et al. Analysis of public opinion on food safety in greater China with big data and machine learning [J]. *Current Research in Food Science*, 2023(6): 100468.
- [25] BI M, LI J, LIU X, et al. Action-aware network with upper and lower limit loss for weakly-supervised temporal action localization [J]. *Neural Processing Letters*, 2023,55(4): 4307–4324.
- [26] 何思宇, 汪颖懿, 左敏, 等. 基于动态选择技术的食品安全谣言不平衡数据集分类方法[J]. *计算机应用与软件*, 2022,39(11): 250–256.
- HE S Y, WANG H Y, ZUO M, et al. Classification method of food safety rumor imbalanced datasets based on dynamic selection [J]. *Computer Applications and Software*, 2022,39(11): 250–256.
- [27] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加快推进重要产品追溯体系建设的意见:国办发[2015]95号[EB/OL]. (2016-01-12)[2024-04-25]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2016-01/12/content_10584.htm.
- [28] 国务院. 国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见:国发[2015]40号[EB/OL]. (2015-07-04)[2024-04-25]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-07/04/content_10002.htm.
- [29] ZHANG Y Y, WANG Y Z. Machine learning applications for multi-source data of edible crops: a review of current trends and future prospects[J]. *Food Chemistry-X*, 2023, 19:100860.
- [30] ZHANG Q, HUANG T, ZHU Y, et al. A case study of sensor data collection and analysis in smart city: provenance in smart food supply chain [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013,9(11): 382132.
- [31] GENG Z, SHANG D, HAN Y, et al. Early warning modeling and analysis based on a deep radial basis function neural network integrating an analytic hierarchy process: a case study for food safety[J]. *Food Control*, 2019,96: 329–342.
- [32] TAGARAKIS A C, BENOS L, KATERIS D, et al. Bridging the gaps in traceability systems for fresh produce supply chains: overview and development of an integrated IoT-based system[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2021,11(16): 7596.
- [33] GENG Z, LIU F, SHANG D, et al. Early warning and control of food safety risk using an improved AHC-RBF neural network integrating AHP-EW [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021,292: 110239.
- [34] DONG W, HU T Y, ZHANG Q C, et al. Prediction of food safety risk level of wheat in China based on pyraformer neural network model for heavy metal contamination[J]. *Foods*, 2023,12(9):1843.

- [35] SONWANI E, BANSAL U, ALROOBAEA R, et al. An artificial intelligence approach toward food spoilage detection and analysis [J]. *Frontiers in Public Health*, 2022,9: 816226.
- [36] HARRISON L, MUKHERJEE S, HSU C, et al. Core genome MLST for source attribution of campylobacter coli [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021,12: 703890.
- [37] SADILEK A, KAUTZ H, DIPRETE L, et al. Deploying nEmesis: preventing foodborne illness by data mining social media [J]. *AI Magazine*, 2017,38(1): 37–48.
- [38] WANG J, YUE H. Food safety pre-warning system based on data mining for a sustainable food supply chain [J]. *Food Control*, 2017,73: 223–229.
- [39] CHEN Y, LI H, DOU H, et al. Prediction and visual analysis of food safety risk based on TabNet-GRA [J]. *Foods*, 2023,12(16): 12163113.
- [40] JACOBSEN H, TAN K H. Improving food safety through data pattern discovery in a sensor-based monitoring system [J]. *Production Planning & Control*, 2022, 33(16): 1548–1558.
- [41] MIN W, LIU C, XU L, et al. Applications of knowledge graphs for food science and industry [J]. *Patterns*, 2022,3(5): 100484.
- [42] CHEN Y, GUO Y, FAN Q, et al. Health-aware food recommendation based on knowledge graph and multi-task learning [J]. *Foods*, 2023,12(10): 12102079.
- [43] 曹静. 食品抽检中基于大数据分析的食品安全评估研究 [J]. *食品安全导刊*, 2023,12(10): 173–176.
- CAO J. Study on food safety evaluation based on big data analysis in food sampling inspection [J]. *China Food Safety Magazine*, 2023,12(10):173–176.
- [44] COTRIM W D S, FELIX L B, MINIM V P R, et al. Development of a hybrid system based on convolutional neural networks and support vector machines for recognition and tracking color changes in food during thermal processing [J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 240: 116679.
- [45] GENG J, LIU J, KONG X, et al. The fishmeal adulteration identification based on microscopic image and deep learning [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022,198: 106974.
- [46] ZHANG Y, ZHENG M, ZHU R, et al. Adulteration discrimination and analysis of fresh and frozen-thawed minced adulterated mutton using hyperspectral images combined with recurrence plot and convolutional neural network [J]. *Meat Science*, 2022,192: 120500.
- [47] IZQUIERDO M, LASTRA-MEJIAS M, GONZALEZ-FLORES E, et al. Convolutional decoding of thermographic images to locate and quantify honey adulterations [J]. *Talanta*, 2020,209: 120500.
- [48] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发“十四五”国民健康规划的通知:国办发[2022]11号[EB/OL]. (2022-05-20)[2024-04-28]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/20/content_5691424.htm.
- [49] SUNDARAVADIVEL P, KESAVAN K, KESAVAN O, et al. Smart-log: a deep-learning based automated nutrition monitoring system in the IoT [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2018, 64(3): 390–398.
- [50] SHAO W, HOU S, JIA W, et al. Rapid non-destructive analysis of food nutrient content using swin-nutrition [J]. *Foods*, 2022,11(21): 12113429.
- [51] CHEN J, ZHANG M, XU B, et al. Artificial intelligence assisted technologies for controlling the drying of fruits and vegetables using physical fields: a review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 105: 251–260.
- [52] FANZO J, HADDAD L, SCHNEIDER K R, et al. Viewpoint: rigorous monitoring is necessary to guide food system transformation in the countdown to the 2030 global goals [J]. *Food Policy*, 2021,107:102233.
- [53] LEE C, CHEN I, YANG H, et al. An AI-powered electronic nose system with fingerprint extraction for aroma recognition of coffee beans [J]. *Micromachines*, 2022, 13(8): 1313.
- [54] VIEJO C G, FUENTES S, GODBOLE A, et al. Development of a low-cost E-nose to assess aroma profiles: an artificial intelligence application to assess beer quality [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2020, 308: 127688.
- [55] HA D, SUN Q, SU K, et al. Recent achievements in electronic tongue and bioelectronic tongue as taste sensors [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2015, 207: 1136–1146.
- [56] LAN Y, WU J, WANG X, et al. Evaluation of antioxidant capacity and flavor profile change of pomegranate wine during fermentation and aging process [J]. *Food Chemistry*, 2017,232: 777–787.
- [57] PHAT C, MOON B, LEE C. Evaluation of umami taste in mushroom extracts by chemical analysis, sensory evaluation, and an electronic tongue system [J]. *Food Chemistry*, 2016,192: 1068–1077.
- [58] VAJDI M, VARIDI M J, VARIDI M, et al. Using electronic nose to recognize fish spoilage with an optimum

- classifier[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2019,13(2): 1205 – 1217.
- [59] KARAMI H, RASEKH M, MIRZAEI-GHALEH E. Application of the E-nose machine system to detect adulterations in mixed edible oils using chemometrics methods[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020,44(9): 14696.
- [60] MICHISHITA T, AKIYAMA M, HIRANO Y, et al. Gas chromatography / olfactometry and electronic nose analyses of retronasal aroma of espresso and correlation with sensory evaluation by an artificial neural network[J]. *Journal of Food Science*, 2010,75(9): s477 – s489.
- [61] LIU W, ZHENG Y, ZHANG C, et al. A biomimetic olfactory recognition system for the discrimination of Chinese liquor aromas [J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132841.

“Intelligence + Food Regulation” : Development Process, Application Status, and Future Direction

ZUO Min^{1,2}, WANG Fei^{1,3}, SONG Shaoyi^{1,4,*}, YAN Wenjing^{1,4}, DAI Xinran^{1,4}

(1. *National Engineering Research Centre for Agri-Product Quality Traceability,*

Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China;

3. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

4. School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The “all-encompassing approach to food” proposes new development demands for the future of the food industry. As the food industry expands and upgrades, unsafe factors and their evolutionary methods will become more complex, bringing more daunting tasks for safety risk prevention and control. Only by ensuring the safety of business forms can the food industry develop healthily and smoothly. Currently, the contradiction between limited regulatory resources and power and the increasingly heavy and complex regulatory tasks in the food industry is becoming more prominent. Traditional regulatory methods are insufficient to meet the high-quality development needs of the food industry. Data-driven computer science and intelligent technology provide technological entry points for food industry regulation. Collecting various information in real time within the food industry chain to form “data intelligence” and developing smart regulatory technology for the food industry help to build a standardized, orderly, and collaboratively efficient food industry ecological environment, providing support for high-quality development of the food industry. The development process of smart regulation in the food industry from its inception to prosperity was introduced, the application of intelligent technology in the digital construction of the whole food industry chain and food regulatory system was analyzed, the future development direction taking safety as bottom line, focused on quality monitoring, nutritional analysis, and flavor assessment was pointed out, and the opportunities and challenges faced by smart regulation in the food industry was discussed. This paper aimed to provide technical references for the intelligent and high-quality development of food industry regulation.

Keywords: artificial intelligence; food regulation, safety assurance; risk prevention; all-encompassing approach to food