

智能响应型水凝胶在食品可控释放 与品质监测中的应用研究进展

尹红力^{1,2} 屈岩峰^{1,3} 杨嘉兴¹ 姚佳诺¹ 李伟泽¹ 刘士瑛¹

(1. 哈尔滨学院食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 哈尔滨商业大学食品工程学院,
黑龙江 哈尔滨 150000; 3. 屈岩峰高技能人才(劳模)创新工作室, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:当前食品工业对智能化、精准化技术需求不断攀升,智能响应型水凝胶作为一种新兴的功能材料,在食品可控释放与品质监测方面展现出巨大应用潜力。文章综述了近年来智能响应型水凝胶的基材选择与交联方式、刺激响应类型及作用机制方面的研究进展,阐述了智能水凝胶在食品活性物质可控释放系统中的设计与应用,涵盖抗菌包装、营养强化与风味控释等方向;同时对智能响应型水凝胶在食品品质监测中的应用进行了概括,包括食品安全检测与食品新鲜度监测中的应用,并展望了未来智能响应型水凝胶的发展趋势。

关键词:智能水凝胶;响应类型;可控释放;品质监测;应用研究

Research advances in the application of intelligent responsive hydrogels for controlled release and quality monitoring in foods

YIN Hongli^{1,2} QU Yanfeng^{1,3} YANG Jiaxing¹ YAO Jianuo¹ LI Weize¹ LIU Shiyi¹

(1. College of Food Engineering, Harbin University, Harbin, Heilongjiang 150086, China; 2. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150000, China; 3. Highly-skilled Talents (Model Worker) Innovation Studio of QU Yanfeng, Harbin, Heilongjiang 150086, China)

Abstract: With the continuously increasing demand for intelligent and precise technologies in the food industry, intelligent responsive hydrogels, as an emerging class of functional materials, have demonstrated great application potential in controlled release and quality monitoring of food products. This article reviews recent research progress in intelligent responsive hydrogels in terms of base material selection and crosslinking methods, types of stimulus responsiveness, and underlying mechanisms. It elaborates on the design and application of intelligent hydrogels in controlled-release systems for food bioactive substances, covering antibacterial packaging, nutrient fortification, and flavor-controlled release. Additionally, the application of intelligent responsive hydrogels in food quality monitoring is summarized, including their use in food safety detection and food freshness monitoring, and future development trends of intelligent responsive hydrogels are prospected.

Keywords: intelligent hydrogels; response types; controlled release; quality monitoring; application research

水凝胶是一种交联的聚合物网络,能够在保持其三维结构的同时吸收和保持大量的水分,在不同的领域有着广泛的应用^[1-3],特别是由于其高含水量及其与生物组

织相当的力学性能,其干燥状态下坚硬,吸水后柔软有弹性,高度模拟了生物组织的质感与性能^[4]。水凝胶的三维网络结构不仅能够容纳大量水分子,其内部的网络结构

基金项目:黑龙江省自然科学基金(编号:LH2023C068);哈尔滨学院“冰雪文化育人专项”(编号:HUBX2025103);哈尔滨学院乡村振兴博士科研基金(编号:HXC2023002);国家级大学生创新训练项目(编号:202510234055)

通信作者:尹红力(1990—),女,哈尔滨学院讲师,博士。E-mail:623940607@qq.com

收稿日期:2025-10-05 **改回日期:**2025-12-26

引用格式:尹红力,屈岩峰,杨嘉兴,等.智能响应型水凝胶在食品可控释放与品质监测中的应用研究进展[J].食品与机械,2026,42(1):213-220.

Citation:YIN Hongli, QU Yanfeng, YANG Jiaxing, et al. Research advances in the application of intelligent responsive hydrogels for controlled release and quality monitoring in foods[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 213-220.

能够包封和保护活性成分，并且具备良好的释放与靶向特性，通过材料和结构设计使其能够在特定的 pH 值、酶或特定环境下实现控制释放的功能^[5]，为其在食品应用中提供优异的传输通道，使其成为食品活性成分控释和品质监测的理想载体。

智能水凝胶作为一类新兴的适应性功能材料，其三维网络结构所赋予的环境响应性，能够成为解决动态调节的创新路径，核心特征在于其对外界环境刺激的动态响应能力，包括 pH、温度、光照、酶等^[6-7]，并且能够通过自身体积、孔径、亲疏水性或界面性质的变化来响应这些刺激^[8]。将智能水凝胶技术引入食品科学与工程领域，推动着食品活性成分可控释放^[9]与品质监控向精准化、智能化与个性化方向转变。在活性成分可控释放方面，可作为载体根据食品所处微环境（如因微生物腐败导致 pH 变化，或烹饪过程中的温度变化）按需释放抗菌剂、抗氧化剂、风味物质等，从而显著提升食品保鲜效果、营养保留率与感官品质^[10]。

文章拟系统梳理智能响应型水凝胶在食品可控释放与品质监测中的研究现状，深入分析其设计原理、功能特性及应用前景，探讨其在未来食品开发中的挑战，旨在为该技术在食品工业中的进一步开发与应用提供理论指导和技术参考。

1 制备智能响应型水凝胶的基材与交联方式

1.1 智能响应型水凝胶的基材

在食品工业中，智能响应型水凝胶的基材选择对其可控释放、品质监控性能具有决定性的影响。根据来源和合成方式的不同，可分为天然聚合物水凝胶、合成聚合物水凝胶和杂化水凝胶三大类。

天然聚合物水凝胶以多糖类（如海藻酸盐、羧甲基纤维素、壳聚糖）^[11]和蛋白质类（如明胶、植物蛋白）为代表。例如，海藻酸盐是一类天然来源的阴离子多糖，含有大量的羧基基团（—COO—），能与多价阳离子（如 Ca²⁺）结合交联生成三维凝胶网络，海藻酸盐水凝胶在生物活性成分的封装、缓释等方面应用广泛^[12]。明胶因具有良好的生物降解性、生物相容性、组织黏附性和低抗原性而被广

泛用于水凝胶中。合成材料具有来源广泛、成本低、稳定性高、功能多样化等特点，如聚丙烯酸（PAA）、聚乙烯醇（PVA）和聚乙二醇（PEG）等，具有可精确调控的分子结构和优异的机械性能。杂化水凝胶通常采用互穿网络（IPN）或复合交联策略构建，既保留了天然聚合物的生物相容性，又具备合成聚合物的机械稳定性和功能可调性。天然水凝胶的主要优势有可持续性和食品安全性，但通常存在机械性能较弱和稳定性较差等局限；合成水凝胶具有可设计的网络结构和卓越的物理性能，但生物相容性和环境友好性通常不如天然水凝胶；杂化水凝胶通过结合天然和合成聚合物的优点，实现了性能的优化与功能的集成，但存在制备工艺复杂、成本较高等问题。智能响应水凝胶的主要分类、代表材料、优势、局限性及主要应用场景见表 1。

1.2 交联方式与结构调控

水凝胶的性能在很大程度上取决于其交联密度和网络结构，这需要通过适当的交联方式来实现。常见的交联方法包括物理交联（如氢键、疏水作用、离子相互作用等）、化学交联（如共价键等）和多重交联（如纳米复合、双网络等）。

物理交联具有良好的生物相容性，主要是通过非共价相互作用形成网络结构，非共价键包括氢键、静电作用、金属配位、疏水相互作用等。物理交联作用不需要添加其他有毒的交联剂，提高了水凝胶的生物相容性，同时制备方法简单方便。近年来，利用多种物理交联相互作用制备水凝胶敷料已成为研究热点。然而，使用这些技术生产的水凝胶仍然受到限制，如氢键交联水凝胶的胶化浓度高、交联密度低，存在机械强度弱、注射性差等缺点^[18]。

化学交联可形成更稳定的网络结构，主要通过物质的化学反应形成新的共价键或生成大分子聚合物来合成水凝胶。常用的共价键类型包括二硫键、席夫碱键、迈克尔加成反应等，可提高水凝胶的机械强度和耐久性。近年来，绿色交联剂（如低共熔溶剂、柠檬酸、单宁酸）的使用日益普及^[19]，减少了传统化学交联剂可能带来的毒性问题。将物理交联形成的水凝胶与化学交联形成的水凝胶进行比较，后者具有更稳定的化学键。因此，制备的水

表 1 智能响应型水凝胶的主要分类与特性比较

Table 1 Comparison of major classifications and characteristics of intelligent responsive hydrogels

分类	代表材料	优势	局限性	主要应用场景	参考文献
天然水凝胶 多肽等	明胶、海藻酸钠、壳聚糖、 多肽等	生物相容性好、可 降解、环境友好	机械性能差、稳定性有限、 批次差异大	新鲜度指示、短期监测、可降 解包装	[13] [14]
	聚丙烯酸、聚乙烯醇、聚 乙二醇	机械性能强、性能 可调、批次一致	生物相容性较差、降解困难	重复使用传感器、高强度应 用场景	[15]
合成水凝胶 杂化水凝胶	明胶—聚丙烯酸、DNA- 聚合物复合物	性能可设计、综合 性能优越	制备工艺复杂、成本较高	高灵敏度检测、多功能集成 系统	[16] [17]

凝胶的交联强度更高,从而改善了机械性能。

单一的交联方式在实际应用中常面临机械强度不足、响应速度慢、功能单一等问题,为解决这些问题,研究人员开发了多重交联方式,常见的主要有纳米复合水凝胶^[20]、双网络与互穿网络结构水凝胶等。纳米材料的高比表面积和特殊界面效应,使其与水凝胶聚合物链产生强烈的相互作用,形成有效的应力传递网络;通过构建两种不同性质聚合物网络相互贯穿的结构,可同时实现水凝胶的高强度和韧性。这种结构由一个刚而脆的网络和一个软而韧的网络组成^[21]。第一网络通常为刚性、高度交联的网络,提供结构强度和模量;第二网络则为柔性、可延展的网络,负责能量耗散。如Deng等^[22]开发了一种季铵化的壳聚糖与明胶、聚丙烯酰胺复合的互穿网络结构智能水凝胶,以5-氟尿嘧啶为模型药物,通过加入Fe³⁺和TA形成复合体系作为氧化还原引发剂,实现丙烯酰胺的自由基聚合,缩短水凝胶的制备时间。通过调节CS和TPP的浓度,实现了对水凝胶微观结构和理化性质的调控,该水凝胶表现出pH响应释放特性及对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的有效抗菌性能。

2 智能响应型水凝胶的响应类型及响应机制

智能水凝胶的核心特征是能够感知环境刺激并产生可控响应,这种“感知—响应”特性使其成为食品领域中的理想智能材料,常见的刺激响应类型如图1所示。

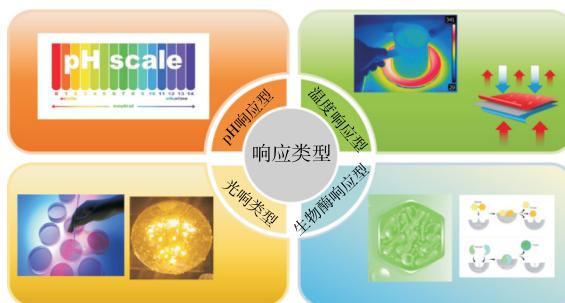


图1 智能水凝胶常见的刺激响应类型

Figure 1 Stimuli-responsive types of intelligent hydrogels

2.1 pH响应型

pH响应是最常见也是研究最为广泛的刺激响应类型之一。这类水凝胶的分子结构中通常含有可电离的弱酸或弱碱基团,如羧基($-COOH$)、氨基($-NH_2$)等,这些基团在不同酸碱环境下,会发生电离状态的变化,引起聚合物链的静电排斥力改变,从而导致水凝胶网络结构发生膨胀或收缩。在食品应用中,pH变化通常是反映食品品质的关键指标。富含蛋白质的食品(如肉类、海鲜等)腐败过程中会产生氨气、生物胺等碱性挥发性物质,导致微环境pH升高;而乳制品等在变质时往往因乳酸菌作用导

致pH下降。Li等^[23]通过调节海藻酸钠的氧化程度,开发了一种绿色的席夫碱介导的交联策略来调节电纺膜中的纤维网络结构。将乳酸链球菌素(Nisin)和花青素共包埋到氧化海藻酸钠—羧甲基壳聚糖(CMCS)纳米纤维中,可构建pH双响应膜,表现出理想的机械性能,快速的pH触发的颜色变化和pH响应扩散释放。

2.2 温度响应型

温敏性水凝胶通常含有温敏性聚合物链段,如聚N-异丙基丙烯酰胺或聚环氧乙烷—聚环氧丙烷共聚物,温度响应的核心机理是依赖于水凝胶网络中温敏性聚合物在相变温度下的亲水—疏水平衡转变,这类水凝胶在环境温度达到临界溶解温度时,聚合物链的亲疏水平衡发生突变,导致水凝胶网络结构发生可逆的收缩或膨胀^[24]。Sun等^[25]将氯化钠和十二烷基硫酸钠胶束引入到聚N-异丙基丙烯酰胺共聚—丙烯酰胺网络中,构建了温敏水凝胶体系。该水凝胶在14,37℃时呈现可逆热致变色特性,通过阻隔太阳能输入和加速水分蒸发,有效抑制了辣椒在阳光直射下的温度上升并避免了日灼损伤。此外,该水凝胶可作为香蕉贮藏过程中的温度监测传感器,对不适温度提供实时视觉预警。基于这种自适应温敏特性,该水凝胶在果蔬温度调控与品质维持方面展现出显著效果。

2.3 光响应型

通过在水凝胶网络中引入光响应官能团或光响应纳米材料,如螺吡喃、偶氮苯等,可以赋予水凝胶光响应特性^[26]。Liu等^[27]将项链状BMT光催化剂引入到聚乙烯醇水凝胶体系中,制备了含有壳聚糖、聚乙烯醇和多孔石墨相氮化碳的新型食品包装膜。该有机水凝胶薄膜表现出优异的自修复能力、抗菌性能以及高效的乙烯清除效果,与聚乙烯(PE)膜和CS/PVA膜覆盖的草莓相比,该膜覆盖的草莓在室温下的货架期延长至96 h,并表现出优异的耐高温性能。还有一些光敏基团在特定波长光照下会发生分子结构的变化,如螺吡喃在紫外光照射下由疏水性的螺环形式转变为亲水性的部花青形式,而在可见光照射下又恢复原状。这种分子级别的结构变化可引发水凝胶宏观层面的体积或形状改变。

2.4 生物酶响应型

生物酶响应型是一类基于生物特异性识别机制而设计的功能高分子材料,其核心特征在于利用食品腐败或生物消化过程中产生的特定酶作为触发信号,将酶特异性底物序列整合到水凝胶网络中,具有高度特异性,当相应酶存在时,水凝胶网络的交联点被酶解,导致网络结构降解或物理性质改变。例如,Yu等^[28]开发了一种基于聚己内酯和玉米醇溶蛋白(Zein)的双酶响应电纺纤维垫。内酯中的酯键是脂肪酶的敏感底物,而Zein中的肽键是蛋白酶的敏感底物。这两种化学键分别充当了针对脂肪酶和蛋白酶的交联点。该材料通过负载肉桂醛实现酶触

发释放,抗菌率达99.9%,抗氧化活性提升至65.55%,成功延长羊肉保质期6 d,这种机制实现了“腐败越严重,酶分泌越多,抗菌剂释放越快”的精准控释,避免了抗菌剂的无效消耗,延长了包装系统的有效作用时间。

3 智能响应型水凝胶在食品活性物质可控释放中的应用

食品腐败主要由微生物繁殖引起,开发能主动抑制微生物生长的抗菌包装是食品工业的重要需求。智能水凝胶作为抗菌剂的载体,能够根据食品微环境变化按需释放抗菌成分,实现高效、精准的保鲜效果。智能水凝胶通过控制营养素、风味物质等活性成分的释放,进而提高这些成分的稳定性、生物利用度,使其在食品营养强化和风味控释方面同样展现出巨大潜力。其在活性物质可控释放中的应用如图2所示。

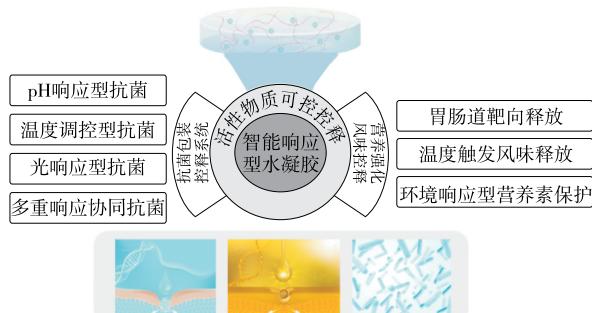


图2 智能响应型水凝胶在活性物质可控释放中的应用
Figure 2 Application of intelligent responsive hydrogels in the controlled release of active substances

3.1 在抗菌包装控释系统中的应用

3.1.1 pH响应型抗菌水凝胶 pH响应型抗菌水凝胶是最常见的智能抗菌包装形式。这类系统通常利用pH变化作为响应信号,控制抗菌剂的释放行为。例如,Suhail等^[29]制备了一款交联没食子酸与丙烯酸的水凝胶网络,能长效提升四环素疗效。在pH 7.4条件下,水凝胶具有高溶胀率,并实现96%的药物释放,远高于低pH条件下的释放量,证实了该水凝胶具有pH响应特性。抗菌试验中对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌效果良好,此水凝胶能实现高效稳定的药物控制释放并实现抗菌效果。Wang等^[30]以羧甲基壳聚糖/聚乙烯醇为基质,基于EDC/NHS功能基团活化体系介导的介孔二氧化硅纳米颗粒负载 ϵ -聚赖氨酸制备了一种具有pH响应释放特性及优异抗菌性能的水凝胶薄膜,由于 ϵ -聚赖氨酸具有破坏细菌膜结构的能力,使其对假单胞菌MN10具有显著抑菌效果,该复合水凝胶薄膜在食品保鲜领域展现出重要应用潜力。

3.1.2 温度调控型抗菌水凝胶 温度调控型抗菌水凝胶利用温度变化控制抗菌剂释放,特别适用于热加工食品或冷链食品^[31]。一些特定水凝胶在低温时溶胀,将抗菌

剂包裹在网络内部;当温度升高时,水凝胶急剧收缩,挤出内部包含的抗菌剂。这种温度调控释放机制可用于巴氏杀菌食品的包装,其可以在热处理过程中主动释放抗菌剂,增强杀菌效果;也可用于冷链食品,当温度异常升高时自动增强抗菌保护。Wang等^[32]以壳聚糖和聚乙烯醇为水凝胶基质,通过-COOH、-OH和-NH₂参与的酯化和酰胺反应交联 ϵ -聚赖氨酸,并通过二甲亚砜/羟基苯并三唑活化体系介导制备了多功能水凝胶包装膜。研究表明,此材料对金黄色葡萄球菌和荧光假单胞菌具有显著的抗菌效果, ϵ -聚赖氨酸的控制释放可达到3 d以上,并将冷鲜鸡肉的货架期延长至8 d。

3.1.3 光响应型抗菌水凝胶 光响应型抗菌水凝胶中含有光敏基团(如偶氮苯、螺吡喃等),可以通过光照(如可见光、UVA等)激活水凝胶中的光敏成分,产生活性氧(ROS)等物质来杀灭或抑制食品表面的微生物。Hu等^[33]通过光引发交联聚合制备了具有近红外响应光催化抗菌活性的硫化铋/聚合氮化碳/壳聚糖/聚丙烯酰胺复合水凝胶,负载在聚合氮化碳上高度分散的硫化铋不仅充当光引发剂还起到吸收可见光和近红外光的作用,该复合水凝胶在近红外光照射下对大肠杆菌的最大抑菌率可达95.55%,在非接触和光照条件下,这种复合水凝胶可以将鱼肉和葡萄的货架期分别延长至8,14 d。这项工作为光响应型抗菌水凝胶在食品保鲜,特别是非接触保鲜中展现了应用潜力。

3.1.4 多重响应协同抗菌系统 多重响应协同抗菌系统整合多种响应机制,适应复杂多变的食品保存环境。例如,盛瑞^[34]采用“光交联—纳米协同配位增强—抗菌负载”的改进方法,以甲基丙烯酸酐化羧甲基纤维素和K型角叉菜聚糖为骨架,通过季铵化纳米纤维素和锆离子增强体系协同增强水凝胶的力学强度;随后,引入 ϵ -聚赖氨酸/单宁酸天然抗菌体系对水凝胶进行功能负载,构建了一款作为新型包装材料的绿色多功能水凝胶。抗菌水凝胶对DPPH自由基的清除率、大肠杆菌和李斯特菌的抑菌率都达到了95%以上,通过草莓保鲜试验验证了其保鲜能力,可延长草莓保质期至5 d。John等^[35]将负载染料的聚合物囊泡嵌入到聚(N-异丙基丙烯酰胺)基水凝胶中,开发了一种双功能水凝胶—聚合物囊泡复合(HPC)系统,将两种互补的传感功能集成到一个平台中。这种方法可以实现温度触发的释放行为,而封装的染料作为pH响应应用于监测食品新鲜度。第一个功能性通过水凝胶收缩和随后的染料释放来实现;第二个功能性是通过将pH降低到6.2或暴露于具有代表性的挥发性胺类物质甲基胺,使局部pH值转移到基础值。HPCs在水合条件下保持稳定,使用荧光光谱和光散射证明了它们的双功能型。

3.2 在营养强化与风味控释中的应用

3.2.1 胃肠道靶向释放系统 胃肠道靶向释放系统利用人体消化道不同区段的pH差异、酶分布或机械作用,根

据不同的制备和交联方法,如离子相互作用、美拉德偶联、酶或pH响应技术,精确定制水凝胶,用于实现营养素在特定部位的精准释放^[36]。Liu等^[37]基于明胶与格兰胶的复合水凝胶在胃液酸性环境中保持结构稳定,保护对酸敏感的营养素花色苷不被降解,最大限度地在小肠中释放花色苷。研究表明,明胶/格兰胶比例为8:2结构最为致密稳定,体外模拟消化试验表明,花色苷在胃内进行了保留,随后在肠内释放。Le等^[38]采用核壳结构封装模型化合物亚甲基蓝(MB)的3D食品打印系统,系统中淀粉为内核,pH响应的海藻酸-果胶为外壳,用同轴喷嘴结构制备3D打印样品,在模拟胃液(pH 1.2)和肠液(pH 6.8)试验中证实了3D打印凝胶基质可实现MB的可控释放。这种靶向释放技术可显著提高营养素的生物利用度,减少胃酸对活性成分的破坏。

3.2.2 温度触发风味释放系统 温度触发风味释放系统应用于烹饪或食用过程中的风味增强。例如,将风味物质包埋于温敏水凝胶微球中,在常温下风味物质被稳定保护;而在烹饪或加热过程中,当温度达到水凝胶的相变温度时,风味物质迅速释放,显著增强食品的感官品质;还可以通过温度的调节,驱动过程中免疫竞争反应进而实现风味物质的检测。如Wang等^[39]将羧甲基壳聚糖与聚(*N*-异丙基丙烯酰胺)交联,偶联辣椒素类包被抗原,合成了一种双网络温敏水凝胶传感基底。将对4种辣椒素类具有相同识别能力的广谱单克隆抗体与绿色量子点偶联,制备荧光信号探针。利用该水凝胶传感基底和广谱识别信号探针,建立了一种同时检测4种辣椒素类物质的新型荧光免疫传感器。利用复合凝胶的温敏特性,将游离的反应组分从免疫反应体系中分离出来,即调节温度可以驱动检测过程中免疫竞争反应的完成。这种双模式免疫传感器可以在一次检测过程中同时获得荧光和视觉绿蓝色两种信号。

3.2.3 环境响应型营养素保护系统 环境响应型营养素保护系统主要针对对光、pH等环境因素敏感的营养素(如花青素、维生素、姜黄素等),利用水凝胶的多孔结构为其提供物理屏障,同时根据环境变化智能调节释放行为。例如,Mao等^[40]在不同pH条件下,将原儿茶酸(PCA)与Fe³⁺快速自组装形成金属-酚醛网络,然后加入海藻酸钠(SA),在不添加其他化学试剂的条件下制备SA/PCA/Fe³⁺水凝胶。体外模拟消化试验中SA/PCA/Fe³⁺水凝胶可以控制花青素在模拟胃肠道中的释放,保护食品中的营养成分,有效延缓营养素的降解,并在消化过程中控制其释放速率,提高生物利用度。Zhao等^[41]通过将偶氮苯和β-环糊精基团接枝到透明质酸链上,利用两者之间的主客体相互作用,构建了光响应型超分子多糖水凝胶。通过紫外光触发偶氮苯发生分子构象转变,该凝胶体系趋向解交联过程,可以快速释放负载的生长因子。Fang等^[42]使用大豆蛋白肽(SPP)和转氨酶(TGase)制备了含有

白藜芦醇的纳米水凝胶(NG),其在肠道中具有极高的递送效率,并显示出良好的降胆固醇效果。

4 智能响应型水凝胶在食品品质监测中的应用

随着全球对食品供应链中食品安全、绿色保鲜监测技术需求的日益增长,智能水凝胶因其多功能性、可调节性、环境友好性等特点,逐渐成为此领域的研究热点,其在食品品质监测中主要体现在食品安全检测及食品新鲜度监测等方面,如图3所示。

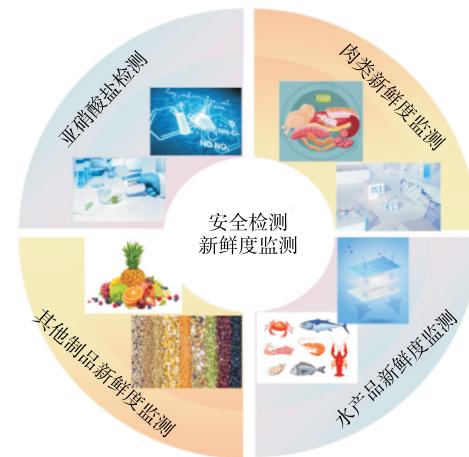


图3 智能响应型水凝胶在食品品质监测中的应用

Figure 3 Application of intelligent responsive hydrogels in food quality monitoring

4.1 在食品安全检测中的应用

智能环境响应性水凝胶逐渐成为检测领域的研究热点,与传统的静态水凝胶不同,智能响应水凝胶可以触发体积相变、结构重排。这种动态特性允许它们直接将目标分析物的化学信号转换成光学、电或机械信号输出^[43]。因此,智能水凝胶在食品安全性检测中应用前景广泛^[44]。亚硝酸盐是一种广泛使用的食品添加剂,对防止腐败至关重要,因此准确、快速、低成本的亚硝酸盐检测方法对食品安全至关重要,Nam等^[45]和Li等^[46]开发了一种基于热敏互穿聚合物网络(IPN)水凝胶的荧光装置,用于荧光检测。水凝胶的热敏性和IPN结构赋予其高灵敏度和选择性,使得水凝胶能够快速响应亚硝酸盐的存在。Ding等^[47]通过Suzuki偶联反应合成了一种在强酸性条件下检测(检测限 7×10^{-8} mol/L)和对亚硝酸盐实现3 min快速响应,并成功应用于实际样品(包括腌制蔬菜、腌腊肉制品和水样)亚硝酸盐的定量检测。其对亚硝酸盐的检测机理表明,亚硝酸盐诱导的荧光猝灭主要通过电子转移机制和氢键相互作用发生。

4.2 在食品新鲜度监测中的应用

食品新鲜度是消费者最为关注的品质指标之一,这

使得用于实时监测食品新鲜度的智能包装系统在食品安全领域至关重要^[48]。

4.2.1 肉类新鲜度监测 肉类品质与食品安全和人类健康密切相关, 新鲜度是肉类品质的关键指标。Li 等^[49]将四苯基乙烯与 2-(2'-羟基苯基) 苯并噻唑荧光团进行分子融合, 再经羟基乙酰化成功制备了新型生物胺(BAs) 检测用比率型荧光探针。该探针具有大斯托克斯位移和良好光稳定性, 对代表性生物胺三甲胺(TMA) 表现出显著响应, 呈现比率型荧光变化且检测限低至 6.5×10^{-8} mol/L。进一步将荧光探针与具有三维聚合物网络的琼脂糖水凝胶混合, 构建了生物胺检测水凝胶传感器。该传感器在 TMA 蒸气环境中经紫外光激发可产生从蓝色到黄色的明显颜色变化, 检测限达 5.88 mg/kg。Li 等^[49]还将水凝胶传感器与智能手机 RGB 分析系统联用, 实现了对鸡胸肉样品新鲜度的精准检测。消费者通过紫外手电筒照射即可简便、实时、无损地直观判断鸡胸肉新鲜度。

4.2.2 水产品新鲜度监测 水产制品由于高水分含量、不饱和脂肪酸易氧化及特定腐败微生物等问题, 新鲜度监测较为复杂, 可以充分利用水凝胶的高含水量, 为碱性物质与指示剂之间的反应提供更有效的介质, 增强视觉颜色变化, 来解决这一问题。Ding 等^[50]开发了一种具有比色和光热信号输出的方法, 用于监测虾和鱼的新鲜度。三甲胺诱导的纳米颗粒的分解触发比色和光热信号的双模式变化, 实现虾和鱼新鲜度的定量鉴定; Tang 等^[51]将五倍子残渣纳米颗粒与壳聚糖复合, 引入天然紫胶染料作为 pH 敏感指示剂用于虾类新鲜度监测, 纳米颗粒的添加使凝胶薄膜抗氧化活性显著提升, 抗菌效率 >99.9%, 在 4 ℃下将虾类货架期延长 2 d, 并因紫胶染料分子随腐败过程发生 pH 响应型结构转变而呈现显著的颜色变化。

4.2.3 其他制品新鲜度监测 祖晶莹等^[52]针对大米表面的游离脂肪酸进行识别, 开发了一款以海藻酸钠为主要原料, 负载从黑枸杞中提取的天然 pH 响应性指示剂—黑枸杞花色苷, 制备了一种安全、有效、可便携的大米新鲜度快速检测材料, 通过大米表面的颜色改变提示大米的贮藏时间(新鲜度); 杨体园^[53]利用大蒜素纳米乳液、单宁酸(TA) 和甲基乙基丙烯酰甜菜碱共同组装了一种新型的水凝胶包装材料。通过辣椒的采后保鲜试验, 验证了水凝胶的保鲜效果。Kazeminava 等^[54]通过 *N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺对羧甲基纤维素进行化学交联接枝, 进而负载二氧化钛纳米粒子, 成功制备了新型水凝胶纳米复合薄膜。在番茄保鲜试验中, 该复合材料能为涂层番茄提供良好的屏障性能, 延缓腐败变质, 有效抵御环境微生物侵袭。

5 结论与展望

智能响应型水凝胶的快速发展, 使其在智能响应的可控释放和品质监测等方面展现出巨大的潜力。凝胶壁

材的筛选策略、交联工艺的调控方式以及凝胶结构的优化路径, 是决定凝胶可控释放和品质监控能力的关键因素。近年来, 面向智能响应型水凝胶在食品可控释放与品质监测的智能响应型水凝胶研究, 主要集中在 pH、温度、光响应等方面; 但该技术的应用仍需进一步的研究与创新。未来智能响应型水凝胶的发展趋势主要可归纳为以下方面: ① 多功能化的整合。研发“监测—自动调整—治疗”于一体的水凝胶体系, 如结合荧光成像的监测型水凝胶, 同步实现品质实时监控及评估。② 新型响应类型的开发。探索电场、剪切力等新型响应因子, 以适配多元化的应用场景。③ 材料创新与优化。开发绿色、低成本的材料, 优化现有材料的响应速率与稳定性。尽管智能响应型水凝胶的制备及应用研究仍有许多问题亟待解决, 但其在食品可控释放与品质监测领域已凸显出独特优势和广阔前景。随着材料科学、食品科学等多学科的深度交叉融合与协同创新, 智能水凝胶技术有望在未来食品工业中发挥更加重要的作用, 为食品产业的智能化、精准化和可持续发展提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] DONG X G, FAN M Y, ZHAO L, et al. Recent advances in MOFs based hydrogels: from interactions, synthesis, and functionalization to food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 166: 105415.
- [2] BRIONES S C, MUSSAGY C U, FARIA F O, et al. Functional hydrogels in food applications: a review of crosslinking technologies, encapsulation trends, and emerging challenges[J]. Polymers, 2025, 17(21): 2 955.
- [3] XU Y, CHENG Y Y, YANG T, et al. State-of-the-art insights into hydrogel innovations from structural engineering to smart preservation: research trends and future directions[J]. Trends in Food Science & Technology, 2026, 167: 105411.
- [4] 王少卿, 卞鸣薇, 张博, 等. 复合水凝胶在食品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(12): 212-217.
WANG S Q, MU M W, ZHANG B, et al. Research progress on the application of composite hydrogel in food[J]. Food & Machinery, 2022, 38(12): 212-217.
- [5] VELUSAMY M, RADHAKRISHNAN M. Hydrogel fabrication using emerging technologies: sources, mechanisms, and food applications[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2025, 105: 104226.
- [6] ZHENG Q X, SHANG M S, LI X J, et al. Advances in intelligent response and nano-enhanced polysaccharide-based hydrogels: material properties, response types, action mechanisms, applications[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109190.
- [7] LIU H B, LI X M, PAN Z, et al. Lignin-based plugging hydrogel with high-temperature resistance and adjustable gelation[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2025, 8(1): 111.

- [8] ZHENG S W, SUN D W, ZHU Z W. Intelligent hydrogels: food detection, preservation and delivery driven by material-derived intelligence[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2025, 165: 105247.
- [9] SUN W H, YANG L Q, WANG L J, et al. Construction and application of spirulina carotenoid hydrogel sustained-release system[J]. *Agricultural Products Processing and Storage*, 2025, 1(1): 22.
- [10] JIANG X T, ZHOU L Y. Progress, challenge and perspective of hydrogels application in food: a review[J]. *NPJ Science of Food*, 2025, 9(1): 155.
- [11] XUE H K, WANG P, JI L H, et al. Polysaccharide-based hydrogels: materials, preparation, and applications in medicine, food, adsorption, and agriculture[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2025, 24: 102395.
- [12] SHARMA A, SINGH A K. Sodium alginate: a green biopolymer resource-based antimicrobial edible coating to enhance fruit shelf-life: a review[J]. *Colloids and Interfaces*, 2025, 9(3): 32.
- [13] LI J, LV P C, OU H L, et al. A novel self-ratiometric fluorescent sensor of sodium alginate hydrogel bead doping with coumarin derivative with extremely acidic pH visual monitoring of fruit juice freshness[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 307(2): 142099.
- [14] LI H H, MURUGESAN A, SHOAIB M, et al. Emerging trends and future prospects of peptide-based hydrogels: revolutionizing food technology applications[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2025, 24(3): 70187.
- [15] AO J, LI D D, DING L, et al. Plasmonic silver nanorod-reinforced flexible polyvinyl alcohol hydrogel SERS sensors for ultrasensitive detection of food colorants in fruit juice[J]. *Food Chemistry*, 2025, 495(2): 146405.
- [16] WANG F, WU X J, LIAO W A, et al. Hydrogel-based bimodal sensor array via modular assembly with decoupled strain - temperature sensing and high sensitivity[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 523: 168920.
- [17] BAO D, GUAN F C, JI X B, et al. Unidirectionally arranged layered structured hydrogels with high strength, multifunctional integration, and somatosensory actuators[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 505: 159294.
- [18] MUNYIRI C N, MADIVOLI E S, KISATO J, et al. Biopolymer based hydrogels: crosslinking strategies and their applications[J]. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 2025, 74(7): 625-640.
- [19] CASTRO MUÑOZ R, BOCZKAJ G. Paving the way for green cross-linker substances for the fabrication of polymer membranes-a review[J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2025, 47: 101097.
- [20] LIU S H, HUANG M. Preparation and properties of graphene oxide modified nanocomposite hydrogels[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, 62(1): 012017.
- [21] GONG J P, KATSUYAMA Y, KUROKAWA T, et al. Double-network hydrogels with extremely high mechanical strength [J]. *Advanced Materials*, 2003, 15(14): 1 155-1 158.
- [22] DENG L Q, XU Z Q, WANG F, et al. pH-responsive pam/gel/qcs drug-loaded hydrogel with self-healing and antimicrobial properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 331(2): 148474.
- [23] LI J X, BAO Y W, JIANG Q, et al. pH dual responsive electrospun fiber loading anthocyanin and nisin for food preservation and monitoring: regulation in dynamic schiff base networks based on different oxidized sodium alginate[J]. *Food Chemistry*, 2025, 496(2): 146765.
- [24] SAHU A, ADNAN RAZA M, KHATOON N, et al. Polysaccharide-based polymers for designing thermoresponsive hydrogels for treating wound healing[J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2025, 8(12): 1 398.
- [25] SUN L B, SUN D W, XU L, et al. Tunable thermoresponsive hydrogels for temperature regulation and warning in fruit and vegetables preservation[J]. *Food Chemistry*, 2024, 456: 139962.
- [26] ZHOU Y, HE Y Q, QI S M, et al. Development and evaluation of the energy-saving effect of photothermal cooperative composite hydrogel smart window[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 504: 158792.
- [27] LIU S J, GAO X Q, FAN H, et al. Green and recyclable graphitic carbon nitride/chitosan/polyvinyl alcohol photocatalytic films with efficient antibacterial activity for fruit packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 236: 123974
- [28] HAO Y, ZHANG R Z, JIANG C P, et al. Dual-enzyme-responsive fibers for chilled mutton preservation[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2025, 153: 322.
- [29] SUHAIL M, JABEEN N, WAHAB A, et al. Fabrication, physicochemical, antibacterial, and cytotoxicity evaluation of tetracycline-loaded hydrogels of gallic acid as controlled release agents[J]. *Results in Engineering*, 2025, 26: 105525.
- [30] WANG D B, FAN S M, LI X, et al. Carboxymethyl chitosan/polyvinyl alcohol hydrogel films by incorporating MSNs as ϵ -PL carrier with pH-responsive controlled release and antibacterial properties[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2024, 46: 101360.
- [31] WANG Y G, HUANG Z F, LI M N, et al. Polysaccharide-based antifreeze hydrogels in food preservation: from molecular design to smart food packaging applications[J]. *Food Research International*, 2025, 211: 116381.
- [32] WANG D B, ZHU C Q, YANG Q F, et al. Stretchable, controlled release of active substances, and biodegradable chitosan-polyvinyl alcohol hydrogel film for antibacterial and chilled meat preservation[J]. *Food Chemistry*, 2025, 477: 143608.
- [33] HU T, SUN T, XUE B, et al. A near-infrared-responsive bismuth sulfide/polymeric carbon nitride/chitosan/polyacrylamide

- composite hydrogel and contactless food preservation application[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 727(P3): 138376.
- [34] 盛瑶. 季铵化纳米纤维素/锆离子配位改性羧甲基纤维素水凝胶的制备及水果保鲜应用[D]. 南宁: 广西大学, 2025: 65-66.
- SHENG Y. Preparation of quaternary ammonium nanocellulose/zirconium ion coordination modified carboxymethyl cellulose hydrogel and IST application in fruit preservation[D]. Nanning: Guangxi University, 2025: 65-66.
- [35] JOHN C, DOS SANTOS E C, WEHR R P, et al. Hydrogel-polymersome composites as a sensing platform for monitoring food spoilage[J]. *Nanoscale*, 2025, 17(23): 14 193-14 205.
- [36] MINELGAITE V, JEZNIESE S, ŠIPAILIENE A, et al. Advances in food-grade hydrogel encapsulation of probiotics with next-generation prebiotics for targeted symbiotic delivery [J]. *Food Hydrocolloids for Health*, 2025, 8: 100251.
- [37] LIU L Y, ZHANG D D, SONG X X, et al. Compound hydrogels derived from gelatin and gellan gum regulates the release of anthocyanins in simulated digestion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 8(12): 107487.
- [38] LE Q A T, LENIE M D R, UBEYITOGLULLARI A. Generation of pH-responsive starch and alginate-pectin hydrogels using coaxial 3D food printing: the release of methylene blue[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2025, 104: 104152.
- [39] WANG Z, SHENG W, JIN Z X, et al. Dual network CMCS/PNIPAM temperature-sensitive hydrogel based fluorescent and RGB colorimetric dual-mode immunosensor for detection of capsaicinoids as an exogenous index in edible oil samples[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 521: 166601.
- [40] MAO S F, REN Y M, CHEN S G, et al. Development and characterization of pH responsive sodium alginate hydrogel containing metal-phenolic network for anthocyanin delivery [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 320: 121234.
- [41] ZHAO W Y, LI Y, ZHANG X, et al. Photo-responsive supramolecular hyaluronic acid hydrogels for accelerated wound healing[J]. *Journal of Controlled Release*, 2020, 323: 24-35.
- [42] FANG M X, MA F, YU L, et al. Fabrication of resveratrol-loaded soy peptide nanogels with transglutaminase and *in vitro* gastrointestinal delivery and cholesterol-lowering effect[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 157: 110437.
- [43] QI H N, JING X L, HU Y L, et al. Electrospun green fluorescent-highly anisotropic conductive Janus-type nanoribbon hydrogel array film for multiple stimulus response sensors[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 288: 111933.
- [44] NUNEKPEKU X, LI H H, ZAHID A, et al. Advances in hydrogel-integrated sers platforms: innovations, applications, challenges, and future prospects in food safety detection[J]. *Biosensors*, 2025, 15(6): 363.
- [45] NAM J, JUNG I B, KIM B, et al. A colorimetric hydrogel biosensor for rapid detection of nitrite ions[J]. *Sensors Actuators B: Chemical*, 2018, 270: 112-118.
- [46] LI L F, LIN D, XU S H, et al. Multi-deformable interpenetrating network thermosensitive hydrogel fluorescent device for real-time and visual detection of nitrite[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 478: 135471.
- [47] DING X F, WANG S N, LI H, et al. A novel carbazole-based polymer and its hydrogel-assisted probe for portable detection of nitrite in food and water environment[J]. *Food Chemistry*, 2025, 498(1): 147085.
- [48] LI R, FENG H Y, WANG S C, et al. A colorimetry-enhanced tri-functional film with high stability by polyphenol-anthocyanin co-pigmentation/conjugate: new prospect for active intelligent food packaging[J]. *Food Chemistry*, 2024, 447: 138927.
- [49] LI Y H, MA Y L, HUANG T R, et al. An AIE and ESIPT based ratiometric fluorescent hydrogel sensor for detecting biogenic amines and chicken breast freshness[J]. *Microchemical Journal*, 2024, 204: 111018.
- [50] DING N, DONG S Y, ZHANG Y Q, et al. Portable silver-doped prussian blue nanoparticle hydrogels for colorimetric and photothermal monitoring of shrimp and fish freshness[J]. *Sensors Actuators B: Chemical*, 2022, 363: 131811.
- [51] TANG B S, ZHANG H, LIU L X, et al. PH-responsive film from *Galla chinensis* residue/chitosan with lac dye for shrimp freshness monitoring[J]. *Food Chemistry: X*, 2025, 32: 103312.
- [52] 祖晶莹, 李宛凝, 朴振铭, 等. 基于天然指示剂的智能型大米新鲜度指示水凝胶的制备与性质[J/OL]. 吉林农业大学学报. (2025-06-20) [2025-07-05]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.0031>.
- ZU J Y, LI W N, PIAO Z M, et al. Preparation and properties of intelligent rice freshness indicator hydrogel based on natural indicator[J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*. (2025-06-20) [2025-07-05]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.0031>.
- [53] 杨体园. 大蒜素/单宁酸水凝胶的制备及在青椒保鲜中的应用[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2024: 75-76.
- YANG T Y. Preparation and application of allicin/tannic acid hydrogel in pepper preservation[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2024: 75-76.
- [54] KAZEMINAFA F, BEHESHTI S, MONAVARI N, et al. Synthesis of novel antibacterial and biocompatible colistin-loaded cellulose/manganese oxide nanocomposite hydrogel film[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2024, 32(1): 430-440.