DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260509003
引用格式: 罗丹, 何丹, 刘婧玮, 等. 天然食品保鲜技术及碳点的智能指示一体化研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(15): 206–215.
Luo Dan, He Dan, Liu Jingwei, et al. Research progress on the integration of natural food preservation technology and intelligent indication of carbon dots [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(15): 206–215. (in Chinese with English abstract).

天然食品保鲜技术及碳点的智能指示一体化研究进展

罗　丹, 何　丹, 刘婧玮*, 刘若海

(四川省轻工业研究设计院有限公司, 成都　610081)

摘　要: 食品保鲜技术是保障食品安全、延长食品货架期、减少资源浪费的关键手段，其本质是通过先进技术抑制食源性致病菌的增殖, 减缓酶促反应与氧化劣变进程, 降低营养物质损耗, 从而保持食品固有的感官特性与品质。随着消费者健康意识的提升和“清洁标签”理念的普及, 天然保鲜技术因具有绿色天然、安全无毒、广谱抗菌等优势, 逐渐成为食品行业的研究热点与主流发展趋势。本文全面梳理了植物源、动物源、微生物源三类天然保鲜技术的应用瓶颈和作用原理, 及其在果蔬、肉制品、水产品、乳制品等领域的研究现状; 在此基础上, 重点阐述了以碳点(carbon dots, CDs)为核心的新型保鲜技术, 及其推动天然保鲜与智能指示一体化发展的作用机制, 旨在为食品行业天然保鲜技术的研究及应用提供参考。

关键词: 食品保鲜; 天然保鲜技术; 碳点; 智能指示
中图分类号: TS205; S984.2+1　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)15–0206–10

Research progress on the integration of natural food preservation technology and intelligent indication of carbon dots

LUO Dan, HE Dan, LIU Jing-Wei*, LIU Ruo-Hai

(*Sichuan Light Industry Research and Design Institute Co*., *Ltd*., *Chengdu* 610081, *China*)

ABSTRACT: Food preservation technology is a key means to ensure food safety, extend food shelf life, and reduce resource waste. Its essence is to use advanced technology to inhibit the proliferation of food-borne pathogenic bacteria, slow down the process of enzymatic reactions and oxidative deterioration, and reduce the loss of nutrients, thereby maintaining the inherent sensory characteristics and quality of food. With the improvement of consumers' health awareness and the popularization of the "clean label" concept, natural preservation technology has gradually become a research hotspot and mainstream development trend in the food industry because of its advantages such as green, natural, safe and non-toxic and broad-spectrum antibacterial. This article comprehensively combed the application bottlenecks and working principles of 3 types of natural preservation technologies from plant sources, animal sources

收稿日期: 2026-05-09
基金项目: 四川省区域创新合作项目(26QYCX0766); 成都市技术创新研发项目(2025-YF05-00612-SN)
第一作者: 罗丹(1991—), 女, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为食品保鲜、食品质量检测、材料工程。E-mail: luodan211003@163.com
***通信作者:** 刘婧玮(1989—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品科学。E-mail: liujingwei@sclii.com

and microbial sources, as well as their research status in the fields of fruits and vegetables, meat products, aquatic products, dairy products, etc. On this basis, it focused on the new preservation technology with carbon dots (CDs) as the core and its mechanism of promoting the integrated development of natural preservation and intelligent indication, aiming to provide reference for the research and application of natural preservation technology in the food industry.

KEY WORDS: food preservation; natural preservation technology; carbon dots; intelligent instructions

0　引　言

作为人类生存与发展的基本物质保障, 食品的新鲜度直接关乎食品安全、营养供给与产业经济价值。据联合国粮食及农业组织统计, 在全球范围内, 每年约有 13 亿吨食品在原料采收、生产加工、包装、运输、贮藏及流通销售等环节中, 遭受昆虫、寄生虫与微生物的侵染, 发生酶促反应, 导致食品腐败变质[1], 直接造成数亿元的经济损失[2−3]。与此同时, 相较于发达国家平均 5%的腐损率而言, 我国生鲜食品配送过程中腐损率达 10%, 果蔬腐损率甚至达到了 15%[4]。因此, 食品保鲜技术对食品产业发展进程具有十分关键的地位。

当前食品保鲜领域, 化学保鲜剂、低温处理与真空包装等物理方法仍是主流应用手段。但化学保鲜剂易出现残留, 具有潜在的健康风险; 物理保鲜则存在保鲜效果有限、适用场景受限等不足[5]。与之相比, 天然保鲜技术响应了绿色环保发展理念, 具有安全无毒、来源丰富、抗菌谱广等特点, 可有效延长食品保质期, 现已成为食品安全及包装领域的重点研究方向[6]。本文基于国内外相关研究成果, 系统综述了天然保鲜技术在食品保鲜领域的研究, 及其从抑菌到监测演进过程中的智能指示一体化发展, 为食品保鲜行业提供理论基础与实践参考。

1　天然保鲜技术的分类

食品发生腐败变质, 主要由微生物大量增殖、酶促反应、氧化作用以及水分散失等因素引发。为此, 天然保鲜技术的关键在于从植物、动物及微生物等天然原料中分离提取功能性活性成分[7], 这类天然活性成分能够通过破坏微生物细胞结构、扰乱其代谢过程等机制抑制腐败菌生长, 或通过阻断自由基链式反应, 螯合金属离子, 消耗体系内活性氧等方式降低呼吸强度, 进而延缓食品的腐败与氧化劣变。

依据原料来源划分, 天然保鲜技术主要包含植物源、动物源与微生物源 3 种类型。各类技术的作用原理呈现出多样性和特异性, 部分技术可通过协同作用提升保鲜效果。

1.1　植物源天然保鲜技术

1.1.1　植物源天然保鲜技术的活性物质来源

植物源保鲜技术是目前市场上应用最广泛的天然保鲜技术类别[6], 除具有天然抗菌抗氧化等固有的优点外, 同时具备安全性高、热稳定性优良等特点, 能够稳定且高效地实现保鲜作用[7]。植物源保鲜物质主要提取自果蔬[8]、中草药[9]、香辛料[10]等, 其功能活性成分多为多酚、黄酮、植物精油与多糖等物质[7]。Huang 等[11]从药食两用原料中提取肉桂醛、丁香酚、百里酚等活性成分, 研究其对大肠杆菌、沙门氏菌、单增李斯特菌等食源性致病菌与腐败菌的抑制作用。韩磊等[12]则系统综述了天然香辛料在肉制品中发挥的抗氧化、抑菌以及调味、增香、护色等功效。

1.1.2　植物源天然保鲜技术作用原理

各类植物中的天然活性成分具备优异的抑菌保鲜效果, 其核心是通过靶向作用于微生物细胞结构、能量代谢系统、生物合成过程及膜电位平衡等关键环节进行多维度干扰, 进而抑制微生物生长繁殖, 达到保鲜效果。

破坏微生物细胞结构, 损伤细胞膜完整性。天然保鲜剂中的活性物质可损伤细胞壁结构, 改变膜的通透性与流动性, 阻碍营养物质吸收与代谢产物排出, 使微生物因营养匮乏而停止增殖[13]。如植物多酚会造成微生物细胞质膜破损、蛋白质泄漏; 植物精油能够破坏微生物细胞膜结构, 导致菌体脱落, 并使胞内核酸、蛋白质等重要物质大量外泄, 同时阻碍菌丝体对营养物质的摄取, 且抑制作用随作用时间延长而不断增强; 黄酮类物质渗入菌体内部后, 会破坏细胞膜的正常生理代谢, 最终导致细胞凋亡。

干扰微生物代谢过程, 阻断能量合成通道。植物多酚可通过阻碍细菌三磷酸腺苷(triphosadenine, ATP)合成、降低能量代谢效率, 干扰菌体代谢与能量生成过程, 从而抑制细菌的正常生长繁殖[14]。例如白藜芦醇可彻底抑制大肠杆菌 ATP 合成酶的生成[15]; 丁子香酚、肉桂醛等精油组分则会抑制微生物对葡萄糖的摄取与利用, 干扰其能量代谢途径[6]。赵佳轩[16]研究表明, 肉桂精油除作用于细胞膜外, 还可作用于菌体 ATP 合成酶的 α 链蛋白, 进而实现对细胞生长的抑制。

抑制生物大分子合成, 阻断微生物增殖根源。茶多酚等活性物质可进入微生物细胞内部, 抑制核酸与蛋白质的合成及表达, 干扰遗传物质的复制流程, 从根源上抑制微生物的生长与增殖[17]。

扰乱膜电位平衡, 破坏菌体生理稳态。植物多酚可对微生物膜电位产生调控作用, 使其出现去极化或超极化现象, 扰乱菌体正常生理代谢, 从而抑制其生长与增殖[14]。

1.2　动物源天然保鲜技术

1.2.1　动物源天然保鲜技术的活性物质来源

动物源天然保鲜剂是来自动物机体组织、具有保鲜防

腐作用的食品添加剂，原料来源十分广泛，主要成分为多糖、天然多肽及氨基酸等[18]，蜂胶、鱼精蛋白、壳聚糖(chitosan, CS)、溶菌酶等均为常见种类[7]。溶菌酶可通过水解革兰氏阳性菌细胞壁肽聚糖中的 β-1, 4-糖苷键，破坏细胞壁完整性，最终使菌体破裂失活[19−20]。周典[21]将溶菌酶与百里香精油脂质体复配应用于牛肉保鲜，结果表明该复配体能有效延缓牛肉成熟进程，缓解脂肪氧化并降低挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)产生量，保鲜效果显著。

1.2.2 *动物源天然保鲜技术作用原理*

溶菌酶、鱼精蛋白、CS、蜂胶等天然蛋白与多糖类保鲜物质，具有安全高效的食品防腐功能，其主要依托破坏细胞结构、阻隔物质能力交换、干预菌体代谢及剥夺生物营养等途径作用于微生物或食品基质，达到抑制微生物增殖，延缓食品腐败变质的目的。

破坏细胞屏障结构，扰乱渗透生理功能。动物源天然蛋白及多糖类物质可通过结合、破坏细胞屏障结构，改变细胞膜通透性与渗透调节能力，引发胞内物质渗漏、细胞结构失衡，进而导致菌体裂解失活。其中，溶菌酶作为阳离子蛋白，可通过静电作用与细菌细胞膜磷脂结合并形成孔隙，即便不水解肽聚糖，也能引发细胞膜内容物渗漏，最终致使菌体裂解[22]。鱼精蛋白可与微生物细胞壁靶向结合并抑制其正常形成，同时干预细胞膜生理功能，改变菌体渗透调节机制，进而降低其能量转换与营养摄取效率[7,23]。CS 可有效改变微生物细胞膜通透性，干扰细胞内外物质与气体交换，打破菌体生理稳态[24]。

构建物理防护屏障，阻断物质交换通路。部分动物源保鲜物质可通过成膜特性在微生物表面或食品表层构建致密物理阻隔层，双重实现抑菌与食品保鲜效果。如蜂胶可在细菌表面形成致密膜层，阻断物质交换，使代谢废物蓄积并导致菌体失活；同时蜂胶还能通过降低水果等食品的氧含量、减少呼吸强度和水分蒸发，延缓食品自身的有机物分解，实现防腐保鲜[25]。

干扰生物合成代谢，剥夺微生物关键营养。动物源多糖与蛋白类物质的抑菌机制具有明显的分子量差异性和靶向性，其可根据自身分子量及结构特性，多路径干扰微生物胞内生物合成与能量代谢，同时通过营养剥夺方式抑制菌体增殖。在 CS 的抑菌作用中，低分子量 CS 可干扰细菌胞内 RNA、蛋白质合成及线粒体功能，全面抑制菌体代谢；高分子量 CS 则可与菌体包膜结合，阻碍营养物质进入细胞，抑制大分子合成代谢，最终造成细胞破裂[7,26]。此外，乳铁蛋白可螯合环境中的游离铁离子，剥夺微生物生长所需的营养元素，造成菌体营养匮乏，生长代谢减缓，以此实现抑菌效果。

1.3 微生物源天然保鲜技术

1.3.1 *微生物源天然保鲜技术的活性物质来源*

微生物源天然保鲜物质由微生物代谢产生的抗菌肽、聚氨基酸、抑菌活性代谢物等功能性成分组成，是通过微生物发酵、培养、提取得到的能够抑制食品系统中腐败菌和致病菌生长的微生物及其代谢产物。较为典型的微生物源保鲜物质包括乳酸链球菌素、ε-聚赖氨酸、纳他霉素等。其中，ε-聚赖氨酸是白色链霉菌的代谢产物，可抑制多种腐败菌的生长[27]。乳酸链球菌素可与菌体细胞壁结合并形成孔洞，造成胞内物质外泄，对多种革兰氏阳性菌具有显著抑菌效果[28−29]。刘启超[30]将乳酸链球菌素、CS、茶多酚与溶菌酶复配应用于冷鲜鸭肉保鲜研究，结果显示，经复合保鲜剂处理后的鸭肉货架期可有效延长 7 d[31]。

1.3.2 *微生物源天然保鲜技术作用原理*

微生物源天然保鲜技术主要通过破坏微生物细胞结构、阻滞菌体生长增殖、调控基因转录与毒素合成等多维度靶向干预食品中微生物的生命活动，全方位抑制食品腐败菌与致病菌的繁殖，是极具应用优势的天然保鲜技术。

破坏菌膜结构，损毁细胞完整性。微生物源天然保鲜活性物质可结合细胞表层结构，破坏细胞膜稳定性，使细胞营养物质外泄，最终导致菌体凋亡。其中，乳酸链球菌素作为典型的微生物源抗菌肽，可与革兰氏阳性菌细胞壁结合，并在细胞膜上形成孔洞，造成胞内物质渗漏，最终致使菌体丧失活性并凋亡[29]；而 ε-聚赖氨酸具有广谱抑菌性，可损伤微生物细胞膜，抑制革兰氏阳/阴性菌、霉菌等多种腐败菌的膜功能[27]。

胁迫生长环境，抑制微生物增殖代谢。微生物源天然保鲜技术可通过活性物质调控食品微环境，释放抑菌物质，进而阻滞微生物生长。纳他霉素可强效抑制霉菌、酵母菌等真菌的增殖，并阻止丝状真菌合成黄曲霉毒素，减少食品真菌毒素污染[32−33]。此外，乳酸菌产生的有机酸、过氧化氢等活性物质可有效降低食品体系 pH，形成抑制腐败菌生长的酸性环境；同时，其代谢产生的细菌素类物质兼具高抗菌活性与食品适配性，在抑菌的同时可较好保留食品原有感官品质。

调控基因转录，阻断毒素合成积累。除了破坏微生物结构与胁迫生长环境外，部分微生物源天然保鲜技术的活性物质可深入调控微生物胞内基因的表达，从根源上实现抑菌及阻断毒素积累。如乳酸链球菌素能够影响细菌关键功能基因的转录过程，有效抑制菌体生长与毒素生成，从根源上降低食源性致病菌带来的安全风险[7]。

1.4 植物源、动物源、微生物源 3 类保鲜技术的横向对比分析

植物源、动物源、微生物源 3 类天然保鲜技术均是从植物、动物、微生物 3 类不同原材料中提取出的功能性活性成分，这些活性成分可以通过破坏食品体系的微生物细胞结构、干扰微生物代谢、抑制细胞增殖等方式，达到抑菌及保鲜效果。植物源、动物源、微生物源 3 类保鲜技术的对比如表 1 所示。

表 1　植物源、动物源、微生物源 3 类保鲜技术的对比

Table 1　Comparative of 3 kinds of preservation technologies: plant sources, animal sources and microbial sources

天然保鲜技术分类	活性物质来源	活性成分	作用原理
植物源天然保鲜技术	果蔬、中草药、香辛料等	多酚、黄酮、植物精油与多糖等物质, 如肉桂醛、丁香酚、百里酚等	破坏微生物细胞结构, 损伤细胞膜完整性; 干扰微生物代谢过程, 阻断能量合成通道; 抑制生物大分子合成, 阻断微生物增殖根源; 扰乱膜电位平衡, 破坏菌体生理稳态
动物源天然保鲜技术	动物机体组织	多糖、天然多肽及氨基酸等, 如蜂胶、鱼精蛋白、CS、溶菌酶等	破坏细胞屏障结构, 扰乱渗透生理功能; 构建物理防护屏障, 阻断物质交换通路; 干扰生物合成代谢, 剥夺微生物关键营养
微生物源天然保鲜技术	微生物发酵、培养、提取	可抑制腐败菌和致病菌生长的微生物及代谢产物, 如乳酸链球菌素、ε-聚赖氨酸、纳他霉素等	破坏菌膜结构, 损毁细胞完整性; 胁迫生长环境, 抑制微生物增殖代谢; 调控基因转录, 阻断毒素合成积累

2　天然保鲜技术在不同领域的研究现状

目前, 天然保鲜技术凭借绿色安全的优势, 在果蔬、肉制品、水产品、乳制品等多个食品领域形成了单一组分、多元复配、涂膜包装等多种应用形式。各类技术虽能有效延缓食品腐败, 但仍存在长效性不足、风味适配性差、产业化落地仍有诸多短板亟待完善。

2.1　果蔬领域的天然保鲜技术

果蔬在加工储运中易受微生物侵染腐烂, 采后损耗率高, 而化学防腐剂易残留并危害人体健康[7], 因此安全高效的新型保鲜技术备受关注与研究。刘新宇[34]以刺儿草为碳源制备碳点(carbon dots, CDs)后与甘油、CS 结合, 成功开发出低成本环保型抗菌薄膜 CS/G-CDs, 实验结果显示, 采用CS/G-CDs复合薄膜处理的蓝莓, 保鲜期可达 13 d, 较单纯使用 CS 薄膜的组别延长近 8 d。文献[35–36]研究证实, 在气调保鲜条件下, 负载海带 CDs 的 CS 涂膜对鲜切黄瓜上多种致病菌与真菌均有明显抑制效果, 抗菌谱广且效果显著。综合当前研究现状可知, 果蔬天然保鲜技术已从单一成分抑菌护色, 逐步转向多组分复配、功能改性、物理-生物协同的多元化发展模式, 尤其是高分子涂膜的保鲜形式已成为果蔬采后保鲜的主流研究方向。

2.2　肉制品领域的天然保鲜技术

肉类因蛋白质、脂肪含量高, 极易受微生物污染而腐败。酚类及富含酚类的植物提取物抗菌效果突出, 可抑制肉制品中金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等致病菌与腐败菌生长, 有效延长货架期并提升品质[15]。王清等[31]经响应面优化确定复合保鲜剂最佳配比为 0.21%茶多酚、0.08%乳酸链球菌素与 0.25%抗坏血酸, 能将富硒酱板鸭保鲜期延长约 9 d。朱亚等[37]采用 1.5%溶菌酶与 0.5%茶多酚复配处理鲜肉, 可明显抑制微生物生长, 降低挥发性盐基氮与过氧化值上升速率, 有效延缓腐败, 将保质期延长 3~6 d。Lin 等[38]开发的 CS/N-CDs 复合膜, 在猪肉活性包装中表现出良好应用前景, 该体系中 CS 与掺杂了 N 原子的 CDs 协同抑菌, 同时提升的抗氧化性与氧气阻隔性能可延缓猪肉红度值 a^* 变化, 可减少营养流失[36]。该研究不仅通过多组分复配实现协同增效, 还采用以 CDs 为核心的新型天然功能性包装膜技术, 为肉制品智能包装的开发提供了新型技术思路。

2.3　水产品领域的天然保鲜技术

水产品中水分和蛋白质含量高、不饱和脂肪酸较多, 在贮藏与加工过程中更易因脂质氧化、肌肉蛋白酶解自溶及微生物滋生等发生腐败变质[7]。不同类型的天然保鲜物质可针对水产品腐败的不同诱因, 发挥特异性抗氧化、抑菌护质防护作用, 有效延长水产品的货架期。王睿等[39]研究显示, 在金鲳鱼腌制和风干过程中, 茶多酚因富含多羟基活性基团, 具有良好的自由基清除能力, 能够显著降低其挥发性盐基氮与硫代巴比妥酸值。Islam 等[40]充分发挥生姜提取物中姜辣素和挥发油等活性成分的抗氧化和广谱抑菌功能, 采用 15%生姜提取物浸泡罗非鱼, 有效抑制鱼肉脂质氧化与腐败微生物生长, 并延长其保质期至 12 d。单一天然保鲜成分往往作用途径单一, 而多组分复配保鲜剂可充分发挥抗氧化、抑菌、护质等协同作用。邓文静等[41]通过银耳多糖、乳酸链球菌素与溶菌酶复配的保鲜剂应用于南美白对虾, 使贮藏期延长 3~4 d, 银耳多糖的成膜性可阻隔氧气与微生物侵染; 乳酸链球菌素与溶菌酶可协同破坏腐败菌细胞膜结构, 强效抑制嗜冷菌等有害微生物增殖。由此可见, 相较于单一保鲜成分, 复配型天然保鲜剂凭借多靶点、协同增效的优势, 是未来水产品绿色保鲜技术的主要发展方向。

2.4　乳制品领域的天然保鲜技术

乳制品营养丰富, 贮藏时易受微生物污染导致酸败, 目前应用于乳制品的天然保鲜研究多聚焦于微生物源、动物源、植物源制剂及新型保鲜技术的开发应用。其中, 微生物源天然保鲜剂是目前乳制品领域应用最成熟、适配性最高的绿色保鲜组分, Sozbilen 等[42]发现, 溶菌酶与乳酸链球菌素复配可显著抑制牛奶中李斯特菌生长, 提高乳制品安全性。Lopes 等[43]利用果胶包被磷脂酰胆碱脂质体对溶菌酶和

乳酸链球菌素进行包埋, 37 ℃时可使全脂牛奶中李斯特菌数量降低 2 lg(CFU/mL), 脱脂牛奶中降幅达 5 lg(CFU/mL)。Jimborean 等[44]在奶酪生产中添加百里香精油, 有效保持了产品贮藏期品质, 但高剂量添加具有挥发性异味的植物精油易破坏乳品清甜风味, 感官适配性差, 难以大规模推广。研究发现, 负载 60%溶菌酶的 CS 涂层可有效延长奶酪的货架寿命[45], Jalilzadeh 等[46]进一步将溶菌酶与黄原胶复配应用于奶酪保鲜, 发现该复配保鲜膜对产黄青霉菌(*Penicillium chrysogenum*)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)均具有明显抑制作用。但在乳制品产业的实际应用中, 多数复配保鲜体系及新型复合膜材料规模化制备工艺不成熟, 仍停留于实验室小试研究。因此, 未来乳制品的天然保鲜技术需聚焦于风味适配改良、活性成分稳态化、低成本产业化与精准化定制等方向, 助力乳制品绿色、高品质、长货架期发展。

3 天然保鲜技术的应用瓶颈分析

3.1 植物源天然保鲜技术的应用瓶颈

尽管植物源天然保鲜剂抗菌及抗氧化活性强, 但植物精油和部分芳香类活性物挥发性强, 活性成分易流失, 持效性短。还有一些脂溶性多酚、黄酮、疏水生物碱等成分极性弱、水溶性差, 常难以均匀分散于体系中, 且气味浓郁, 颜色较深, 易影响食品风味。基于此, 植物源天然保鲜物质采用微胶囊、纳米乳液包埋、成膜、环糊精包合等封装技术, 以及高分子复合等改性技术来攻克该难题。

改性技术常通过多种抑菌成分协同复配优化抑菌效果; 分子修饰改善活性成分的水溶性; 低温等离子体处理优化其分散性。纳米乳液技术采用高压均质等方法, 将植物精油分散为纳米级液滴, 进而改善其稳定性和水溶性。微胶囊封装技术常以精油作为芯材, 天然高分子为壁材进行包埋, 达到功效成分缓释的目的。赵佳轩[16]通过乳液模板法, 芯材选择茶树精油, 壁材选择 CS 和透明质酸钠, 成功制备了微胶囊, 增强了抑菌强度。黄星海等[47]介绍了对负载姜黄素的天然高分子智能包装膜或活性包装膜在食品保鲜领域中的应用。

3.2 动物源天然保鲜技术的应用瓶颈

动物源天然保鲜剂成膜性优良, 生物相容性好, 可完全降解, 但其机械性能不足、阻水性及热稳定性差等问题仍制约其产业化应用。如 CS 等多糖类材料因其优异的成膜性可在食物表面形成阻隔层以延长食品保质期, 但阻隔层的机械强度不足, 易破损, 阻隔性能减弱, 不能满足食品包材的力学性能要求。此外, 动物源蛋白、多肽类保鲜物质在加工过程中受热, 易变性失活, 作用效率低。

因此, 利用无机纳米材料、植物多酚、天然多糖对动物源天然保鲜剂进行复合改性成为研究热点。通过纳米级二氧化硅、纳米级氧化锌等无机材料复合改性, 可明显增强 CS 的机械性能、阻水性, 以及抑菌活性。通过与茶多酚、迷迭香酸等植物提取物复配, 利用多酚的氢键结合与抗氧化功能, 既可维持保鲜剂的活性, 也可协同改善 CS 的抑菌效果。采用包埋等技术将多肽和蛋白等活性物质包合, 构建物理屏障; 或者与天然高分子共混交联, 形成网络基质, 进而延缓蛋白、多肽等保鲜物质因受热而出现的活性衰减。周鑫等[48]将 CS 与肉桂醛微胶囊、巴西棕榈蜡相结合, 成功制备了一种可食性复合涂抹, 该涂膜可达到高湿贮藏条件下香蕉表面涂膜的防水性及稳定性要求。

3.3 微生物源天然保鲜的应用瓶颈分析

微生物源天然保鲜剂虽然安全可降解, 具有广谱抑菌性, 但其活性易受 pH、温度等环境因素干扰, 以致其活性降低, 稳定性差, 还有部分微生物源抗菌肽水溶性差, 不易分散, 存在异味, 影响食品感官, 在实际应用中造成了阻碍。

微胶囊封装、纳米乳液包合、分子修饰、改性等技术是改善微生物源天然保鲜剂稳定性和水溶性的常用手段。陈俊冬[49]选择岩豆蛋白、岩豆淀粉作为壁材, 利用岩豆多肽和乳酸链球菌素作为芯材, 制备了一种 W/O/W 微胶囊, 并应用于鲜湿面条的保鲜。Sun 等[50]将 *ε*-聚赖氨酸盐酸盐和单宁酸掺入马铃薯蛋白基质中, 开发具有非共价网络的复合膜, 该膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑制率超过 99%, 同时, 该复合膜水蒸气透过率较低, 可有效地减少了水分损失, 延长了包装蓝莓在贮藏期间的货架期。

4 天然保鲜-智能指示一体化技术

目前, 天然保鲜的研发焦点已转向更具潜力的复配型天然保鲜技术, 通过多组分协同增效, 突破单一成分的性能瓶颈。但传统复配天然保鲜体系仅能发挥被动防腐作用, 无法实时反馈食品内部品质变化, 难以实现贮藏过程的动态监测。在此背景下, 以 CDs 为核心, 集保鲜功能与品质监测于一体的天然保鲜-智能指示一体化技术应运而生, 引领传统的天然保鲜技术向高效、安全、智能化、及功能集成化迈进, 破解天然保鲜技术缺乏实时可视化监测能力的行业痛点。

CDs 是由 sp^2 或 sp^3 型杂化碳或有机分子团簇构成的一种零维碳纳米材料[51], 因其光学性能优异, 生物相容性好, 可修饰性强, 毒性低, 成为天然保鲜与智能指示相结合的纽带。CDs 的结构可修饰性使其能与各类天然活性物质高效结合, 实现保鲜功能的精准赋能。与茶多酚、迷迭香精油等植物源活性物质结合时, 可通过表面官能团修饰提升活性物质的稳定性, 减少挥发与流失, 提升保鲜长效

性。Lu 等[52]采用水热法将柠檬酸和姜黄素等原料制备成 CDs, 当 CDs 质量浓度为 375 μg/mL 时, 其对铜绿假单胞菌和大肠杆菌的抑制率为 100%。CS、抗菌肽等动物源活性物质复合后, CDs 通过负载活性物质, 既能增强膜材料的机械性能, 保护活性成分, 避免其受环境影响失活, 又能协同发挥抗菌活性。杜伊迪[53]制备了具有持续抗菌性能的 CDs-Ag 纳米复合物, 并结合 CS 和聚乙烯醇成功制备了抗菌复合膜, 实验证明该膜可有效延长虾仁和猪肉的保质期。CDs 与微生物源活性物质(细菌素、酵母提取物)联用, 可优化活性物质的分散性, 拓宽抗菌谱, 充分发挥天然保鲜剂的安全高效优势。Yang 等[54]利用 ε-聚赖氨酸制备了 CDs, 并通过席夫碱将该 CDs 与氧化葡聚糖连接, 构建了一种多孔透气的水凝胶网络, 该凝胶可与细胞膜发生静电作用, 破坏细菌代谢, 进而防止厌氧菌的繁殖。

此外, pH 响应膜及比色膜可作为天然活性物质的缓释载体, 与 CDs 负载的活性成分协同作用, 形成“实时监测-长效保鲜”的闭环体系。研究者利用 CS 季铵盐、丝胶蛋白、和聚乙烯醇作为混合基材, 负载香蕉皮生物质源 CDs, 掺杂柠檬酸 CDs, 制备了双 CDs 协同的 pH 响应型荧光生物膜, 并应用于鲜猪肉品质的可视化实时检测和草莓的新鲜度监测[55]。Fu 等[56]利用明胶/CS/碳点制备了 pH 响应型复合膜, 作为水产鲜度指示膜: 鱼肉腐败使挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)含量升高并引起 pH 上升, TVB-N 中的氨类组分可随水蒸气被膜吸附, 导致膜体亮度下降[36]。还有研究者以红甘蓝花青素制得比色鱼胶膜, 其颜色变化与鸡胸肉微生物生长及 TVB-N 积累显著相关, 可用于食品腐败实时监测, 并结合智能手机软件实现变质程度定量检测[57]。

CDs 与 pH 响应膜、比色膜的协同整合, 是实现一体化技术“智能指示”功能的关键。CDs 具备优异的 pH 响应荧光与比色变色特性, 可作为新型比色探针, 均匀负载于 pH 响应膜或比色膜基质中。该特性源于其独特的微观结构与电子跃迁机制, 也是其能够实现可视化指示的核心机理。CDs 以 sp^2 杂化碳核为核心、sp^3 杂化结构为表面壳层, 表面富集大量羧基、羟基、氨基等 pH 敏感型官能团, 能够高灵敏地感应微环境 pH 变化, 碳核与表面敏感型官能团耦合进而实现能级跃迁是 CDs 能够发射荧光的主要原因。当食品腐败变质过程中持续产生乳酸、乙酸等酸性代谢物以及 TVB-N、胺类等碱性代谢物时, 膜体系微环境 pH 发生特异性变化, 触发 CDs 表面官能团发生可逆质子化与去质子化反应, 荧光或颜色信号可逆改变, 实现食品新鲜度的可视化、实时化监测。酸性环境下, CDs 表面羧酸根 $RCOO^-$、氨基 R-NH_2 发生质子化, 生成羧基 RCOOH、铵根离子 R-NH_3^+, 降低表面电子云密度, 抑制分子内电荷转移效应, 引发荧光猝灭、发射波长红移。碱性环境下, 表面官能团发生去质子化, 负电荷密度升高、能带间隙收窄, 强化分子内电荷转移效应, 使 CDs 荧光强度、发光颜色发生梯度可逆变化。同时, 极端酸碱环境会轻微改变 CDs 的分散聚集状态, 产生聚集诱导猝灭效应, 进一步放大光学信号差异, 实现光学信号与食品腐败程度的精准匹配。

在实际应用中, 不同食品的腐败路径会导致相反的 pH 变化趋势。如肉类/水产品的腐败过程中, 蛋白质会分解产生氨气、三甲胺、腐胺等生物胺, 使微环境 pH 升高; 而果蔬类食品腐败过程中, 微生物代谢产生的 CO_2 及有机酸使微环境 pH 下降。无论 pH 发生何种变化趋势, CDs 的荧光强度和发光颜色均能够随其表面官能团质子化或去质子化过程而产生梯度可逆的变化, 进而达到与食品腐败程度精准匹配的目的。肉类/水产品食品腐败的智能指示的信号传导如图 1 所示。

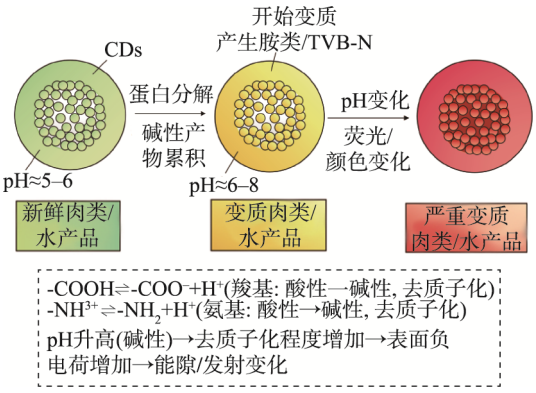


图 1　肉类/水产品食品腐败的智能指示信号传导图

Fig.1　Intelligent indication signal transmission diagram of meat/aquatic product food spoilage

5　天然保鲜技术未来发展趋势

随着食品行业的高质量发展及清洁化标签的普及, 消费者的健康意识不断提升, 食品保鲜技术逐步向绿色安全、智能精准、协同高效三大方向发展。

5.1　绿色安全是天然保鲜技术的基本要求

随着大众对食品保鲜手段的认知不断深入, 传统化学保鲜技术的局限性越加凸显, 依托动植物提取物、微生物代谢物、天然酶制剂等无毒无残留成分, 研究绿色健康、安全无害的天然食品保鲜技术成为行业共识。原料筛选、工艺优化、生产加工都应坚守安全底线, 严控保鲜助剂的使用量及使用范围, 最大限度降低保鲜材料对食品本体、人体健康以及生态环境造成的潜在风险。只有以绿色安全为基本要求, 才能更好契合现行食品安全法规标准, 满足

市场健康消费需求，推动食品保鲜技术朝着安全、高效、环保的方向持续发展。

5.2 智能精准是天然保鲜技术的升级趋势

随着消费市场多元化及食品差异化的保鲜需求，智能精准的天然保鲜技术成为食品保鲜行业的发展主线。依托传感监测与活性调控技术，打造可视化、可预警的智能保鲜体系，通过实时监测食品环境 pH、温湿度、气体成分、微生物变化等参数，精准触发保鲜机制，实现保鲜条件动态适配不同食品的保鲜需求，形成全周期精细化管控，摆脱统一化管控的局限，大幅降低食材损耗。特别是以 CDs 为核心的新型纳米颗粒，因其优越的生物相容性和光致发光性，现已广泛应用于化学传感、生物成像、药物递送、光催化及食品检测等领域[33]，为智能精准的天然保鲜技术提供的介质条件。如 CDs 可作为结构增强剂与活性助剂用于食品包装制备，在包装膜中发挥多重功能[36,58]，实现保鲜效果与保鲜包材的双向共赢。

5.3 协同高效是天然保鲜技术的核心路径

单一组分的天然保鲜技术常存在抑菌谱窄，适用场景受限，很难达到理想的保鲜效果。通过多种天然活性物质复配，或将天然保鲜、物理保鲜、可食性涂膜等技术联用，构建多元协同保鲜体系，互补短板，放大优势，协同增效，拓宽抑菌范围及应用场景。有研究采用百里香酚、香芹酚与丁香酚抑制李斯特菌，三者复配时表现出协同抑菌作用，这 3 种化合物的三元混合物极大地降低了单个化合物的抑制浓度[59]。

6 结束语

天然食品防腐技术凭借安全、绿色、健康的优势，已成为替代化学防腐剂的核心研究方向，当前已形成植物源、动物源、微生物源及物理协同等多元技术体系，各类技术的抑菌机理逐步明晰，在果蔬、肉、水产及乳品等食品领域应用研究不断深入，部分成果已实现产业化，有效延长了食品货架期，保障了食品安全。但现阶段仍存在抑菌效率有限、稳定性欠佳、成本偏高及规模化应用适配性不足等问题，制约了技术全面推广。未来，需聚焦抑菌机制深度解析、复配协同技术优化、靶向递送体系研发等方向，兼顾抑菌效果、食品品质与生产成本，推动天然防腐技术朝着高效、稳定、低成本、广谱适配的方向发展，为食品工业绿色化、健康化转型升级提供坚实支撑。

参考文献

[1] 何锡媛, 孔祥, 刘枣, 等. 植物精油的抗菌活性及其在食品保鲜中的应用[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(12): 211–216.
He Xiyuan, Kong Xiang, Liu Zao, et al. Antibacterial activity of plant essential oils and their application in food preservation [J]. Food Research and Development, 2025, 46(12): 211–216.

[2] 蒋金林, 龚宁静, 朱垚燚, 等. 海洋微生物源天然产物在食品保鲜中的应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(22): 178–183.
Jiang Jinlin, Gong Ningjing, Zhu Yaoyi, et al. Research progress on the application of natural products derived from marine microorganisms in food preservation [J]. Food Research and Development, 2025, 46(22): 178–183.

[3] Liu Xin, Yuan Wenqiao, Liu Ying. Antibacterial effects of brown algae extract against tilapia spoilage bacteria Pseudomonas fluorescens and Shewanella putrefaciens [J]. BioResources, 2023. DOI:10.15376/biores.18.2.2897–2912.

[4] 庄冰琦, 程峥, 王思懿, 等. 智能技术赋能食品保鲜现状及未来发展[J/OL]. 仲恺农业工程学院学报, 1-15. 2026-07-21. https://link.cnki.net/urlid/44.1660.S.20260630.0925.004.
Zhuang Bingqi, Cheng Zheng, Wang Siyi, et al. Current status and future development of food preservation enabled by intelligent technology [J/OL]. Journal of Zhongkai College of Agricultural Engineering, 1-15. 2026-07-21. https://link.cnki.net/urlid/44.1660.S.20260630.0925.004.

[5] 李伟国, 刘大苗, 财音青格乐. 天然萜类化合物在食品保鲜中应用现状及前景分析[J]. 食品科技, 2025, 50(7): 234–242.
Li Weiguo, Liu Damiao, Cai Yinqinggele. Analysis of the application status and prospects of natural terpenoids in food preservation [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(7): 234–242.

[6] 赵冬雪, 杨晓溪, 郎玉苗. 天然抗菌剂在食品抑菌保鲜中的研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(7): 204–207.
Zhao Dongxue, Yang Xiaoxi, Lang Yumiao. Research progress of natural antibacterial agents in food antibacterial preservation [J]. The Food Industry, 2021, 42(7): 204–207.

[7] 黄淑婷, 姚和莹, 俞梦婷, 等. 天然防腐剂食品保鲜作用研究进展[J]. 现代食品, 2022, 28(23): 26–29.
Huang Shuting, Yao Heying, Yu Mengting, et al. Research progress of preservation effect of natural preservatives [J]. Modern Food, 2022, 28(23): 26–29.

[8] 陈晨, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 鲜切果蔬天然抗菌剂的研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(10): 5.
Chen Chen, Hu Wenzhong, Jiang Aili, et al. Research progress on natural antibacterial agents for fresh-cut fruits and vegetables [J]. Food Industry Science and Technology, 2013, 34(10): 5.

[9] 王丹丽, 简桂花, 汪年松. 中草药抗菌作用的研究进展[J]. 中国中西医结合肾病杂志, 2014(11): 3.
Wang Danli, Jian Guihua, Wang Niansong. Research progress on the antibacterial effects of Chinese herbal medicines [J]. Chinese Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine for Nephrology, 2014(11): 3.

[10] 杨倩, 谭婷, 吴娟娟, 等. 几种食用香辛料的抑菌活性研究[J]. 中国调味品, 2019, 44(4): 5.
Yang Qian, Tan Ting, Wu Juanjuan, et al. Research on the antibacterial activity of several edible spices [J]. Chinese Condiments, 2019, 44(4): 5.

[11] Huang Xinmeng, Li Yuanpeng, Mulati A, et al. Antimicrobial activity and mechanism of food-medicine homology in food preservation: a review [J]. Food Control, 2025, 178(000). DOI:10.1016/j.foodcont.2025.111507.

[12] 韩磊, 贾娟. 天然香辛料在肉类及其制品中的应用研究进展[J]. 现代食品, 2025, 31(5): 24–26.
Han Lei, Jia Juan. Research progress on the application of natural spices in meat and its products [J]. Modern Food, 2025, 31(5): 24–26.

[13] 张庆霞. 植物源防腐剂的抑菌机理及其在生鲜湿面保鲜中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 7.
Zhang Qingxia. Antibacterial mechanism of botanical preservatives and their application in fresh wet noodles preservation [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(21): 7. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025028.

[14] 费鹏, 赵胜娟, 陈曦, 等. 植物多酚抑菌活性、作用机理及应用研究进展[J]. 食品与机械, 2019(7): 5.
Fei Peng, Zhao Shengjuan, Chen Xi, et al. Research progress on antibacterial activity, action mechanism and application of plant polyphenols [J]. Food and Machinery, 2019(7): 5.

[15] 欧凯玉, 逄建龙, 张一敏, 等. 天然酚类化合物的抑菌作用及在肉与肉制品中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9). DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220511-135.
Ou Kaiyu, Pang Jianlong, Zhang Yimin, et al. Research progress on the antibacterial effect of natural phenolic compounds and their application in meat and meat products [J]. Food Science, 2023, 44(9). DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220511-135.

[16] 赵佳轩. 壳聚糖/透明质酸钠微胶囊的性能及抑菌效果[J]. 天津化工, 2024, 38(6): 29–33.
Zhao Jiaxuan. Performance and antibacterial effect of chitosan/sodium hyaluronate microcapsules [J]. Tianjin Chemical Industry, 2024, 38(6): 29–33.

[17] Zhao Shengming, Li Ningning, Li Zhao, et al. Shelf life of fresh chilled pork as affected by antimicrobial intervention with nisin, tea polyphenols, chitosan, and their combination [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 1047–1063.

[18] 施申伟, 李婷, 东为富. 食品抗菌包装研究进展[J]. 塑料包装, 2018, 28(4): 1–8, 41.
Shi Shenwei, Li Ting, Dong Weifu. Research progress in food antibacterial packaging [J]. Plastic Packaging, 2018, 28(4): 1–8, 41.

[19] 陈启蓉, 王武, 白瑜. 溶菌酶在食品保鲜及贮藏中的应用研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2025, 44(1): 13–23.
Chen Qirong, Wang Wu, Bai Yu. Research progress on the application of lysozyme in food preservation and storage [J]. Journal of Food and Biotechnology, 2025, 44(1): 13–23.

[20] Primo E D, Otero L H, Ruiz F, et al. The disruptive effect of lysozyme on the bacterial cell wall explored by an “In-Silico” structural outlook [J]. Biochemistry and Molecular Biology Education, 2018, 46(1): 83–90.

[21] 周典. 溶菌酶修饰的百里香精油脂质体的制备及其在牛肉保鲜中的应用[D]. 成都: 成都大学, 2023: 42–56.
Zhou Dian. Preparation of lysozyme-modified thyme essential oil liposomes and its application in beef preservation [D]. Chengdu: Chengdu University, 2023: 42–56.

[22] Taylor T M, Davidson P M, David J R D. Antimicrobials in food [M]. Boca Raton: CRC Press, 2020: 348–349.

[23] 李婷婷, 刘楠, 马堃, 等. 基于群体感应抑制剂的香芹酚与鱼精蛋白复合对冷藏大菱鲆的保鲜作用[J]. 中国食品学报, 2020, 20(10): 222–231.
Li Tingting, Liu Nan, Ma kun, et al. Preservation effect of carvacrol and protamine complex based on quorum sensing inhibitors on refrigerated turbot [J]. Chinese Journal of Food Science, 2020, 20(10): 222–231.

[24] 杨焕彬, 曾庆培, 林光明, 等. 生物保鲜剂在禽肉保鲜中的应用研究进展[J]. 轻工学报, 2021, 36(6): 38–46.
Yang Huanbin, Zeng Qingpei, Lin Guangming, et al. Research progress on the application of biological preservatives in poultry meat preservation [J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(6): 38–46.

[25] Almuhayawi M S. Propolis as a novel antibacterial agent [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2020, 27(11): 3079–3086.

[26] 刘锦红. 天然食品防腐剂乳酸链球菌素在乳制品中的应用研究[J]. 轻工科技, 2021, 37(7): 8–9.
Liu Jinhong. Research on the application of natural food preservative nisin in dairy products [J]. Light Industry Science and Technology, 2021, 37(7): 8–9.

[27] 曹云刚, 张瀚丹, 张鑫, 等. ε-聚赖氨酸抑菌机制及其在肉类保鲜中的应用[J]. 精细化工, 2022, 39(1): 1–6, 64.
Cao Yungang, Zhang Handan, Zhang Xin, et al. Antibacterial mechanism of ε-polylysine and its application in meat preservation [J]. Fine Chemicals, 2022, 39(1): 1–6, 64.

[28] 路飞, 顾孟清, 朱轶群, 等. 天然保鲜剂的抗菌机理及在肉制品中的应用[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(5): 419–426.
Lu Fei, Gu Mengqing, Zhu Yiqun, et al. Antibacterial mechanism of natural preservatives and their application in meat product preservation [J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2023, 41(5): 419–426.

[29] 王佳宇, 胡文忠, 管玉格, 等. 乳酸链球菌素抑菌机理及在食品保鲜中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 346–350.
Wang Jiayu, Hu Wenzhong, Guan Yuge, et al. Research progress on the antibacterial mechanism of nisin and its application in food preservation [J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(3): 346–350.

[30] 刘启超. 复合天然保鲜剂结合微冻对分割鸭肉保鲜效果的影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023: 18–31.

Liu Qichao. Effect of compound natural preservatives combined with micro-freezing on the preservation effect of cut duck meat [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2023: 18–31.

[31] 王清, 胡文静, 耿协强, 等. 天然提取物对富硒酱板鸭预制食品腥味的影响与保鲜效果初探[J/OL]. 食品工业科技, 1-29. 2026-03-19. https://DOI.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080110.
Wang Qing, Hu Wenjing, Geng Xieqiang, et al. Preliminary study on the effect of natural extracts on the fishy smell and preservation effect of prefabricated salted duck in selenium-enriched sauce [J/OL]. Food Industry Science and Technology, 1-29. 2026-03-19. https://DOI.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080110.

[32] 徐畅, 于基成, 刘秋. 微生物源食品保鲜剂的研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(13): 9–20.
Xu Chang, Yu Jicheng, Liu Qiu. Research progress on microbial-derived food preservatives [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(13): 9–20.

[33] 汪慧. 纳他霉素乳液和抗菌膜的制备及其应用的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2020: 1–2.
Wang Hui. Research on the preparation and application of natamycin emulsion and antibacterial film [D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2020: 1–2.

[34] 刘新宇. 天然多糖基薄膜在食品保鲜及智能化检测中的应用[D]. 烟台: 烟台大学, 2025: 17–36.
Liu Xinyu. Application of natural polysaccharide-based films in food preservation and intelligent detection [D]. Yantai: Yantai University, 2025: 17–36.

[35] Zhao Linlin, Zhang Min, Wang Haixiang, et al. Effect of carbon dots in combination with aqueous chitosan solution on shelf life and stability of soy milk [J]. International Journal of Food Microbiology, 2020, 326. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108650.

[36] 丁可, 葛帅, 孔慧, 等. 食品加工副产物源碳点制备及在食品智能活性包装中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(23): 202–214.
Ding Ke, Ge Shuai, Kong Hui, et al. Research progress on the preparation of carbon dots derived from food processing by-products and their application in intelligent active packaging of food [J]. Food Science, 2023, 44(23): 202–214.

[37] 朱亚, 刘晨. 茶多酚和溶菌酶复配对冷鲜肉保鲜效果的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(10): 1722–1725.
Zhu Ya, Liu Chen. Effect of tea polyphenols and lysozyme on the preservation of cold fresh meat [J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(10): 1722–1725.

[38] Lin Wanmei, Huang Gengli, Yang Weixia, et al. A dual-function chitosan packaging film for simultaneously monitoring and maintaining pork freshness. [J]. Food chemistry, 2022, 392: 133242.

[39] 王睿, 王琦, 周敏, 等. 茶多酚和EGCG对风干金鲳鱼品质相关理化指标的改善效果比较[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 54–63.
Wang Rui, Wang Qi, Zhou Min, et al. Comparison of the improvement effects of tea polyphenols and EGCG on the quality-related physical and chemical indicators of air-dried golden pomfret [J]. Food Science, 2023, 44(2): 54–63.

[40] Islam M, Hossain A, Rahman M A, et al. Potentiality of ginger extract as natural preservative for raw tilapia fish (*Oreochromis mossambicus*) during storage at refrigerated temperature [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7), DOI:10.1111/JFPP.16729.

[41] 邓文静, 姜迎迎, 钱磊, 等. 复合生物保鲜剂对南美白对虾保鲜效果的研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(5): 84–91.
Deng Wenjing, Jiang Yingying, Qian Lei, et al. Research on the preservation effect of compound biological preservatives on *Penaeus vannamei* [J]. Food Research and Development, 2022, 43(5): 84–91.

[42] Sozbilen G S, Yemeniciolu A. Antilisterial effects of lysozyme-nisin combination at temperature and pH ranges optimal for lysozyme activity: test of key findings to inactivate *Listeria* in raw milk [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110447.

[43] Lopes N A, Pinilla C M B, Brandelli A, Antimicrobial activity of lysozyme-nisin co-encapsulated in liposomes coated with polysaccharides [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93(AUG): 1–9.

[44] Jimborean M A, Borsa A, Michiu D, et al. Aloe vera gel microcapsules and essential oils of thyme and oregano incorporated in spreadable goat cheese: impact on its microbiological, physicochemical, and sensory characteristics during storage [J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-napoca, 2021, 49: 12001.

[45] Mehyar G F, Nabulsi A A A, Saleh M, et al. Effects of chitosan coating containing lysozyme or natamycin on shelf-life, microbial quality, and sensory properties of Halloumi cheese brined in normal and reduced salt solutions [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(1): e13324.1–e13324.9.

[46] Jalilzadeh A, Hesari J, Peighambardoust S H, et al. The effect of whey protein-based edible coating containing natamycin and lysozyme-xanthan gum conjugate on the shelf life of ultrafiltrated white cheese [J]. University of Tehran, 2020(2). DOI:10.22059/JFABE.2020.306083.1068.

[47] 黄星海, 韦建华, 钟海艺. 姜黄素天然高分子智能活性包装膜研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(9): 348–355.
Huang Xinghai, Wei Jianhua, Zhong Haiyi. Research progress on curcumin natural polymer intelligent active packaging film [J]. Food and Fermentation Industry, 2024, 50(9): 348–355.

[48] 周鑫, 冯文一铭, 卢立新. 疏水与抗菌协同的壳聚糖复合涂膜制备及其香蕉保鲜研究[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-11. 2026-04-29. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045545.
Zhou Xin, Feng Wenyiming, Lu Lixin. Preparation of hydrophobic and antibacterial synergistic chitosan composite coating and research on banana preservation [J/OL]. Food and Fermentation Industry, 1-11. 2026-04-29. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045545.

[49] 陈俊冬. 负载乳酸链球菌素/岩豆多肽/柑橘精油微胶囊的制备及对鲜

湿面条品质的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2023: 44–46.
Chen Jundong. Preparation of microcapsules loaded with nisin/rock bean peptide/citrus essential oil and its effect on the quality of fresh wet noodles [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2023: 44–46.

[50] Sun Ruimeng, Zhang Yimeng, Zhang Yanli, et al. Non-covalent interaction-driven assembly of antimicrobial potato protein/ε-polylysine hydrochloride/tannic acid bioplastics for blueberries preservation [J]. International journal of biological macromolecules, 2026, 353: 151177.

[51] 张文莉, 陈琳, 薛宝霞, 等. 碳点及其抗菌复合材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3738-3755.
Zhang Wenli, Chen Lin, Xue Baoxia, et al. Research progress of carbon dots and their antibacterial composite materials [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 3738–3755.

[52] Lu Fang, Ma Yurong, Wang Huibo, et al. Water-solvable carbon dots derived from curcumin and citric acid with enhanced broad-spectrum antibacterial and antibiofilm activity [J]. Materials Today Communications, 2021, 26. DOI: 10. 1016/J. MTCOMM. 2020. 102000.

[53] 杜伊迪. 银/碳点基抗菌复合膜的制备及其在肉类保鲜中的应用[D]. 长春: 长春工业大学, 2024: 42–43.
Du Yidi. Preparation of silver/carbon dot-based antibacterial composite membrane and its application in meat preservation [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2024: 42–43.

[54] Yang Xu, Li Peili, Tang Wentao, et al. A facile injectable carbon dot/oxidative polysaccharide hydrogel with potent self-healing and high antibacterial activity [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117040.

[55] 金临轩. 香蕉皮碳点基智能活性包装材料的构建及食品保鲜应用[D]. 杭州: 浙江科技大学, 2025: 61–66.
Jin Linxuan. Construction of banana peel carbon dot-based intelligent active packaging materials and food preservation application [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2025: 61–66.

[56] Fu Bofei, Liu Qiaoling, Liu Minghuan, et al. Carbon dots enhanced gelatin/chitosan bio-nanocomposite packaging film for perishable foods [J]. Chinese Chemical Letters, 2022, 33(10): 4577–4582.

[57] Kilic B, Dogan V, Kilic V, et al. Colorimetric food spoilage monitoring with carbon dot and UV light reinforced fish gelatin films using a smartphone application [J]. International journal of biological macromolecules, 2022, 209(PA): 1562–1572.

[58] Kousheh A S, Moradi M, Tajik H, et al. Preparation of antimicrobial/ultraviolet protective bacterial nanocellulose film with carbon dots synthesized from lactic acid bacteria [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 216–225.

[59] Garcia-garcia R, Lopez-malo A, Palou E, Bactericidal action of binary and ternary mixtures of carvacrol, thymol, and eugenol against Listeria innocua [J]. Journal of food science, 2011, 76(2): M95–M100.

(责任编辑: 曹岱琳　安香玉)