DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260421005
引用格式: 常庆, 马瑛, 陈敏, 等. 植物源功能活性成分在食品保鲜及功能强化中的创新应用及安全性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 115–123.
Chang Qing, Ma Ying, Chen Min, et al. Research progress on innovative applications and safety of plant-derived functional active ingredients in food preservation and functional fortification [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): 115–123. (in Chinese with English abstract).

植物源功能活性成分在食品保鲜及功能强化中的创新应用及安全性研究进展

常 庆[#], 马 瑛[#], 陈 敏, 杨 雪[*]
[云南省疾病预防控制中心(云南省预防医学科学院), 昆明 650500]

摘 要: 随着消费者对天然、安全、健康食品需求的日益增长, 植物源功能活性成分作为合成添加剂的替代品受到广泛关注。本文在食品保鲜方面, 重点结合近年来多酚类、精油类及多糖类等典型活性物质的研究进展, 对其在抑制微生物生长及延缓氧化反应中的作用特点进行了归纳, 并结合纳米封装及活性包装等新型技术的发展, 分析其在肉制品、果蔬及水产品中的应用效果。在功能强化方面, 本文总结了植物源活性成分在功能性食品开发、生物利用度提升及清洁标签产品中的应用现状。基于毒理学研究、迁移行为检测及法规标准现状对相关安全性问题进行了梳理。在此基础上, 讨论了当前研究存在的应用稳定性不足、标准化程度有限等问题, 并对未来发展方向进行展望, 以期为植物源功能活性成分在食品领域的进一步应用提供参考。

关键词: 植物源活性成分; 食品保鲜; 功能强化; 纳米封装; 安全性评价; 清洁标签
中图分类号: TS201.6 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)14–0115–09

Research progress on innovative applications and safety of plant-derived functional active ingredients in food preservation and functional fortification

CHANG Qing[#], MA Ying[#], CHEN Min, YANG Xue[*]
[*Yunnan Center for Disease Control and Prevention* (*Yunnan Academy of Preventive Medicine*), *Kunming* 650500, *China*]

ABSTRACT: As consumers become increasingly demand for natural, safe and healthy foods, plant-derived bioactive ingredients attract wide attention as alternatives to synthetic additives. In food preservation, this paper focused on the research development of typical bioactive substances such as polyphenols, essential oils and polysaccharides in recent years, summarized their functional characteristics in antibacterial and antioxidantactivitie. It analyzed their application effects in meat, fruits, vegetables and aquatic products, combined with the development of new technologies such as

收稿日期: 2026-04-21
基金项目: 云南省高层次卫生健康技术人才培养项目(L-2024020)
#常庆和马瑛为共同第一作者
第一作者: 常庆(1996—), 女, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为营养与食品卫生学。E-mail: 1784288868@qq.com
马瑛(1999—), 女, 硕士, 检验技师, 主要研究方向为生物化学与分子生物学。E-mail: maying922@126.com
***通信作者:** 杨雪(1998—), 女, 硕士, 检验技师, 主要研究方向为卫生毒理学。E-mail: 54834855@qq.com

nanoencapsulation and active packaging. In functional fortification, this paper summarized the application status of plant-derived bioactive ingredients in functional food development, bioavailability enhancement and clean label products. It analyzed the related safety issues based on toxicological research, migration behavior detection and current regulatory standards. On this basis, this paper discussed the existing problems in current research including inadequate application stability and limited standardization, prospects future development trends, and provides a reference for the further application of plant-derived functional bioactive ingredients in the food industry.

KEY WORDS: plant-derived bioactive ingredients; food preservation; functional fortification; nanoencapsulation; safety evaluation; clean label

0 引 言

食品安全问题始终是全球公共卫生领域重要议题。据世界卫生组织统计数据, 全球每年约有 6 亿人罹患食源性疾病, 其主要致病菌包括有诺如病毒、沙门菌、致泻性大肠埃希菌、副溶血性弧菌和志贺菌五大病原体。食品的微生物污染是导致此类疾病发生的重要原因[1−3]。此外, 食源性疾病也源于动植物本身的有毒成分, 例如我国西南地区相关的食物中毒[4]。近几年研究发现, 新生儿、孕妇、老年人及免疫功能低下人群对单核细胞增生李斯特菌易感[5], 死亡率可达 20%至 40%。Karanth 研究表明微生物污染所引起食品变质也是导致食物浪费的主要原因之一。全球每年约 13 亿吨食物被浪费, 很大程度上与保存技术不足有关。随着居民生活水平的提高和食品安全意识的增强, 消费者更倾向于成分简单且不含人工合成添加剂的产品[6−7]。在此背景下, 植物源功能活性成分逐渐成为研究热点。

我国地域辽阔、气候多样, 植物资源丰富, 植物源功能成分种类多样, 主要包括碳水化合物及糖苷(多糖和寡糖)、蛋白质及肽类(硫脯氨酸、防御蛋白、麦芽糖结合蛋白、玉米蛋白等)、萜类、多酚(香芹酚、姜黄素、类黄酮)、生物碱及葡萄糖苷等化学成分[8]。其中, 花青素具有抗氧化、抗炎和心血管保护等活性[9]; 魔芋葡甘露聚糖和 β-环糊精常用作食品保鲜包装和功能性载体[10−11]。云南省地处我国西南边陲, 横跨热带、亚热带、温带和高寒多种气候区, 是我国生物多样性最为丰富的地区之一, 有“植物王国”之称, 其中药食同源物质也较为丰富。云南特色植物资源中含有多种功能活性成分, 如普洱茶茶多酚和茶色素等具有抗氧化、降脂作用, 三七皂苷具有心血管保护、抗炎等功能, 滇橄榄多糖表现出良好的抗氧化、抑菌效果, 铁皮石斛多糖在免疫调节和胃肠道保护方面作用突出, 天麻素、天麻多糖具有多种生理调节功能等。云南特色植物活性成分不仅能在功能性食品开发中具有独特优势, 也可为食品保鲜提供丰富的天然来源。

本文基于近几年国内外研究成果, 系统梳理了植物源功能活性成分在食品保鲜与功能强化领域的应用进展, 并对相关毒理学评价、包装材料迁移行为、环境安全性及相关法规标准等进行了综述。进一步对未来的发展方向和挑战进行讨论, 以期为该类成分在食品中规模化、规范化应用提供理论依据。

1 植物源功能活性成分在食品保鲜中的应用

1.1 作用机制

1.1.1 抑菌机制

植物源功能性活性成分对微生物的抑制作用主要涉及以下机制: (1)破坏细胞膜或细胞壁的结构, 从而改变其完整性, 增加细胞通透性, 导致细胞内物质外泄; (2)干扰 DNA 和 RNA 的合成过程及其功能表达, 从而影响遗传信息的正常传递; 还有是抑制关键代谢酶活性, 阻断微生物能量代谢途径[12−13]。

赵亚珠等[12]研究表明精油中的酚类、醛类和萜类成分能有效抑制李斯特菌、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌等多种食源性病原菌的生长。Upadhyay 等[14]发现, 依兰精油破坏黄曲霉细胞的膜结构, 进而抑制其正常繁殖和黄曲霉毒素 B_1 的分泌。而茶多酚和阿魏酸等多酚类物质通过螯合金属离子和抑制生物膜的形成, 发挥抗菌作用[15−16]。

1.1.2 抗氧化机制

植物源活性成分的抗氧化机制主要包括: 清除自由基、螯合金属离子以及终止脂质过氧化链式反应[16−17]。如, 番茄红素通过淬灭单线态氧和清除过氧化自由基, 有效延缓食品中的脂质和蛋白质氧化[18]。生姜提取物中的姜辣素化合物对芬顿氧化条件下诱导的羊蛋白分离物具有很强的抗氧化能力[17]。Zheng 等[19]的研究表明, 阿魏酸分子结构中的酚羟基与共轭双键使其具备强大的自由基清除能力, 在医药、食品和化妆品等领域展现出良好的抗氧化特性。

1.2 创新应用形式与技术创新

由于植物源功能活性成分稳定性较差, 传统单一应用手段难以在食品中达到理想保鲜效果。例如, 精油挥发性强、水溶性差的特性, 导致保鲜时间有限和稳定性不足。此外, 部分精油气味浓烈, 还可能引起消费者不适。研究显示采用纳米封装技术处理的依兰精油对花生种子的抗菌能力显著强于未封装精油, 且释放速率更平稳, 能持续释

放有效成分以提升保鲜效果[14]。再如, 原花青素抗氧化功能强, 但对光、热、氧和 pH 等条件高度敏感, 经微囊化技术处理后, 显著提升了其对热、pH 和金属离子及长期储存等方面的稳定性[20]。此外, 不同结构的植物源功能活性物质特征差异较大, 例如精油分子量较小适合作为包埋物, 通过控制其释放速率达到保鲜效果; 而多糖类分子量大且较为稳定, 常用作为封装载体与封装目标物协同发挥作用。

植物功能活性成分根据活性物质特征及保鲜食品种类, 有针对性地选择加工技术以发挥保鲜功能。加工技术包括直接形成涂层、活性包装纸、纳米封装与微囊化技术、智能与活性包装技术、协同保鲜策略等方法, 能从根本上延长食品保鲜时间和效果。多学科创新结合有助于充分发挥植物源功能活性成分在食品保鲜中的作用, 为食品行业的规范化、规模化生产提供理论支撑。

1.2.1　纳米封装与微囊化技术

纳米封装与微囊化技术均属于封装/包埋技术, 可根据活性物质分子量差异选择适用技术, 应用于不同食品的保鲜。其中纳米封装技术是改善植物精油和多酚类成分挥发性强、水溶性差、易氧化降解及控制释放速率等局限性的关键技术。纳米封装技术载体为 1~1000 nm, 与微胶囊技术相差 3 个数量级。近年来, 壳聚糖纳米乳液[14]、固体脂质纳米粒[21]、电纺纳米纤维[24]等新型载体系统不断涌现。Zeinali 等[22]将枣提取物负载于聚乙烯醇电纺纳米纤维中作为活性包装材料(PVA/Je 纳米纤维)用于草莓保鲜。结果表明, 对照组草莓第 6 d 开始腐烂、重量损失最高, PVA/Je 纳米纤维在第 12 d 未观察到明显腐烂迹象、外观总体达到市场销售要求、损失重量显著下降。体外实验表明 PVA/Je 纳米纤维对食源性病原体金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌有较强的抑菌效果, 此外 PVA/Je 纳米纤维能吸收草莓产生的水分, 保持包装盒干燥, 延缓微生物的生长繁殖。Zhou 等[23]从代谢组学角度系统分析了封装精油作为多功能食品添加剂的代谢途径, 为精油保鲜机制研究提供了新视角。

另一方面, 大分子类植物活性成分(如多糖、壳聚糖、玉米醇溶蛋白等)常用于微胶囊载体, 而封装物也可以是植物活性成分。微胶囊载体和封装物能协同发挥保鲜作用, 如多糖为载体包埋益生菌, 多糖在胃酸作用下消化率低, 从而保护益生菌顺利到达肠道发挥作用。微胶囊载体多糖作为益生元供益生菌使用, 提高了益生菌在肠道的作用[11]。Cui 等[18]研究表明, 通过将活性成分包埋于基质中制备微胶囊可有效提升其稳定性, 同时指出蛋白质类(明胶、乳清蛋白、玉米醇溶蛋白)和多糖类(壳聚糖、海藻酸钠、改性纤维素)壁材在食品保鲜领域运用广泛。Supaphol 等[10]研究指出环糊精封装与可食性涂层结合应用, 增强型涂层封装效率达 53%~99%, 该涂层对保鲜物质的控释时间从数小、时延长至 35 d, 易腐食品货架期延长 75%~200%, 微生物抑制率高达 90%, 提高了果蔬类、易腐食品的保鲜质量。Grover 等[24]采用 β-环糊精/阿拉伯胶/大豆卵磷脂对柑橘皮提取得到的柑橘精油进行微囊化, 微胶囊柑橘精油粉对二苯基苦基苯肼抑制率高达 85.23%, 金黄色葡萄球菌和大肠杆菌抑菌圈直径分别为 24.47 mm 和 23.75 mm, 表明微胶囊粉末具有较强的抗氧化和抗菌能力以达到更好的保鲜能力; 同时也提高了柑橘皮的利用价值。

1.2.2　智能与活性包装技术

薄膜在食品保鲜中性价比高, 作为物理屏障为食品提供微环境以缓解食品的生物反应和化学反应, 但薄膜的保鲜作用有较多局限性。近年来, 越来越多研究者将薄膜与植物源功能活性成分相结合以研发更灵敏、智能、可降解的活性包装材料。Li 等[25]以马铃薯淀粉为成膜基质, β-环糊精包封肉桂精油为抑菌剂, 阿魏酸与蓝莓花青素共着色为 pH 响应指示剂, 研发了一种可降解的双功能智能薄膜。该薄膜兼具可逆变色监测与持续抑菌双重功能, 经包封处理后肉桂精油释放延迟至约 90 h, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率接近 100%, 在生鲜食品智能保鲜监控方面展现出良好的应用前景。Chen 等[26]利用 3D 打印技术制备了一种活性双层膜, 上层为明胶-聚乙烯醇-碳点层, 用于智能监测; 下层为玉米淀粉-聚乙烯醇-肉桂精油层, 发挥活性保鲜作用。该双层结构显著增强了薄膜对氧气和紫外线的阻隔能力, 降低了水蒸气渗透率, 并可调控活性成分的释放速率, 有效延缓了芒果的褐变与腐烂。Xue 等[27]基于封装技术与不对称水凝胶技术, 构建了一种集吸湿、抗菌及改良大气功能于一体的 Janus 水凝胶负载 CO_2 化学反应系统, 该系统回弹率达 80%, CO_2 释放周期可达 72 h 以上表现出优异的缓释性能, 对黄色葡萄球菌、大肠杆菌以及果蔬中常见腐败菌黑曲霉表现出良好的抑制效果, 在草莓、葡萄、香蕉、紫甘蓝等果蔬中显著提升了保鲜均匀性与长效性, 且所用包封材料、凝胶剂及化学反应原料均符合食品级安全标准。

在活性包装材料研究方面, Nian 等[28]制备了壳聚糖季铵盐/明胶生物聚合物薄膜, 对番茄和冬枣表现出优异的多功能保鲜性能。此外, 噬菌体功能化纳米纤维涂层[29]、茶多酚-锌离子自组装纳米复合涂层[15]、天然蜡基涂层[30]等新型活性包装体系也相继报道。上述研究表明, 活性包装材料已从单一功能向多功能集成方向发展, 将天然活性成分与可降解基材相结合是当前该领域的主要技术路线。Batool 等[31]进一步指出, 绿色创新型纳米封装精油生物聚合物薄膜兼具抑菌活性与环境友好性, 在可持续食品保鲜包装领域具有广阔前景。

1.2.3　协同保鲜策略

单一保鲜方法或单一植物源活性成分往往难以满足复杂食品体系的保鲜需求, 因此协同保鲜策略成为当前研究的热点方向。Rajashekar 等[32]等综述了植物源生物活性成分与气调包装(modified atmosphere packaging, MAP)相结合的集成策略在即食食品保鲜中的应用, 证实两者的协

同效应可显著延长产品货架期并提高安全性。Zhou 等[33]则系统总结了水凝胶结合纳米粒子与微囊化技术的协同保鲜体系，指出该类复合体系能够实现多种活性成分的阶梯式控释。

1.3 在食品保鲜中的应用实例

植物来源的功能性活性成分在食品保鲜领域已得到广泛研究和应用。在肉制品保鲜方面，付晓航等[34]研究结果表明，精油、多酚和有机酸等天然物质能在一定程度上抑制肉制品中微生物的生长和脂质氧化过程，从而延缓品质劣化并延长保质期。Delgado Pando 等[35]研究进一步表明，用植物多酚替代部分亚硝酸盐，并使用天然抗氧化剂代替传统的合成抗氧化剂，不仅能保持保鲜效果，还能减少亚硝酸盐和合成抗氧化剂的使用量。在果蔬保鲜方面，Xu 等[15]研究表明，茶多酚自组装形成纳米复合涂层，可在一定程度上延长果蔬的保质期。Karim 等[36]研究发现锦葵科植物的水提取物对柑橘酸腐病具有良好的防治效果。通过微胶囊化或纳米乳液技术包封精油，可以减少对精油气味的不良影响。Deepika 等[37]将小茴苓精油制成壳聚糖纳米乳液，不仅有效抑制了真菌生长和黄曲霉毒素 B_1 污染，还显著降低了小茴苓精油对食品风味的负面影响。此外，Duong 等[38]在综述中指出，通过纳米封装技术将精油包封到聚合物基质中，是促进抗菌食品包装可持续发展的一个重要技术途径。表 1 总结植物源功能活性成分在各类食品保鲜中的创新应用。

2 植物源活性成分在增强食品功能中的应用

2.1 应用原理与策略

食品功能强化是指在食品生产加工环节向产品中添加一种或多种营养素、生物活性功能组分，以提高食品的营养价值，同时赋予食品特定的健康功效[50]。植物源活性成分在功能强化中的应用策略主要包括：直接添加、微囊化/纳米封装递送、提高生物利用率以及清洁标签替代等。其中，封装递送技术在营养强化中至关重要(其技术原理已在 1.2.1 详述)，通过纳米封装或微囊化处理可有效保护活性成分免受加工与消化过程的降解，实现胃肠道靶向释放。值得注意的是，植物源活性成分在封装体系中既可作为被保护的芯材，也可作为功能性壁材发挥载体作用，这种双重角色为功能强化食品的设计提供了更大的灵活性。例如，Yuan 等[51]研究表明，我国茶叶副产物(茶枝修剪物、生产后残留物及饮用残渣)为研究对象，从封装物与载体两个方向系统分析了茶多酚和茶油的封装利用策略，目前基于茶叶开发的封装递送系统已在功能强化食品、肉类保鲜、薄膜材料等多个领域得到应用。

2.2 针对不同人群的应用

植物源功能活性成分功能强化的食品可针对不同人群发挥个性化健康效益。Mandal 等[50]研究表明，香料和草本植物中的生物活性成分(如姜黄素、胡椒碱、肉桂多酚等)对心血管疾病高危人群具有心血管保护效果。对于关节炎患者，Jin 等[52]研究发现基于网络药理学开发的新型草本配方 Osteo-F 可通过 NF-κB/JNK 通路改善骨关节炎症状。针对糖尿病患者和需要血糖管理的人群，张子睿[53]研究表明葡萄籽原花青素可降低马铃薯馒头中淀粉的消化速率，从而减缓人体对淀粉的吸收，为开发低血糖生成指数(glycemic index, GI)功能性主食提供了新思路。此外，富含抗氧化多酚的功能性饮品和食品，可为老年人及免疫力低下人群提供食物以外的抗氧化保护[54]。

表 1 植物源功能活性成分在各类食品保鲜中的创新应用

Table 1 Innovative applications of plant-derived functional active ingredients in the preservation of various foods

食品类别	活性成分/来源	应用形式	主要效果	参考文献
肉制品	肉桂/丁香精油	β-CD 微胶囊-低盐腌制	抑制病原菌，延长货架期	[39]
	迷迭香/绿茶多酚	直接添加/涂层	抗脂质氧化，替代亚硝酸盐	[34–35]
	生物活性纳米乳液	涂层处理	延长香肠/肉饼货架期	[21]
牛肉饼	栗壳/壳斗/叶提取物	MAP 结合涂层	抑制脂质氧化，延长保质期	[40]
水产品	鼠尾草精油	纳米纤维素活性包装纸	虾类保鲜，抑菌效果显著	[41]
	马基叶多酚	臭氧协同抗氧化	鱼类模型体系抗氧化	[42]
草莓	枣提取物	PVA/Je 纳米纤维活性包装	延长鲜切草莓货架期	[22]
柑橘	鱼腥草提取物	复合包装材料/聚乳酸复合纸	有效保鲜柑橘类水果	[43]
芒果	16 种植物源活性成分筛选	直接处理	防治两种芒果采后病害	[44]
柑橘	锦葵科水提物	生物杀菌剂	防治柑橘酸腐病	[36]
马铃薯	草本精油提取物	直接处理	防治马铃薯软腐病	[45]
果蔬	肉桂精油	Janus 水凝胶/CO_2 系统智能气调保鲜	延缓果蔬衰老	[27]
谷物	姜黄精油	纳米乳液/纳米粒子	抑制真菌和黄曲霉毒素	[37,46]
鸡胸肉、苹果汁	蜂胶提取物	直接添加	抑制病原菌，延长保鲜期	[47–48]
冰淇淋	芙蓉花、山茶花提取物	混合添加	增强抗氧化和抑菌性能	[49]

2.3　功能强化提升生物利用度

某些植物来源活性成分存在水溶性差、稳定性弱及口服生物利用度低等问题, 提高其在食品体系中的利用效率是当前的研究重点。近年来, 新型包装与递送技术为改善上述问题提供了有效途径。方晓峰[55]以卷心菜红素(属于花青素类)强化脆饼干为研究对象, 通过体外消化模拟实验发现, 优化后的配方能显著提高花青素在胃肠道的释放率与生物利用度。Fernandes 等[56]指出微囊化精油和油树脂处理有助于维持疏水性活性成分的稳定性, 通过调节其释放行为来提高其在消化道中的吸收效率, 提高了其的生物利用度。

在 1.2.1 所述封装技术基础上, 为进一步提升活性成分的递送效率, 一些复合壁材体系也被开发应用于增强食品功能以提升生物利用度。例如, Agarry 等[57]构建了由菊粉和乳清蛋白组成的复合包封体系, 在功能性食品中实现了叶绿素的稳定释放, 其生物利用度高于游离状态。除上述方法外, 研究表明环糊精包埋技术[10]、基于美拉德反应的壁材改性[18]、高内相乳液技术[58]等策略, 可在一定程度上提高植物源活性成分的生物利用度。Zhang 等[58]研究结果进一步表明, 基于天然乳化剂的“清洁标签”水包油高内相乳液体系能够高效包封益生菌、花青素等功能性成分, 并在肠道靶向递送方面展现出良好的应用潜力。

2.4　功能性食品的开发与实例

在功能性食品开发方面, 近年来涌现出大量将植物源活性成分应用于不同食品基质的研究。Ishchenko 等[59]系统评述了草本和香料添加物在功能性糖果产品中的应用, 指出迷迭香酸、姜黄素等添加物在提升产品抗氧化活性和功能特性方面效果显著。Aamir 等[54]将洋甘菊草本提取物添加到碳酸饮料中, 开发出具有抗氧化功能的强化型饮品。Kozlowska 等[60]研究显示, 将草本提取物添加到酥饼中, 能够有效延缓脂肪氧化并改善产品感官品质。刘丹等[61]综述了植物活性成分在面制品中的应用, 包括其对面团流变特性和面条品质的改善作用。

在清洁标签功能性食品领域, Martinez-Zamora 等[62]利用香料、水果和蔬菜提取物成功替代西班牙风味腌肉制品中的合成硝酸盐和抗氧化剂。Yong 等[63]利用蔬菜来源的硝酸盐(如芹菜、甜菜根提取物)通过微生物转化获得天然亚硝酸盐, 开发了基于预转化亚硝酸盐的清洁标签肉类技术。Vieira 等[64]利用水果粉开发了清洁标签蛋黄酱, 以天然色素和增稠剂替代合成添加剂。此外, Câmara 等[65]利用奇亚籽黏液替代磷酸盐应用于乳化肉制品, Park 等[66]开发的物理改性淀粉共混物可替代黄原胶。这些案例均体现了清洁标签策略在功能性食品开发中的创新应用。

3　植物源功能活性成分的安全性评价

3.1　毒理学研究进展

总体而言, 植物源活性成分通常比合成添加剂更安全, 但仍需通过系统毒理学研究全面评估其实际应用。以精油为例, 食品中常用的精油大多已被美国香精香料制造商协会(Flavor and Extract Manufacturers Association of the United States, FEMA)列入公认安全(Generally Recognized As Safe, GRAS)清单, 表明其在规范使用条件下安全性良好。Upadhyay 等[14]在相关研究中评估了依兰精油壳聚糖纳米包封制剂的种子发芽实验, 结果表明该制剂对植物生长没有显著的毒性。此外, 体外细胞模型已被广泛用于评估植物来源活性成分的安全性。Di Nunzio 等[67]采用 HT-29 人结肠癌细胞模型进行了细胞毒性实验, 发现通过用葡萄籽多酚、绿茶提取物和橄榄多酚替代亚硝酸盐/亚硝酸钠而构建的“清洁标签”意大利香肠配方未表现出显著的遗传毒性; 同时, 其脂肪酸的生物利用度与传统配方基本一致。

然而, 植物源活性成分的潜在安全风险仍需关注: 如高浓度的精油可能刺激胃肠道黏膜; 某些生物碱在大剂量下具有肝毒性或神经毒性; 此外, 植物提取物的添加可能改变发酵食品中生物胺的含量[68]。Skowron 等[68]在其关于发酵食品双重性的综述中指出, 植物来源的添加剂可能会影响发酵系统中的微生物群落结构, 从而影响生物胺和真菌毒素等有害代谢物的产生。

3.2　包装材料的迁移与检测

将植物源活性成分封装于包装材料中时, 活性物质向食品中的迁移行为是安全性评价的重要内容。Nian 等[69]系统评述了可降解活性包装中天然聚合物(壳聚糖、淀粉、纤维素、蛋白质)和合成可降解聚合物(聚乳酸、聚乙烯醇、聚乳酸-羟基乙酸共聚物)中活性剂的迁移特性, 指出美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)已批准聚乳酸和聚乳酸-羟基乙酸共聚物用于食品接触材料, 但其中活性成分迁移量需控制在安全阈值内。NATH 等[70]在纤维素基智能包装研究中指出, 甲基纤维素已获 FDA 安全认证, 但硝酸纤维素因其可燃性存在安全隐患。迁移检测方法主要包括食品模拟物浸泡试验、气相色谱-质谱法、高效液相色谱法以及紫外-可见分光光度法等[69–70]。

3.3　环境安全性与降解性

植物源活性成分及其载体材料的环境安全性是可持续发展的重要考量。Nian 等[69]研究表明, 壳聚糖、海藻酸钠、淀粉等天然多糖基包装材料生物降解性良好, 在堆肥条件下数周至数月内可完全降解。而聚乳酸等合成可降解聚合物虽能在工业堆肥条件下降解, 但在自然环境中降解速率较慢。Yin 等[71]在咖啡副产物功能性成分的综述中强调, 绿色提取技术(如超临界 CO_2 萃取、酶辅助提取)不仅

降低了有机溶剂使用量，还提高了提取物的食品级安全性。Batool 等[31]在可持续食品包装综述中也倡导采用可再生、可降解的生物聚合物替代传统石化塑料，以降低包装材料的环境足迹。

3.4 国内外法规现状与限量标准

针对植物源活性成分在食品中的应用，各国和地区制定了相应的法规与标准。在欧盟框架下，Garin-Murguialday 等[72]分析了生物保护培养物的法规监管体系，指出欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)的合格安全性推定(Qualified Presumption of Safety, QPS)体系要求对菌株进行全基因组测序层面的安全性评估，包括抗生素耐药性筛查。乳酸链球菌素/尼辛是目前欧盟唯一批准的细菌素类防腐剂。此外，植物提取物作为食品配料需符合欧盟《新型食品条例》EU Novel Food Regulation (EU 2015/2283)的要求[73–74]。

在美国，FDA 的 GRAS 体系是植物源食品添加剂安全性评价的主要途径。Flores 等[73]分析了天然来源硝酸盐/亚硝酸盐在肉制品中的化学和安全性问题，指出国际癌症研究机构基于亚硝胺生成风险，已将加工肉类列为 1 类致癌物，并提及美国与欧盟在蔬菜源硝酸盐作为腌制剂的法规认定上存在分歧。Savica 等[74]则呼吁重新审视和限制磷酸盐类食品添加剂的使用，认为欧盟《关于食品添加剂的第 1333/2008 号条例》未充分考虑其心血管风险。

在中国，GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》对食品添加剂的使用品种和限量做出了明确规定。植物源天然色素、天然香料等已列入允许使用的添加剂名单，但部分新型植物提取物(如特定精油纳米制剂)的法规归属尚不明确，有待进一步完善相关标准体系[3–4]。

4 结束语

4.1 研究进展总结

近年来，植物来源功能性活性成分在食品保鲜和功能强化领域均取得了一系列进展。在食品保鲜方面，随着纳米包封、微胶囊化和智能活性包装等技术的不断发展，有效改善了部分植物活性成分存在的稳定性不足、易挥发及水溶性低等问题，从而增强了其在肉制品、水产品、果蔬及谷物等各类食品中的保鲜应用效果[12,18,25]。在功能强化领域，包封与递送技术结合“清洁标签”理念为功能性食品开发提供了新思路。如花青素、茶多酚、姜黄素和精油等植物源活性成分经微囊化或纳米封装处理后，其在消化过程中的稳定性和生物利用度均有不同程度改善[55,58,75]。在安全性方面，细胞毒性和遗传毒性研究表明，在合理的剂量范围内，大多数植物活性成分没发现显著的安全风险，相关法规和标准体系也在逐步完善[67,72–73]。

4.2 现有问题与挑战

近年来相关研究取得了显著进展，但在实际应用和产业化过程中仍存在一些亟待解决的问题。首先，植物提取物的成分相对复杂，同一来源不同批次之间可能存在一差异，在一定程度上给质量控制和产品一致性带来了挑战[9]。其次，尽管纳米包封技术在实验研究中表现良好，但扩大工业生产时，成本高、工艺控制难度大等问题依然突出[18,23]；纳米载体尺寸微小，可能穿透肠道或体内其他生物屏障(如血脑屏障、胎盘屏障等)，其长期生物安全性已成为当前食品纳米技术领域最具争议的前沿问题之一。近年来研究表明，纳米载体长期低剂量膳食暴露可能引发非线性慢性炎症反应，且纳米载体与植物多酚之间可能存在协同毒性效应。某些纳米颗粒可通过诱导肠道菌群失调间接影响宿主健康，提示纳米-肠道微生态互作是未来安全性研究的重要方向。然而，目前完整长期生物安全与人群暴露评估数据匮乏，极大制约了产品的监管审批和市场推广[76]。此外，各国的相关法规和标准存在差异，部分新型植物活性成分监管归属尚不明确，增加了研发企业的合规成本[72–73]。

4.3 未来研究方向与趋势

食品领域植物源功能性活性成分研究正朝着多学科发展。Zhou 等[23]指出，整合多组学数据能从系统生物学角度分析活性成分、食品基质与人体健康的相互作用。数据驱动方法和数学建模技术用于配方优化与保质期预测模型，有助于提高研发效率并缩短产品开发周期[13]。微囊化技术与智能响应递送系统可实现多功能协同效应，在食品保鲜和营养递送领域展现出良好的应用前景[18,33]。“清洁标签”理念与提高食品加工副产品资源利用率结合也是现在研究的重要方向[71]。随着纳米技术的深入应用，未来需重点开发可生物降解的纳米载体，利用可持续且环保的纳米材料降低环境与健康风险；建立全球统一的纳米食品安全评估体系，并明确毒理学标准及标签要求[70,72]。综上所述，加强基础研究与产业应用的衔接，推动新型包装技术和递送系统的创新应用，是促进植物源活性成分在食品工业中实现更大规模应用的关键[26,58]。

参考文献

[1] World Health Organization. Food safety: key facts [EB/OL]. (2022) [2026-04-14]. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safetyWorldHealthOrganization (WHO).

[2] Karanth S, Feng S Y, Patra D, et al. Linking microbial contamination to food spoilage and food waste: the role of smart packaging, spoilage risk assessments, and date labeling [J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1198124.

[3] Fan Penghui, Han Haihong, Liu Jiakai, et al. Community incidence estimates of five pathogens based on foodborne diseases active surveillance-China, 2023 [J]. China CDC Weekly, 2024, 6(24): 574–579.

[4] Liu Jikai, Li Bai, Li Weiwei, et al. Trends of foodborne diseases in China:

lessons from laboratory-based surveillance since 2011 [J]. Frontiers of Medicine, 2018, 12(1): 48–57.

[5] Odeyemi A N, Joseph M, Udoaka F C, et al. Listeriosis: a re-emerging threat to public health: a comprehensive review of its epidemiology, pathogenesis, and control measures [J]. Infection, 2026, 54(3): 1191–1202.

[6] Asioli D, Aschemann-Witzel J, Caputo V, et al. Making sense of the “clean label” trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications [J]. Food Research International, 2017, 99: 58–71.

[7] Fărcaş A C, Socaci S A, Nemeş S A, et al. Cereal waste valorization through conventional and current extraction techniques-an up-to-date overview [J]. Foods, 2022, 11(16): 2454.

[8] Chauhan K, Rao A. Clean-label alternatives for food preservation: an emerging trend [J]. Heliyon, 2024, 10(16): e35815.

[9] Zhang Xinyu, Wu Zhiqian, Corke H, et al. Interactions of anthocyanidin compounds (ANCs) with nutrients in food: a review [J]. Food Research International, 2026, 226: 118083.

[10] Supaphol P, Ngamplang P. Cyclodextrin-enhanced edible coatings for extending shelf life of perishable foods: a comprehensive review with emphasis on fruits and vegetables [J]. Carbohydrate Polymers, 2026, 380: 125063.

[11] Zhu Anyu, Ji Hongfang, Shen Liang. Advances in synthesis of synbiotic microcapsules with oligosaccharides and polysaccharides and their biomedical applications [J]. Food Research International, 2025, 218: 116949.

[12] 赵亚珠, 刘光发, 魏娜, 等. 基于植物精油的抗菌活性包装在食品保鲜中的研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(11): 55–63.
Zhao Yazhu, Liu Guangfa, Wei Na, et al. A review of antimicrobial active packaging based on plant essential oils and its application in food preservation [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(11): 55–63.

[13] Soni M, Yadav A, Maurya A, et al. Advances in designing essential oil nanoformulations: an integrative approach to mathematical modeling with potential application in food preservation [J]. Foods, 2023, 12(21): 4017.

[14] Upadhyay N, Singh V K, Dwivedy A K, et al. Assessment of nanoencapsulated *Cananga odorata* essential oil in chitosan nanopolymer as a green approach to boost the antifungal, antioxidant and *in situ* efficacy [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 171: 480–490.

[15] Xu Wei, Jia Xiyu, Yang Mingchuan, et al. Tea polyphenol self-assembly nanocomposite coating for fruit preservation [J]. ACS Nano, 2025, 19(31): 28146–28159.

[16] Menikheim C B, Mousavi S, Bereswill S, et al. Polyphenolic compounds in the combat of foodborne infections-an update on recent evidence [J]. European Journal of Microbiology & Immunology, 2024, 14(2): 116–125.

[17] Ivane N M A, Elysé F K R, Haruna S A, et al. The anti-oxidative potential of ginger extract and its constituent on meat protein isolate under induced Fenton oxidation [J]. Journal of Proteomics, 2022, 269: 104723.

[18] Cui Fangchao, Zhang Huawei, Wang Dangfeng, et al. Advances in the preparation and application of microencapsulation to protect food functional ingredients [J]. Food & Function, 2023, 14(15): 6766–6783.

[19] Zheng Mengli, Liu Yating, Zhang Guangfeng, et al. The antioxidant properties, metabolism, application and mechanism of ferulic acid in medicine, food, cosmetics, livestock and poultry [J]. Antioxidants, 2024, 13(7): 853.

[20] Li Yanfei, Zhang Huan, Zhao Yan, et al. Encapsulation and characterization of proanthocyanidin microcapsules by sodium alginate and carboxymethyl cellulose [J]. Foods, 2024, 13(5): 740.

[21] Pereira A G, Perez-Vazquez A, Barciela P, et al. Bioactive nanoemulsions for enhancing sausage and meat patty shelf-life [J]. Foods, 2026, 15(3): 430.

[22] Zeinali T, Alemzadeh E, Zarban A, et al. Fabrication and characterization of jujube extract-loaded electrospun polyvinyl alcohol nanofiber for strawberry preservation [J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(11): 6353–6361.

[23] Zhou Changqian, Li Changzhu, Cui Haiying, et al. Metabolomics insights into the potential of encapsulated essential oils as multifunctional food additives [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(15): 5143–5160.

[24] Grover S, Aggarwal P, Kumar A, et al. Microencapsulation-based valorization of galgal (*Citrus pseudolimon* L.) peel oil: Toward sustainable food protection solutions [J]. Chemistry & Biodiversity, 2026, 23(3): e02450.

[25] Li Jiaxin, Bao Yiwen, Li Zhiying, et al. Dual-function *β*-cyclodextrin/starch-based intelligent film with reversible responsiveness and sustained bacteriostat-releasing for food preservation and monitoring [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127168.

[26] Chen Kai, Zhang Min, Bhandari B, et al. 3D printed cinnamon essential oil/banana peel carbon dots loaded corn starch/gelatin bilayer film with enhanced functionality for food packaging application [J]. Food Chemistry, 2024, 448: 139176.

[27] Xue Jiawei, Ma Changyao, Yang Shuqi, et al. Janus hydrogel loaded with a CO_2-generating chemical reaction system: construction, characterization, and application in fruit and vegetable preservation [J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140271.

[28] Nian Linyu, Xie Yao, Sun Xiaoyang, et al. Chitosan quaternary ammonium salt/gelatin-based biopolymer film with multifunctional preservation for perishable products [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 228: 286–298.

[29] Coelho F, de Souza V G L, Silva P M, et al. Advanced bacteriophage-loaded nanofiber coatings for active food packaging [J]. Food and Bioprocess Technology, 2026, 19(5): 220.

[30] Christoskova N, Todorova M, Nikolova S, et al. From plants to packaging: the role of natural waxes in sustainable food preservation [J]. International Conference on Economics, Business, Management, 2026, 2(1): 251–262.

[31] Batool S S, Javaid S, Rehman S U, et al. Green innovations in food packaging: sustainable biopolymeric films infused with nanoencapsulated essential oils [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2026: jsfa. 70585.

[32] Rajashekar Y, Devaraja A, Keshava Murthy P S, et al. Integrated strategies combining plant derived bioactive compounds and modified atmosphere packaging to enhance safety and stability of ready-to-eat foods: a review [J]. Food Research International, 2026, 228: 118421.

[33] Zhou Hui, Yuan Wenying, Xu Chenfeng, et al. Hydrogel-based systems with nanoparticle and microencapsulation for food preservation: preparation, characterization, and application [J]. Food Chemistry: X,

2026, 33: 103489.

[34] 付晓航, 张顺亮, 臧明伍, 等. 植物活性成分在肉制品防腐保鲜中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(6): 41–50.
Fu Xiaohang, Zhang Shunliang, Zang Mingwu, et al. Advances in application of natural active ingredients from plants in preservation of meat products [J]. Meat Research, 2023, 37(6): 41–50.

[35] Delgado-Pando G, Ekonomou S I, Stratakos A C, et al. Clean label alternatives in meat products [J]. Foods, 2021, 10(7): 1615.

[36] Karim H, Boubaker H, Askarne L, et al. Use of *Cistus aqueous* extracts as botanical fungicides in the control of *Citrus sour* rot [J]. Microbial Pathogenesis, 2017, 104: 263–267.

[37] Deepika, Singh A, Chaudhari A K, et al. *Zingiber zerumbet* L. essential oil-based chitosan nanoemulsion as an efficient green preservative against fungi and aflatoxin B_1 contamination [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(1): 149–160.

[38] Duong T H, Dinh K B, Luu T, et al. Nanoengineered sustainable antimicrobial packaging: integrating essential oils into polymer matrices to combat food waste [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(9): 5887–5901.

[39] Zeng Rui, Liu Ying, Lu Yue, et al. A cinnamon and clove essential oil mix microencapsulated with hydroxypropyl-*β*-cyclodextrin: study on physicochemical, antibacterial, and low salt pickles preservation properties [J]. Food Chemistry, 2025, 471: 142817.

[40] Zamuz S, López-Pedrouso M, Barba F J, et al. Application of hull, bur and leaf chestnut extracts on the shelf-life of beef patties stored under MAP: evaluation of their impact on physicochemical properties, lipid oxidation, antioxidant, and antimicrobial potential [J]. Food Research International, 2018, 112: 263–273.

[41] Mohammadzadeh P, Marand S A, Almasi H, et al. Bacterial nanocellulose-based nanopaper activated by *β*-cyclodextrin/*Salvia officinalis* essential oil complexes for shelf life extension of shrimp [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275: 133354.

[42] Varas Condori M A, Arias-Santé M F, Bridi R, et al. Phenolics of maqui leaf residues exhibit antioxidant properties against ozone-induced oxidation in fish model systems [J]. Antioxidants, 2025, 14(3): 263.

[43] Cheng Zheng, Nong Xinmei, Ning Mei, et al. Development of polylactic acid aluminized film/cellulosic paper composite paper-based material for herba houttuyniae preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2026, 337: 149439.

[44] 苏子寒, 高兆银, 胡美姣, 等. 16 种植物源活性成分对 2 种芒果采后病害的防治[J]. 热带生物学报, 2019, 10(1): 28–33.
Su Zihan, Gao Zhaoyin, Hu Meijiao, et al. Effects of plant-based active ingredients on postharvest diseases of mango fruit [J]. Journal of Tropical Biology, 2019, 10(1): 28–33.

[45] Hajian-Maleki H, Baghaee-Ravari S, Moghaddam M. Herbal essential oils exert a preservative effect against the potato soft rot disease [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 285: 110192.

[46] Chaudhari A K, Dwivedy A K, Singh V K, et al. Essential oils and their bioactive compounds as green preservatives against fungal and mycotoxin contamination of food commodities with special reference to their nanoencapsulation [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(25): 25414–25431.

[47] Miłek M, Sidor E, Bonikowski R, et al. An innovative method of obtaining herbal *Propolis* Extracts and application of its spray-dried form as natural food preservatives [J]. International Journal of Food Science, 2025, 2025: 5546802.

[48] Aussanasuwannakul A, Butsuwan P. Evaluating microbiological safety, sensory quality, and packaging for online market success of roasted pickled fish powder [J]. Foods, 2024, 13(6): 861.

[49] Homayouni Rad A, Karbalaei F, Ali Torbati M, et al. Effect of *Hibiscus* sabdariffa and *Camellia* synensis extracts on microbial, antioxidant and sensory properties of ice cream [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(2): 735–744.

[50] Mandal D, Sarkar T, Chakraborty R. Critical review on nutritional, bioactive, and medicinal potential of spices and herbs and their application in food fortification and nanotechnology [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2023, 195(2): 1319–1513.

[51] Yuan Yongkai, Ma Mengjie, Zhang Shuaizhong, et al. Efficient utilization of tea resources through encapsulation: Dual perspectives from core material to wall material [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(3)1310–1324

[52] Jin S C, Choi Y Y, Song M, et al. Osteo-F, a newly developed herbal formula, ameliorates osteoarthritis through the NF-*κ*B/I*κ*B/JNK pathway based on network pharmacology [J]. Food Science & Nutrition, 2025, 13(5): e70239.

[53] 张子睿, 田金虎, 张惠玲, 等. 葡萄籽原花色素对马铃薯馒头中淀粉消化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 234–240.
Zhang Zirui, Tian Jinhu, Zhang Huiling, et al. Effect of grape seed proanthocyanidins on starch digestible properties in potato steamed bread [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(7): 234–240.

[54] Aamir M, Abid A, Azam I, et al. Characterization of carbonated beverage fortified with chamomile herbal extract [J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12(6): 4353–4361.

[55] 方晓峰. 甘蓝红营养强化型酥性饼干的制备与体外消化特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
Fang Xiaofeng. Advances in application of natural active ingredients from plants in preservation of meat products [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.

[56] Fernandes B, Oliveira M C, Marques A C, et al. Microencapsulation of essential oils and oleoresins: applications in food products [J]. Foods, 2024, 13(23): 3873.

[57] Agarry I E, Ding D S, Cai T, et al. Inulin-whey protein as efficient vehicle carrier system for chlorophyll: optimization, characterization, and functional food application [J]. Journal of Food Science, 2023, 88(8): 3445–3459.

[58] Zhang Ruoning, Mao Like, Lu Yao, et al. Interface and bulk phase engineering in water-in-oil high internal phase emulsion: a clean-label strategy for stabilization and application [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(5): e70247.

[59] Ishchenko S, Złotek U. Herbal and spice additives in functional confectionery products: a review [J]. Molecules, 2025, 30(16): 3449.

[60] Kozlowska M, Zbikowska A, Marciniak-Lukasiak K, et al. Herbal extracts incorporated into shortbread cookies: impact on color and fat quality of the cookies [J]. Biomolecules, 2019, 9(12): 858.

[61] 刘丹, 陈云, 朱双杰, 等. 植物活性成分特性及其在面制品中的应用[J]. 滁州学院学报, 2022, 24(5): 30–35.

Liu Dan, Chen Yun, Zhu Shuangjie, et al. Characteristics of plant active components and their application in flour products [J]. Journal of Chuzhou University, 2022, 24(5): 30–35.

[62] Martínez-Zamora L, Peñalver R, Ros G, et al. Substitution of synthetic nitrates and antioxidants by spices, fruits and vegetables in Clean label Spanish chorizo [J]. Food Research International, 2021, 139: 109835.

[63] Yong H I, Kim T K, Choi H D, et al. Clean label meat technology: pre-converted nitrite as a natural curing [J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2021, 41(2): 173–184.

[64] Vieira M R, Simões S, Carrera-Sánchez C, et al. Development of a clean label mayonnaise using fruit flour [J]. Foods, 2023, 12(11): 2111.

[65] Câmara A K F I, Vidal V A S, Santos M, et al. Reducing phosphate in emulsified meat products by adding *Chia* (*Salvia hispanica* L.) mucilage in powder or gel format: a clean label technological strategy [J]. Meat Science, 2020, 163: 108085.

[66] Park S, Kim Y R. Production of clean-label starch using physically treated starch blending and its application as a xanthan gum substitute [J]. Food Science and Biotechnology, 2025, 34(9): 1949–1956.

[67] Di Nunzio M, Loffi C, Montalbano S, et al. Cleaning the label of cured meat; effect of the replacement of nitrates/nitrites on nutrients bioaccessibility, peptides formation, and cellular toxicity of *in vitro* digested salami [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(20): 12555.

[68] Skowron K, Budzyńska A, Grudlewska-Buda K, et al. Two faces of fermented foods-the benefits and threats of its consumption [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 845166.

[69] Nian L Y, Wang M J, Sun X Y, et al. Biodegradable active packaging: components, preparation, and applications in the preservation of postharvest perishable fruits and vegetables [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(8): 2304–2339.

[70] Nath P C, Sharma R, Mahapatra U, et al. Sustainable production of cellulosic biopolymers for enhanced smart food packaging: an up-to-date review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 273: 133090.

[71] Yin Hao, Jiang Yongli, Zhong Yu, et al. Upcycling coffee by-products into functional ingredients: a review on sustainable processing, health benefits, and food applications [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2026, 25(1): e70401.

[72] Garín-Murguialday N, Virto R, Pagán R, et al. Bioprotective cultures as a clean label strategy for food preservation: From concept to market [J]. Food Research International, 2026, 230: 118605.

[73] Flores M, Toldrá F. Chemistry, safety, and regulatory considerations in the use of nitrite and nitrate from natural origin in meat products-invited review [J]. Meat Science, 2021, 171: 108272.

[74] Savica V, Maiolino G, Calò L A. To reconsider (limit) the use of phosphate based food and beverages additives. A real need for health preservation [J]. Clinical Nutrition, 2016, 35(1): 240.

[75] 王静雅, 兰慧芳, 周冰, 等. 封装生物活性物质进行乳及乳制品营养强化的研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2025, 48(6): 41–50.
Wang Jingya, Lan Huifang, Zhou Bing, et al. Advances in encapsulation technologies for bioactive compounds in nutritionally fortified milk and dairy products [J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2025, 48(6): 41–50.

[76] Han Kangran, Yang Haixia, Fan Daidi, et al. Advances in nanotechnology research in food production, nutrition, and health [J]. Nutrients, 2025, 17(15): 2443.

(责任编辑: 蔡世佳　韩晓红)