

中国乳业科技创新热点

(¹ 中国食品科学技术学会 北京 100048

² 国家乳业技术创新中心 呼和浩特 010018)

摘要 乳业作为国计民生基石,不仅促进食物供给多元化、食品工业与农业的现代化,还可显著提升国民营养健康。我国乳业基于 70 余年的扎实积累,已在全球舞台崭露头角,实现从“借鉴”到“聚焦”的跨越。面对全球化挑战,我国乳业科技创新成为焦点。本文基于全球乳业发展新变化,梳理出包括乳品营养健康确证、奶牛定制化养殖、乳组分活性保持、高附加值配料开发、全产业链数智化管理等中国乳业科技 12 大创新热点,以期为我国乳业科技创新和行业发展提供参考。

关键词 中国乳业; 科技创新; 乳品发展; 营养健康

文章编号 1009-7848(2024)10-0495-07 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.10.045

乳业是关系国计民生的重要产业,在构建我国多元化食物供给体系,促进农业现代化,推动经济发展,提升国民营养健康水平等方面发挥着不可替代的作用。由于乳品具有较高的营养健康属性,因此成为科技创新与产品研究的热点领域。我国乳业经过几十年的扎实积累与不断探索,行业装备、加工技术和产品研发快速发展,并在全球乳业的地位日益凸显,已从昔日的“中国乳业借鉴世界”逐步迈向“世界乳业聚焦中国”的新发展阶段。

据国家统计局月报数据,2023 年我国规模以上乳制品产量 3 054.6 万 t,同比增长 3.1%,实现营业收入达 4 620 亿元,同比增长 2.6%。乳业作为农食循环系统中不可或缺的一环,同时也是循环经济体系中的重要组成部分,其发展轨迹深刻映射出人口结构变迁,气候变化的不确定性,环境保护的迫切需求以及经济全球化的复杂影响。在当今全球化的背景下,国际乳业正经历着前所未有的变革和发展,可持续发展与生物多样性理念的兴起,提质增效的倡导,乳品营养健康科学循证的深入,乳品安全管理理念的创新,大数据、人工智能及合成生物学技术的涌现,正在对全球乳业科技创新发展产生深远影响^[1]。为推动新阶段下我国乳业科技创新发展,中国食品科学技术学会与国家乳业技术创新中心邀请乳品相关领域专家,基于全球乳业发展新变化,从乳品营养健康确证、养殖与繁育、技术突破、品质提升、高效绿色制造等

方向梳理形成我国乳业科技创新十二大热点,多层次、多维度阐明我国乳业科技创新现状、存在的主要问题以及未来发展的重要方向。

1 乳品与健康循证体系支撑乳功能成分深入发掘与验证

大量临床试验证实,营养与健康食品能有效降低慢性疾病的发生风险,通过营养干预实现“治未病”已成为国际社会的共识。乳品是食品工业的重要组成部分,是多样化饮食结构的重要一环,对保障全生命周期健康具有重要意义。通过在不同特征人群中积极开展前瞻性、大样本队列研究及高水平临床试验研究,可为乳品与健康的关联提供坚实的宏观循证依据。同时,分子流行病学以及类器官、器官芯片、单细胞测序等前沿技术的运用,可以在微观层面赋能乳品健康作用机制的探索^[2-3]。例如,通过构建肠上皮类器官全息观测特定乳成分在仿真人体三维微环境中的消化与代谢过程。基于微流控器官芯片技术探索乳成分结构在细胞层面的流体力学、机械力学、电学特征及其生理调控信号通路;基于单细胞测序甄别乳品促进机体免疫力的靶细胞;通过高通量测序技术探索乳成分调控肠道菌群、蛋白转录,乃至表观遗传的可能等。未来,宏观、微观相结合的乳品与健康循证体系,将助力乳品特征功能组分的精细发掘,特定乳成分健康效应与乳成分间协同作用的验证及乳品作用健康复杂机理的探索,为乳品促进公众健康的积极作用提供高质量科学证据。

收稿日期: 2024-09-27

通信作者: 中国食品科学技术学会

E-mail: cifst@126.com

2 生命早期营养解析推动母婴乳品研发理念升级

基于多点、多区域母乳成分全谱系研究,以及多中心母婴队列建立、母乳营养组学分析技术的突破,母乳组分得到更深层次、更多维度的解析,与婴儿健康结局的关联积累了大量的科学证据。越来越多的科学证明,生命早期的营养保障不仅关乎婴幼儿的生长发育与健康状态,而且对成年期健康具有长远作用,并可通过表观遗传学产生代际影响。近期研究揭示,母乳中的菌群、溶菌酶、母乳低聚糖等功能活性成分间存在复杂而精密的相互作用,共同构建了独特的母乳生态体系,全面调控婴儿的生长发育进程^[4]。因此,在婴幼儿配方乳粉产品的研发中,模拟母乳的生态组成与功能特性尤为重要。目前,通过乳中关键功能组分的协同搭配^[5-6],如脂肪酸、 α -乳清蛋白和 β -酪蛋白,益生菌和益生元的组合运用等,已在一定程度上实现婴幼儿配方乳粉的母乳化。未来,应进一步完善母乳成分图谱,解析母乳成分的独特空间结构,探索成分间的协同效应,推动婴幼儿配方乳粉母乳化,从成分添加、配比得当,向精细结构构建乃至母乳生态体系全模拟的升级。同时,基于母婴间存在显著的营养传递机制,母体的营养水平与机体状态变化可以通过胎盘、母乳以及养育行为作用胎儿、婴儿的健康^[7]。因此,应延伸生命早期营养关注视角,重视孕期、哺乳期的营养需求,同时关注断母乳后儿童期的营养接续,开发支持性乳品,更好的满足生命早期的营养需求,为实现全生命周期的健康奠定坚实的基础。

3 功能性乳品开发助力成年人营的营养健康提升

在人口老龄化、大众健康意识增强及消费结构升级等多重因素的影响下,老年人、亚健康及运动人群等成年人的营养健康需求日益增长,对多元化、功能化乳品的需求显著增加^[8]。聚焦肌肉衰减、骨骼健康、慢性疾病、睡眠质量、视力保护及肠道健康等细分领域的健康需求,以乳品为载体,通过营养强化、乳成分重组转化、生物发酵等技术的靶向调控,以及新食品原料、食药物质和功能性配料在乳品中的合理应用,实现乳成分的精准调整

与升级,强化多元化创新产品的供给能力^[9]。目前,通过生物强化技术可实现多种营养素(如DHA等)在乳品中的高效富集;利用乳糖定向转化技术,能够在保持牛奶原有天然营养成分的基础上,精准去除乳糖成分,减轻乳糖不耐受人群的肠胃负担,有效解决饮奶不适的问题^[10];通过乳蛋白定向水解技术可制备低致敏性的活性肽段,更利于消化吸收;运用中链脂肪酸的转化技术可提高乳品中该成分的含量,进一步增强乳品的能量供应、抗菌、抗炎和抗氧化作用。未来,针对不同特征人群的营养健康需求,持续创新生物技术以及加工技术,创制功效成分明确、科学证据充足的功能性乳品是产业创新的方向。

4 构建奶牛全生命周期专属养殖体系

随着标准化规模养殖体系的逐渐形成,以及碳足迹、生物多样性、动物福利为基础的奶牛可持续发展养殖理念的形成,构建奶牛全生命周期专属养殖体系已成为乳品行业创新的焦点。针对乳品行业上游的牧草领域,通过非传统分子育种技术^[11],不仅加快了高产苜蓿品种的培育进程,还将重点放在培育出适应极端环境,如耐寒、耐干旱及耐盐碱地的新型苜蓿品种上。同时,依托智慧种植等技术提升牧草品质^[12],可有效减少水资源、肥料等关键资源的消耗,从而推动草业向更加高效、可持续的生产模式转型。在养殖环节,实施精准营养管理策略,深入研究并定制奶牛个体化的营养配方,结合体外模拟与靶向递送技术的创新应用,以改善养殖动物的肠道健康^[13],提升养殖效率,引领养殖行业由传统的数量扩张向质量提升与精准管理的新阶段迈进。未来,聚焦高产奶牛胃肠健康与减碳技术研究,应用精准饲喂策略及降碳添加剂,减少养殖全过程温室气体排放,助推奶牛养殖迈向高效、绿色、可持续发展的方向。

5 精准分子设计育种打造“中国奶牛”新品系

目前,奶牛育种更多依赖于表型数据和特征,存在周期长、准确性低及一些性状难度量的技术现状。随着功能基因挖掘、定位与功能组学领域研究成果的持续积累与深入解析,加之多能干细胞

诱导分化技术及基因编辑手段的研究与应用,奶牛商业化育种领域已迈入精准分子设计育种新时代。这一时代以基因水平检测、遗传评估以及基因功能调控为核心,构建了“试管内循环模式”的育种体系^[14]。组学技术结合实验动物模型为基因功能挖掘、定位和基因功能的解析提供了全面技术支持,为特定新性状基因的筛选和应用提供了全新的科学、精准的技术手段^[15]。通过干细胞定向分化诱导,建立了配子-受精-早期胚胎发育/遗传评价的“试管内循环”育种全新模式,颠覆性地取代了以母体生殖传代过程为支撑的传统育种技术模式,可实现动物育种的精准可控,显著缩短育种周期,并大幅降低育种成本。未来,以“高产、高繁、抗病、低碳、长寿”为目标的“中国奶牛”生物育种新品系选育,将成为我国奶牛育种领域科技创新主流。在此基础上,培育富含功能乳成分的奶牛新品系,打造乳产品功能的多元化,是提升奶牛养殖与乳品加工经济效益,推动产业持续、稳定、高质量发展的重要方向。

6 技术焕新赋能乳品维系原生结构与活性

热加工处理虽然能够有效杀灭微生物和酶的活性,但是也会使乳中的活性蛋白发生部分变性,导致牛乳活性蛋白的某类特定的活性功能损失。低温乳品虽然可以满足低热加工的要求,但是会使产品缺乏便携性。随着乳品加工技术的革新以及生活节奏的加快,以最大限度保持乳品原生结构、活性和便携化成为乳业发展的重要趋势。在乳品的复杂加工过程中,膜过滤技术作为一种冷杀菌技术,为乳品筑起一道保护屏障,可以在低温条件下有效去除致病菌^[16]。蒸汽侵入式杀菌技术则以高温、短时、温和的杀菌方式,保证乳品安全和品质^[17],在一定程度上降低乳品中热敏性营养成分的损失。在浓缩、干燥过程中引进真空技术可以有效地加速物料中水分的蒸发,同时避免高温对物料组分的破坏^[18],而惰性气体置换技术可有效减少氧气含量,延缓乳品品质退化和营养流失,使乳品的原生风味与营养价值得以长久保留^[19]。未来,构建基于物理作用力的新型冷杀菌/低热杀菌技术,集成保活工艺的探索与创新,结合干湿分离等技术,进一步提升乳品全链条加工中其原生品

质的稳定性,强化营养活性成分的保留,突破常温化的技术壁垒,从而满足消费者对乳品原生品质的追求。

7 深度开发高附加值配料,驱动乳品功能进阶

随着全球乳品消费量增长的放缓,以及后疫情时代消费者对营养和健康需求的增加,高附加值配料的深度开发及其标准建设,已成为推动特需和功能乳品创新的核心驱动力。基于膜过滤结合离子交换技术^[20]、组分重组技术^[21]、酶工程^[22]等技术,可实现从原乳中深度分离制备特定结构和功能的蛋白质、脂质以及水解蛋白,如乳铁蛋白、低钙乳白蛋白、重组酪蛋白、脂肪球膜蛋白、中长链脂肪酸和特定功能的水解蛋白肽;搭建高效功能筛选^[23]、智能化生产技术平台,可自主开发性能更加优异的益生菌和发酵剂;基于脂质体包埋等技术,可显著提升功能蛋白与益生菌的生物利用度和功效体验。未来,进一步强化对乳品加工中衍生物及副产物的综合利用,健全高附加值配料的检测和评估技术体系,构建全方位、精细化的高附加值配料的标准,是推动并引领乳业向功能化和健康化转型的重要方向。

8 风味感知科学让乳品的美味实现量化设计

随着经济的发展,消费者对乳品消费模式逐渐向享受型发展,在满足营养需求的基础上,更加注重乳品的感官品质和享受。风味作为乳品感官品质的核心竞争力,乳品风味感知科学和加工技术的发展使“吃得更加美味”成为可能。构建基于感官评估特征值的标准化“风味词典”,是风味感知科学研究的基础;在利用风味组学、分子感官组学、智能感官分析等手段,可在解析风味与质构的关键组分的基础上,揭示其香气特征与质地变化的内在机制,实现对乳品美味的量化^[24]。结合酶技术、发酵技术相关的生物风味提升技术以及多糖-蛋白复合胶体等质构稳态化技术,可在新产品开发、生产工艺改良、质量控制等方面实现对乳品感官品质的精准调控^[25]。未来,深化风味感知科学及新型加工调控技术在乳品开发中的创新实践,提

升乳品内源性风味物质水平,推动乳品标签的清洁化,可让乳品的美味实现更好地设计。此外,随着生物计量学(如面部表情分析、眼动追踪、神经成像)及数据挖掘技术的引入^[26],乳品口腔加工过程风味释放,包装与消费环境对消费者偏好的影响等风味感知前沿研究成果,将助力乳品研发更精准地匹配消费者需求。

9 推进乳品全链条风险预警、监测与防控

乳品的质量安全源于全产业链的品质管理和完善的追溯体系。目前,乳品安全管理理念正从以“检”为主向以“防”为主转变。在牧场和原料乳端进行监测与防控,对牧场投入品与环境污染物进行非目标筛查及风险评估^[27-28],建立乳品中嗜冷菌、耐热菌等微生物污染菌群的防控体系^[29],可有效控制潜在污染物在乳品生产全链条中的传播;在新产品研发设计端进行预防性风险管理,在乳品设备设计及安装阶段即对风险因子和杀菌工艺进行全面评估与验证,实现新品上市“一次就做对”;在乳品加工环节,建立乳品加工关键质量要素与大数据深度融合的关联模型和预警机制,可减少并控制化学和微生物污染,加工副产物的产生及重要营养成分的损失;在终产品评价及流通阶段,通过智能系统实时在线监测,建立基于多组学的乳品质量控制与品质分析系统^[30],可缩短供应链响应时间,增强乳品运输储存及销售全过程的可追溯性。未来,实现乳品风险预警、监测与防控数据的全链条整合,深入开展品质劣化关键因子的筛查与确认工作,推动检测技术的创新研发,并不断优化生产工艺流程,结合信息化和大数据技术进行深度溯源分析及科学精准防控,是全方位提升乳品质量安全水平的发展方向。

10 合成生物学引领未来乳品产业革命

合成生物学,作为未来乳品产业的革命引擎,正以其突破性应用重塑乳业创新版图。该技术主要围绕着高附加值功能乳品组分的生物制造以及“细胞奶”技术的探索,借助工程菌和细胞工厂两种合成途径实现^[31]。工程菌技术通过基因工程手段改造微生物,赋予其高效表达并合成蛋白质、寡糖等乳品关键组分的能力。此方法不仅产量可观,

而且成本效益显著,大规模商业化生产前景广阔。然而,鉴于多数工程菌基于原核系统,其翻译后修饰能力相对有限,难以完全复制天然蛋白质的复杂结构。“细胞奶”技术则采用多层细胞培养系统,可实现高密度细胞培养。在这种体外环境中,细胞能够完成复杂的翻译后修饰过程,进而生产出功能结构与天然蛋白高度相似的蛋白质、脂肪及多糖等乳品组分^[32]。尽管如此,将“细胞奶”从实验室推向市场仍面临诸多挑战,包括高昂的生产成本、技术瓶颈以及伦理和社会接受度问题^[32]。此外,建立健全相关法律法规体系,为“细胞奶”等新兴产业的健康发展提供法律保障,同样是不可或缺的一环。未来,随着对乳品活性成分机制认识的深化,以及合成生物学技术的精进,加之法规框架的日趋成熟,合成生物学将成为乳业变革的强劲推手,开启一个全新的乳业时代。

11 乳品环保包装创新践行可持续发展理念

随着人们对环保、健康、安全意识的日益增强,传统塑料包装在乳业领域的应用正面临日益严格的限制。传统塑料包装材料因难以自然降解及回收过程中的复杂性,故促使乳业包装行业加速向更加环保、可持续的方向转型。在此背景下,生物可降解与可循环再利用的新型乳品包装材料成为行业创新的焦点与趋势^[33]。为积极响应这一变革,乳品包装广泛采用可回收且循环使用的聚酯合成纤维(Polyethylene terephthalate, PET)材料,并辅以阻光母粒、高附加值阻隔助剂等先进技术,有效推动了包装材料的PET化进程,显著降低了对不可回收复合膜包装材料的依赖^[34]。同时,新型微发泡技术在可降解乳品包装材料领域的应用取得突破性进展,该技术不仅满足乳品保温的特定需求,还通过减少包装材料用量实现了轻量化目标。微发泡技术通过在包装材料中均匀分布微小气泡,不仅大幅度减轻了包装的重量,还显著提升了材料的隔热性能,确保了乳品在长途运输中的新鲜度与品质^[35]。该技术还赋予包装材料卓越的可降解性和回收性能,有效降低了环境的负担,为乳品包装的绿色可持续发展开辟了新路径。未来,进一步提升生物可降解与可回收再生材料

的制备技术,开发具有优异抗菌、抗氧化等多功能的包装材料成为乳品包装创新趋势。

12 数智化全方位助力乳业高效生产

在数字经济与产业创新同频共振之下,智能化改造和数字化转型成为乳业创新发展的新质生产力。在上游,通过人工智能算法分析奶牛行为模式,优化繁殖计划^[6];智慧管理系统和数字孪生模型监控奶牛的“衣食住行”,实现精准饲养和疾病预警;智能喷灌系统则实现精准灌溉,提升牧草质量。在中游,数字孪生技术可1:1复刻乳品实体工厂,预测潜在问题,优化生产流程和资源配置^[7];利用机器学习算法对生产数据进行深度挖掘和分析,可预测乳品产品质量趋势,及时调整生产参数;视觉识别技术能精准识别原料乳、产品与包装缺陷,优化生产流程及追溯与防伪。在下游,数字孪生模型可降低物流与仓储成本,优化销售策略,智能洞察系统实现了消费者在线协同共创新品,超写实数字人达成了更“人格化”的消费者体验。未来,大数据结合物联网、人工智能、区块链等技术,将推动乳品工业实现精准养殖、智能生产、全程追溯、定制化产品开发、精准营销、精准营养及全链条效率优化,促进乳业产业升级和可持续发展。

顾问

孟素荷 中国食品科学技术学会
孙宝国 中国工程院院士、北京工商大学
任发政 中国工程院院士、中国农业大学
宋昆冈 中国乳制品工业协会

项目组专家(按姓氏汉语笔画排序)

王 硕 南开大学
艾连中 上海理工大学
李喜和 内蒙古大学
何 剑 国家乳业技术创新中心
张玉梅 北京大学
邵 薇 中国食品科学技术学会
姜毓君 东北农业大学
姚 粟 中国食品发酵工业研究院

共同执笔人

罗 洁 湖南农业大学

张丽娜 江南大学
赵 艾 清华大学
王 蓓 北京工商大学
朱银华 中国农业大学
王 菁 东北农业大学
李依璇 中国农业大学
王 典 国家乳业技术创新中心
孙 伟 国家乳业技术创新中心
王鹏杰 中国农业大学
陈 铮 中国食品科学技术学会
司徒文佑 国家乳业技术创新中心
冯 罡 国家乳业技术创新中心
崔 羽 国家乳业技术创新中心
罗江钊 中国食品科学技术学会

参 考 文 献

- [1] BUCCA D, GERRY I. The future of sustainable dairy[M]//sustainable protein sources. second edition. Netherlands: Academic Press, 2024: 617-627.
- [2] YUAN S, YUAN H P, HAY D C, et al. Revolutionizing drug discovery: The impact of distinct designs and biosensor integration in microfluidics-based organ-on-a-chip technology[J]. Biosensors, 2024, 14(9): 425.
- [3] WANG Y L, SONG W L, WANG J L, et al. Single-cell transcriptome analysis reveals differential nutrient absorption functions in human intestine[J]. Journal of Experimental Medicine, 2020, 217(2): e20191130.
- [4] CHRISTIAN P, SMITH E R, LEE S E, et al. The need to study human milk as a biological system[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2021, 113(5): 1063-1072.
- [5] CONSALES A, CERASANI J, SORRENTINO G, et al. The hidden universe of human milk microbiome: Origin, composition, determinants, role, and future perspectives[J]. European Journal of Pediatrics, 2022, 181(5): 1811-1820.
- [6] NGUYEN M T T, KIM J, SEO N, et al. Comprehensive analysis of fatty acids in human milk of four Asian countries[J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(6): 6496-6507.
- [7] SYLVETSKY A C, KUTTAMPEROOR J T,

- LANGEVIN B, et al. Intergenerational transmission of sucralose and acesulfame-potassium from mothers to their infants via human milk: A pharmacokinetic study[J/OL]. *The American Journal of Clinical Nutrition*. (2024-08-05) [2024-09-25]. <https://doi.org/10.1016/j.ajcnut.2024.08.001>.
- [8] 刘禹, 冯良. 浅谈功能性乳品市场[J]. *乳品与人类*, 2021(2): 53-55.
- LIU Y, FENG L. Talking about functional dairy market[J]. *Dairy and Humankind*, 2021(2): 53-55.
- [9] 潘瑶. 功能性乳制品市场情况及发展动态[J]. *中国乳业*, 2007(4): 3.
- PAN Y. Functional dairy products market situation and development trends[J]. *China Dairy*, 2007(4): 3.
- [10] 朱小朋, 刘永峰. 功能性乳制品研究现状及发展前景[J]. *乳业科学与技术*, 2022, 45(2): 65-68.
- ZHU X P, LIU Y F. Research on functional dairy products: Current status and future prospects [J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2022, 45(2): 65-68.
- [11] 王旗旗, 解继红, 于林清, 等. 我国苜蓿育种研究进展及展望[J]. *草学*, 2023, 4: 1-7.
- WANG Q Q, XIE J H, YU L Q, et al. Research progress and prospect of alfalfa breeding in China[J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2023, 4: 1-7.
- [12] 闫智慧. 草场的改良与牧草种植技术研究[J]. *农业与技术*, 2018, 38(8): 134.
- YAN Z H. Research on pasture improvement and grass planting technology[J]. *Agriculture and Technology*, 2018, 38(8): 134.
- [13] 刘艳凤, 乌日娜, 李默, 等. 益生菌微胶囊包埋及靶向递送体系研究进展[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(5): 400-410.
- LIU Y F, WU R N, LI M, et al. Research progress of probiotic microcapsule embedding and targeted delivery system[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(5): 400-410.
- [14] ZHAO L X, GAO X F, ZHENG Y X, et al. Establishment of bovine expanded potential stem cells [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(15): e2018505118.
- [15] HAYASHI K, OHTA H, KURIMOTO K, et al. Reconstitution of the mouse germ cell specification pathway in culture by pluripotent stem cells[J]. *Cell*, 2011, 146(4): 519-532.
- [16] ZHANG W J, LIU Y W, LI Z B, et al. Retaining bioactive proteins and extending shelf life of skim milk by microfiltration combined with Ultraviolet-C treatment[J]. *LWT*, 2021, 141: 110945.
- [17] 王象欣, 张秋梅, 魏雪冬, 等. 不同类型热处理方式对牛乳品质的影响[J]. *中国乳品工业*, 2019, 47(4): 20-23.
- WANG X X, ZHANG Q M, WEI X D, et al. Effect of different types of heat treatment on milk quality[J]. *China Dairy Industry*, 2019, 47(4): 20-23.
- [18] SIVAMMA P, MOUNIKA E, NAGE HARI SAIRAM N, et al. Applications of vacuum technology in food processing[J]. *The Pharma Innovation Journal*, 2021, 10: 914-918.
- [19] BONNAILLIE L M, TOMASULA P M. Carbon dioxide: An alternative processing method for milk[M]// Datta N, Tomasula P M, eds. *Emerging Dairy Processing Technologies*. United Kingdom: Wiley, 2015: 205-250.
- [20] XIA S Q, ZHANG L, ZANG Y Q, et al. Structural characteristics and thermal stabilities of bovine, caprine and ovine lactoferrins with different iron saturation levels[J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103275.
- [21] YANG T T, LIU D S, TANG J, et al. Formation of casein micelles simulating human milk casein composition from bovine caseins: Micellar structure and *in vitro* infant gastrointestinal digestion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 149: 109610.
- [22] ATIROGLU V, ATIROGLU A, AL-HAJRI A S, et al. Exploring the synergistic effects of enzyme@lactoferrin hybrid on biomimetic immobilization: Unveiling the impact on catalytic efficiency[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 248: 125946.
- [23] LOPEZ-ESCALRA S, LUND M L, HERMES G D A, et al. In vitro screening for probiotic properties of *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains in assays relevant for non-alcoholic fatty liver disease prevention[J]. *Nutrients*, 2023, 15(10): 2361.
- [24] ZHAO Q, YE Z Y, DENG Y, et al. An advance in novel intelligent sensory technologies: From an implicit - tracking perspective of food perception[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024, 23(2): e13327.

- [25] ZHAI W X, BAO S R, HAN R J, et al. Impact of reduced sucrose content on processed cheese: Sensory, textural, and storage stability analysis[J]. *Food Bioscience*, 2024, 60: 104405.
- [26] KESSLER S J, JIANG F, HURLEY R A. The state of automated facial expression analysis (AFE) in evaluating consumer packaged beverages[J]. *Beverages*, 2020, 6(2): 27.
- [27] SHI L, JIA W, ZHANG R, et al. Adulteration of endogenous substances as a next challenge in dairy safety: High-throughput analysis of flavours in goat milk based on the molecular mechanism of flavouring components dynamic changes[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 142: 104229.
- [28] 高平娉, 任玉伟, 杨鑫焱, 等. 侧流免疫层析技术监控乳中致病因子的研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(5): 252-263.
- GAO P P, REN Y W, YANG X Y, et al. Progress in lateral flow immunochromatographic assays for monitoring pathogenic factors in milk[J]. *Food Science*, 2022, 43(5): 252-263.
- [29] 吴杰, 郑楠, 王加启, 等. 乳中嗜冷菌检测和分析方法的研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(13): 356-364.
- WU J, ZHENG N, WANG J Q, et al. Recent progress on methods for the detection and analysis of psychrophilic bacteria in milk[J]. *Food Science*, 2024, 45(13): 356-364.
- [30] SU G Y, YU C, LIANG S W, et al. Multi-omics in food safety and authenticity in terms of food components[J]. *Food Chemistry*, 2024, 437: 137943.
- [31] CHEN R P, REN S Y, LI S, et al. Synthetic biology for the food industry: advances and challenges [J/OL]. *Critical Reviews in Biotechnology*. (2024-01-25) [2024-09-25]. <https://doi.org/10.1080/07388551.2024.2340530>.
- [32] DENG M T, LV X Q, LIU L, et al. Cell factory-based milk protein biomanufacturing: Advances and perspectives [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 244: 125335.
- [33] SANI M A, AZIZI-LALABADI M, TAVASSOLI M, et al. Recent advances in the development of smart and active biodegradable packaging materials [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(5): 1331.
- [34] BARUKCIC I, KUREK M, LISAK JAKOPOVIC K, et al. Packaging perspective of milk and dairy products[J]. *Mljekarstvo*, 2019, 69(1): 3-20.
- [35] REJEESH C R, ANTO T. Packaging of milk and dairy products: Approaches to sustainable packaging [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 72: 2946-2951.
- [36] PATHAK A, RATHORE A. Dairy and artificial intelligence-enhancing efficiency and productivity [J]. *Just Agriculture*, 2023, 3(12): 90-104. .
- [37] SALIMBENI S, ROMERA N, REDCHUK A. Digital twin in a dairy factory [C]//*International Symposium on Industrial Engineering and Automation*. Cham: Springer International Publishing, 2022.

The Science and Technology Innovation Hotspots in Chinese Dairy Industry

¹Chinese Institute of Food Science and Technology, Beijing 100048

²National Center of Technology Innovation for Dairy, Hohhot 010018)

Abstract As the cornerstone of national economy and people's livelihood, the dairy industry promotes the diversification of food supply as well as the modernization of food industry and agriculture. Furthermore, it significantly improves the nutritional health of the national population. Based on down-to-earth accumulation for more than 70 years, Chinese dairy industry has cut a striking figure on the global stage and achieved the transition from 'learning from others' to 'focusing on innovation'. Facing the challenges of globalization, scientific and technological innovation has occupied center stage in Chinese dairy industry. This article sorts out 12 innovation hotspots of Chinese dairy industry based on new transformation in the development of global dairy industry, including evidence of dairy nutrition and health, customized breeding of dairy cows, bioactivity of milk components retention, exploration of high value-added ingredients, and digital and intelligent management of the whole industrial chain. Those hotspots will provide insight and guidance for scientific and technological innovation as well as development of Chinese dairy industry.

Keywords Chinese dairy industry; scientific and technological innovation; dairy development; nutrition and health