章斌, 侯小桢, 黄乙生, 等. 含生姜精油的琼胶-海藻酸钠双层膜释放特性分析及对冷藏草鱼品质影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 412−420. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100030

ZHANG Bin, HOU Xiaozhen, HUANG Yisheng, et al. Analysis of the Release Characteristics of Ginger Essential Oil from Agar-Sodium Alginate Bilayer Film and Its Effect on the Quality of Refrigerated Grass Carp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 412−420. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100030

· 贮运保鲜 ·

含生姜精油的琼胶-海藻酸钠双层膜释放特性分析及对冷藏草鱼品质影响

章　斌, 侯小桢, 黄乙生, 梁诗晴, 高　塙, 李　卓, 刘建良
（韩山师范学院生命科学与食品工程学院, 广东潮州 521041）

摘　要: 制备以生姜精油（ginger essential oil，GEO）为抗菌剂的琼胶-海藻酸钠双层膜，选用代表性的水性食品模拟溶剂和脂肪类食品模拟溶剂进行薄膜的浸渍释放和单侧释放试验，探讨精油从膜基质扩散释放的行为规律，并选用 4 种经典数学模型拟合生姜精油的主要释放机制；同时，评价了抗菌薄膜对草鱼肉冷藏期间的微生物品质影响。结果表明，GEO 在所用水性食品和脂肪类食品模拟溶剂（蒸馏水、10% v/v 乙醇、50% v/v 乙醇、95% v/v 乙醇溶液）中的浸渍释放与单侧释放均呈先快速释放后平稳持续释放的行为规律，可实现从薄膜基质的较好缓释。GEO 释放行为的模型拟合结果表明，GEO 从膜基质释放主要为 Fickian 扩散，且 Peppas-Sahlin 模型可更好地阐释其释放机制，其次为 Peleg 模型。草鱼肉冷藏保鲜实验结果表明，GEO 赋予双层膜的抗菌作用及其从膜基质先快速后持续缓慢释放能有效抑制微生物生长繁殖和挥发性盐基氮化合物的产生；综合草鱼肉冷藏期间的感官、理化和微生物指标测定结果，表明 GEO 的添加可使琼胶-海藻酸钠双层膜包装处理延长草鱼肉约 3 d 的冷藏货架期。

关键词: 生姜精油, 琼胶, 海藻酸钠, 释放特性, 草鱼, 冷藏
中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0412−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100030
本文网刊:

Analysis of the Release Characteristics of Ginger Essential Oil from Agar-Sodium Alginate Bilayer Film and Its Effect on the Quality of Refrigerated Grass Carp

ZHANG Bin，HOU Xiaozhen，HUANG Yisheng，LIANG Shiqing，GAO Que，LI Zhuo，LIU Jianliang
（College of Life Science and Food Engineering, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, China）

Abstract: In the present study, agar-sodium alginate bilayer films were prepared with ginger essential oil (GEO) as the antibacterial agent. Representative water-based and fatty food simulation solvents were selected for immersion and unilateral release experiments of the films to explore the behavior of essential oil diffusion and release from the film matrix. In addition, four classical mathematical models were selected to fit the primary release mechanism of GEO. The effect of the antibacterial film on the microbial quality of grass carp during refrigeration was evaluated. The results showed that the immersion release and unilateral release of GEO in simulated solvents (distilled water, 10% v/v ethanol, 50% v/v ethanol, and 95% v/v ethanol solution) for water-based and fatty foods exhibited a behavioral pattern of rapid release, followed by stable and sustained release, which could enable the achievement of good sustained release from the film matrix. The model fitting results of the GEO release behavior indicated that the GEO release from the film matrix was primarily based on Fickian diffusion, and that the Peppas-Sahlin model could better explain its release mechanism, followed by the Peleg

收稿日期: 2025−10−10
基金项目: 广东省重点建设学科科研能力提升项目（2022ZDJS069）; 广东省普通高校特色创新项目（2023KTSCX081）; 广东省粤东药食资源功能物质与健康产品研究重点实验室（2021B1212040015）; 韩山师范学院博士启动项目（QD2024215）; 潮州市科技引导计划项目（2013N11、2024ZC04）; 广东省本科高校国家级大学生创新训练计划项目（202310578014、202310578015、202410578002）; 广东省本科高校省级大学生创新训练计划项目（S202310578016）。
作者简介: 章斌（1981−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与质量安全, E-mail: 10282361@qq.com。

model. The results of the refrigeration of grass carp showed that the antibacterial effect of GEO on the bilayer film and its rapid and sustained slow release from the film matrix could effectively inhibit microbial growth and production of volatile salt based nitrogen compounds of the grass carp, and based on the comprehensive detection results of sensory, physico-chemical, and microbiological indicators, it was found that the addition of GEO could extend the shelf life of grass carp with the agar-sodium alginate bilayer film packaging by approximately 3 d during refrigeration compared with the PE treatment group and the control group without packaging.

Key words: ginger essential oil; agar; sodium alginate; release characteristics; grass carp; refrigeration

草鱼（*Ctenopharyngodon idellus*）作为我国四大家鱼之一，是淡水养殖最丰富和产量最高的鱼类，据《2024-2029 年中国草鱼行业竞争格局及投资规划深度研究分析报告》统计，2024 年全国草鱼总产量为 616.5 万吨，这一高产量使其成为水产品保鲜研究的重要对象之一。同时，因草鱼含水量高和营养基质丰富，易在贮藏和销售过程发生微生物腐败和品质劣变而存在食用安全隐患。因此，采用适当且经济的方式延长草鱼肉销售货架期和减少经济损失是行业人员一直探求的研究方向。

活性包装能通过持续释放活性物质来保持产品质量、延长货架期，已成为食品保鲜与包装材料开发的热点领域。依据活性剂类型，目前已开发的活性包装主要包括水分吸收、氧气/乙烯清除、二氧化碳生成及抗菌包装等系统[1−3]；其中，抗菌活性包装薄膜因其效果显著、应用广泛，发挥着尤为关键的作用。此类薄膜的效能核心在于其抗菌成分的类型、含量、分布及扩散-迁移-释放特性[4]。尤其重要的是，抗菌成分从包装基材向食品的迁移扩散行为受扩散动力学支配[5]。因此，在设计包装薄膜配方与结构时，需充分考虑抗菌剂的释放动力学与食品本身的微生物污染腐败动力学相匹配，以实现高效防护。在基材选择上，多糖（如纤维素衍生物[6]、淀粉衍生物[7]、壳聚糖[8]、普鲁兰[9] 等）可通过分子间作用力（如氢键、静电引力）形成结构稳定、机械性能良好的网状结构薄膜，是研制抗菌包装的常用基材。进一步地，通过将不同特性的多糖进行复配，例如海藻酸钠（sodium alginate, SA）与琼胶（agar, AG），可利用 SA 分子链上的 β-D-甘露糖醛酸和 α-L-古洛糖醛酸与 AG 分子基团上的 L-半乳糖 6-硫酸盐产生分子间协同效应而形成更为致密稳定的网络结构[10−11]，有效弥补单一材料的缺陷，提升复合薄膜的综合性能[12]。在抗菌剂方面，植物精油（主要含生物碱、黄酮、萜类等化合物）因其广谱抗菌性、安全无毒且能改善薄膜性能，成为研究热点；其中，生姜精油（ginger essential oil, GEO）富含的萜类化合物（如 α-姜烯、β-没药烯）、酚类衍生物（如 6-姜酚、6-姜烯酚）等活性成分赋予其广谱抗菌、抗氧化及抗炎特性，被证实能有效抑制水产品常见腐败微生物的生长[13]，适用于鱼肉的低温冷藏，且赋予水产品特有且令人愉悦的气味。然而，精油的实际应用效果受到两大关键因素的制约：一是其自身的高挥发性，以及介质类型、温度、湿度等环境条件对其迁移释放的影响[14]；二是其复杂的化学组成和分子特性，也会反过来影响聚合物基材的结构与释放动力学；这些因素共同决定了含精油抗菌包装薄膜的最终性能[15]。

国内外已有较多含植物精油的活性薄膜用于鱼、虾等水产品保鲜方面的研究，但大多集中在基材和活性成分选择、制备方法比较等方面[16−17]，对于精油释放动力学及其与食品保鲜动力学的匹配机制研究相对较少。相比之下，本研究选用适用于平板状包装有限体积类型的常用数学模型，探讨含 GEO 的琼胶-海藻酸钠双层抗菌膜在代表液态食品和脂肪类食品的不同食品模拟介质中的浸渍释放与单侧释放行为及其主要机制，并结合草鱼肉的冷藏保鲜实验，评价该双层抗菌膜释放动力学与抗菌效能的构效关系，为反向设计高效缓释抗菌包装提供新视角。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

草鱼　本地农贸市场购买的现宰新鲜草鱼脊背肉；生姜精油　华硕香料油有限公司；海藻酸钠　青岛明月海藻集团有限公司；琼胶　用当年采收的龙须菜进行水提-醇沉所得；平板计数琼脂培养基　广东环凯微生物科技有限公司；甘油（≥99.5%）、正己烷、氯化钙、吐温−80　上海西陇化工股份有限公司，均为国产分析纯。

FJ200-SH 型高速分散均质机　上海沪析实业有限公司；FD-1D-50 型冷冻干燥机　北京博医康实验仪器有限公司；TU-1901 型紫外可见分光光度计　北京普析仪器有限公司；IkA T18 basic 型高速均质器　德国 Janke & Kunkel GmbH 公司；GZX-9146MBE 型电热鼓风干燥箱　上海博迅实业有限公司医疗设备厂；PS-60A 型超声波清洗机　深圳市歌能超声清洗设备有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　GEO 最大吸收波长与标准曲线测定　制备浓度为 0.05 μL/mL 的 GEO-正己烷溶液，用紫外-可见分光光度计在 190~500 nm 范围进行扫描，测定精油的最大吸收波长为 λ_{max}。同时，分别配制 0、1、5、10、15、20、25、30、35、40、45、50 nL/mL 的 GEO-正己烷溶液，测定其在 λ_{max} 波长处的吸光度并绘制标准曲线。

1.2.2　海藻酸钠-琼胶双层抗菌膜的制备　将海藻

酸钠与琼胶按 2∶8(m∶m, w/w)质量比混合, 加入蒸馏水和 25%(w/w, 海藻酸钠和琼胶质量)的甘油, 在 10000 r/min 转速下对混合物进行高速分散处理 15 min 和 20 min 的超声脱气处理, 以制备浓度为 1.8%(w/v)的 S-A 成膜溶液。取 S-A 成膜溶液, 加入膜溶液体积 5% v/v 的生姜精油和 1% v/v 的吐温 80 后 12000 r/min 下高速分散处理 5 min, 然后按 0.25 g/cm^2 用量平铺膜溶液并干燥, 得含 GEO 的内层薄膜。同时, 取 S-A 成膜溶液与等体积的 75% 乙醇溶液和一半体积的 1% $CaCl_2$ 溶液混合并高速分散处理 2 min 后得交联膜溶液, 取 15.0 g 该交联膜溶液均匀浇铸在干燥好的内层膜表面, 于 35 ℃ 干燥至完全, 即得含 GEO 的海藻酸钠-琼胶双层抗菌膜, 命名为 S-A-g 膜。

1.2.3 薄膜中的 GEO 含量测定 取干燥好的整张双层膜充分剪碎并溶于装有 500 mL 超纯水的锥形瓶中, 调溶液 pH 至 10.5 后于 70 ℃ 磁力搅拌恒温水浴中加热至薄膜充分溶解, 然后 10000 r/min 离心 10 min, 取上清液用无水乙醇定容后, 测定 GEO 的 λ_{max} 波长处的吸光度, 依据标曲计算 S-A-g 薄膜中的 GEO 含量。

1.2.4 GEO 的膜基质浸渍释放 裁取 2 cm×2 cm 规格的薄膜片, 分别完全浸入装有 30 mL 不同模拟溶剂(表 1)的锥形瓶中并于 25 ℃ 避光静置, 每隔 12 h 量取 1 mL 溶液并用 5 mL 无水乙醇稀释, 于 GEO 的 λ_{max} 波长处测定吸光度; 同时向锥形瓶的模拟溶剂体系中补加 1 mL 各模拟溶剂。GEO 从 S-A-g 膜中的释放测定进行到其释放动力学达到平衡值; 按式(1)计算 GEO 的累积释放百分比(%)。

$$累积释放百分比(\%)=\frac{M_t}{M}\times 100 \qquad 式(1)$$

式中, M_t 为 t h 内测定的 GEO 含量(mL), M 为与 2 cm×2 cm 尺寸的薄膜相同重量的薄膜中最初负载的 GEO 总量(mL)。

表 1 模拟溶剂类型

Table 1 Type of stimulation solvent

水性食品模拟物		脂肪类食品模拟物	
蒸馏水	10%乙醇	50%乙醇	95%乙醇/正己烷
模拟具有水连续相的食物	模拟脂肪含量较低的食品(如鸡胸肉、南瓜)或琼脂培养基	模拟脂肪含量较高的体系(奶酪)、水包油乳液和酒精食品	模拟具有脂肪连续相的食物(如脂肪、油)

1.2.5 GEO 的膜基质单侧释放 参照陈曦[18] 所述方法并作修改。在 1.2.4 中, 由于海藻酸钠和琼胶的高亲水性, S-A-g 抗菌膜与水性模拟溶剂接触一定时间后, 发生明显的溶胀而破裂, 甚至溶解; 因此单侧释放试验选用 95% 乙醇、正己烷为食品模拟液。往圆柱形玻璃瓶中分别加满 95% 乙醇、正己烷溶剂, 与用瓶口外径大小一致的薄膜圆片的内层膜贴紧瓶口, 然后依次在膜片上放置保鲜袋、PVDC 阻隔保鲜膜、铝箔, 盖上瓶盖并旋紧、静置, 期间每 12 h 取样测定释放的 GEO 含量并计算累积释放百分比。

1.2.6 GEO 释放行为和主要机制评价 为描述精油从 S-A-g 薄膜迁移和向模拟溶剂释放的过程, 在与释放研究相同的实验操作条件下, 使用式(2)~式(5)所示的数学模型方程来描述 GEO 释放所涉及的释放行为和主要机制。

$$Rigter\text{-}Peppas模型:\ M_t/M_\infty=kt^n \qquad 式(2)$$

$$Peppas\text{-}Sahlin模型:\ M_t/M_\infty=k_1t^n+k_2t^{2n} \qquad 式(3)$$

$$Kopcha模型:\ M_t=k_1t^{1/2}+k_2t \qquad 式(4)$$

$$Peleg模型:\ M_t=t/(k_1+k_2t) \qquad 式(5)$$

式中: M_t、M_∞、k、n、t 分别表示 t 时刻释放的 GEO 总量(μg)、无限时间释放的精油量(μg)、释放速率常数(h^{-n})、Fickian 释放指数(无量纲)、采样时间(h)。式(2)中, n 为释放指数(如果 0.89≤n≤1, 主要的释放机制是侵蚀; 如果 n≤0.45, 释放机制通常基于 Fickian 扩散, 如果 0.45<n<0.89, 释放 GEO 的主导机制是非 Fickian)。式(3)(4)中, k_1 是 Fickian 释放常数($mg\cdot h^{-1/2}$), k_2 是侵蚀常数($mg\cdot h^{-1}$)。式(5)中的 $1/k_1$ 和 $1/k_2$ 分别代表均衡(M_∞)下 GEO 的释放速率($h\cdot mg^{-1}$)和释放量(mg^{-1})。采用 OriginPro 2021 软件用于将动力学释放数据与各种数学模型进行拟合。

1.2.7 草鱼肉的薄膜保鲜处理 将新鲜的草鱼脊背肉切成尺寸为 3 cm×3 cm×2 cm 的肉块后, 用无菌盐水冲洗肉块并晾干, 随机分为 3 大组, 然后用 S-A-g 薄膜包装并置于事先已消毒的保鲜盒中(标记为 S-A-GEO); 不做任何包装处理的鱼肉样品为空白对照组(标记为 CK), 分别用不含 GEO 的薄膜包装的样品(标记为 S-A-0)和用 PE 膜包装的样品(标记为 PE)为对照组。将上述各处理组样品置于 4 ℃ 冰箱中冷藏 15 d, 每 3 d 取样并测定鱼肉样品的嗜冷菌计数值(psychrotrophic count, PTC)、菌落总数(total viable bacterial count, TVC)、挥发性盐基氮(total volatile base nitrogen, TVB-N), 并进行感官评价; 其中, 菌落总数测定按 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》进行[19], TVB-N 值测定按 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》进行[20], 嗜冷菌测定参照 Zhang 等[21] 法进行。样品贮藏期间的感官评价参考 GB 2733-2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》进行[22], 选择 10 名熟悉主要感官评估技术并具有鱼肉评估经验的半训练有素的成员为小组成员, 采用 5 分制量表法(1 为极不喜欢, 5 为极喜欢)对样品进行整体可接受性评分, 总分为 3 分及以上的样品被认为是可接受的。

1.3　数据处理

各试验指标测定至少 3 次平行，测定结果均表示为平均值±标准偏差。使用 SPSS 22.0 统计分析软件，采用 Duncan 多范围测试，进行单因素方差分析（ANOVA）并确定每个平均属性值的显著性（$P<0.05$）。

2　结果与分析

2.1　生姜精油最大吸收波长与标准曲线

由于不同物质的吸收波长不同，因而表现出不同的特征吸收峰。从图 1 可看出，以 α-姜烯、α-姜黄烯、β-倍半水芹烯为主要组分的生姜精油在 190~380 nm 之间出现多个特征吸收峰；一方面，生姜精油是混合物，其所含的主要化学组分会呈现不同的特征吸收峰；另一方面，作为溶剂的正己烷在紫外区也有一定的强吸收，且为尽量减少短波长下的强紫外吸收干扰，并依据共轭双键在 210~280 nm 有强吸收的特性，确定 278 nm 为含有共轭双键结构的生姜精油的主特征吸收峰。

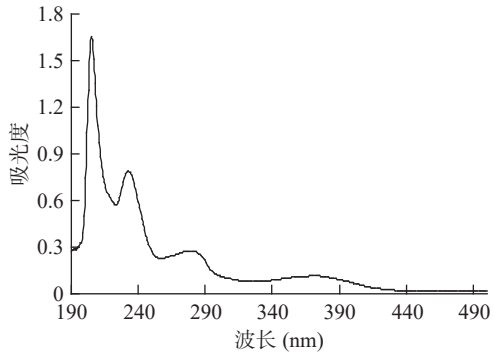


图 1　生姜精油紫外-可见吸收光谱图

Fig.1　UV-Vis absorption spectrum of GEO

配制浓度为 0~50 nL/mL 的 GEO-正己烷溶液，测定其在 278 nm 波长的吸光度以绘制标准曲线，拟合得线性回归方程 y=0.0266x−0.0039，R^2=0.999；说明 GEO 在所测浓度范围内与吸光度呈现良好的线性关系。

2.2　GEO 的浸渍释放与模型拟合

2.2.1　GEO 的浸渍释放　精油在不同食品模拟物中的释放是一个较复杂的过程，受精油类型、薄膜结构和组成、溶剂类型与极性、处理时间、食物特性等多种因素影响[23]。在释放初期，模拟物溶剂会侵蚀薄膜并进入薄膜内部，从而引起薄膜的润胀和溶解。随着时间的推移，薄膜基质的水合程度加剧，逐渐变得疏松，薄膜基质之间的相互作用被破坏，导致精油快速释放。

如图 2 所示，除正己烷溶剂之外的每个释放曲线都存在类似的变化趋势，且释放曲线总体呈现为两步模式：首先是快速释放，尤其是在 95% 乙醇和蒸馏水中，24 h 已分别达到累积释放量的 75.95%、69.62%；其次是膜基质中的 GEO 在达到平衡之前的稳定缓慢释放，表明 GEO 在蒸馏水、10% v/v 乙醇、50% v/v 乙醇、95% v/v 乙醇溶液中从薄膜中的释放得到较好控制；急剧释放可能归因于 GEO 以相对较短的扩散路径在薄膜表面附近渗入。GEO 在 5 种食品模拟物中的累积释放量在孵育时间内均呈增加趋势，且表现为 95% 乙醇>蒸馏水>50% 乙醇>10% 乙醇>正己烷，一方面可能是由于 SA、AG 属于极性较大的高分子聚合物，且两者的分子链上富含-OH，具有良好的亲水性，与极性同样较大的水或水-乙醇混合液接触后，薄膜基质间的主作用力被破坏，基质网络和结构变得越来越松散，从而利于 GEO 的释放[24]。另一方面，水是大多数水胶体基薄膜中的最普遍、最常见的增塑剂，可通过引起天然聚合物基质结构的变化而对薄膜基质中活性物质的迁移、扩散与释放过程产生影响[25]。综合上述结果，S-A-g 抗菌膜更适用于极性较低的脂肪性食品。

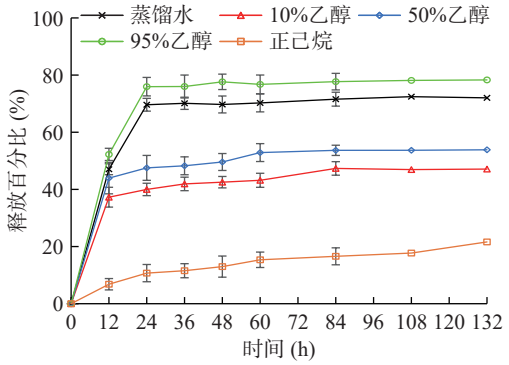


图 2　S-A-g 膜在不同模拟溶剂中的浸渍释放曲线

Fig.2　Release curve of S-A-g film immersed in stimulant solvent

不同于本试验结果的是，对百里香精油在蒸馏水、50% 乙醇、95% 乙醇 3 种模拟介质中从壳聚糖薄膜释放的研究发现，百里香精油在 95% 乙醇中的释放速率最慢，其次是蒸馏水和 50% 乙醇；且在 95% 乙醇中的释放呈现“快-慢-快”的趋势[26]。Lee 等[27] 则观察到丁香精油从壳聚糖-埃洛石纳米粘土薄膜中的最快释放出现在 50% 乙醇模拟物中，比 10% 乙醇和 95% 乙醇快近 3 倍，并将这种现象解释为精油在乙醇中的溶解性和薄膜膨胀。上述两项研究与 Sánchez-González 等[28] 报道的乙醇含量越高，溶剂体系极性越低，薄膜中活性物质释放越慢的结论也不一致。除此之外，Ke 等[29] 发现，45 ℃ 下，肉桂醛从玉米淀粉基薄膜向 10% 乙醇或 95% 乙醇的扩散百分比的总体趋势相似。因此，精油从聚合物基质的扩散和向环境的释放是一个复杂的过程，与薄膜溶胀和溶解度、溶液极性、精油类型、环境条件（如温度、湿度）等诸多因素有关。

本试验中，在最小极性的正己烷溶剂中，GEO 的扩散释放最慢，这可能是由于以下事实：琼胶海藻酸钠聚合物基质在该溶剂中的溶胀程度很低，导致聚合物链的自由体积减小，从而限制了 GEO 在基质内的扩散进程；但随着薄膜表层 GEO 的逐渐溶解和释

放，正己烷反向进入并填充基质中的孔隙，引起基质的轻度膨胀，一定程度上加快溶解基质内部的 GEO，因而表现为正己烷介质中的 GEO 累积释放量在试验周期内缓慢增加。

2.2.2 GEO 浸渍释放的模型拟合 为进一步研究 GEO 在不同食品模拟溶剂中从薄膜中的释放，采用 4 种典型模型来拟合释放行为和描述释放过程，对应的 R^2（决定系数）和释放特性参数见表 2。

基于 Ritger-Peppas 的标准释放动力学，释放指数 n>0.45 属于非 Fickian 机制。如表 2 所示，该模型均呈现 n<0.45，表明 GEO 在这 5 种模拟液中从 S-A-g 薄膜中的主要释放符合 Fickian 机制。此外，用 Peppas-Sahlin 模型拟合所得的释放指数同样呈现 n<0.45（正己烷除外），进一步表明 GEO 从 S-A-g 薄膜中的主要释放符合 Fickian 机制。

对于同一种食品模拟液中的释放情况，与 R^2 值的比较表明，Peleg 模型最能描述在蒸馏水（R^2，0.62371→0.97979）和 95% 乙醇（R^2，0.72684→0.97609）中的释放行为，Peppas-Sahlin 模型最能描述在 10% 乙醇（R^2，0.78230→0.99408）和 50% 乙醇（R^2，0.74174→0.99386）中的释放，而 Kopcha 模型（R^2，0.97753→0.99079）最能描述在正己烷中的释放行为。注意到 Peppas-Sahlin 模型和 Kopcha 模型的 case-II 弛豫贡献常数 k_2 的值非常小，并对于所有食品模拟液几乎都是负值，表明 case-II 松弛在释放过程中没有显著贡献，再次表明 GEO 在模拟液中从 S-A-g 薄膜中的主要释放符合 Fickian 机制。综合在 5 种模拟液中获得的 R^2 值来看，Peppas-Sahlin 模型能更佳、更全面地描述 GEO 在代表水性食品和脂肪食品中的浸渍释放，其次为 Peleg 模型；同时也表明 GEO 在 S-A-g 薄膜基质中的释放主要通过扩散过程进行。同样，Zhila 等[30] 研究了来自淀粉基纳米复合膜的丁香精油在蒸馏水、10% 乙醇和 50% 乙醇中 120 h 的释放行为，他们认为设计结构中的丁香精油的释放数据符合 Peleg 模型，且观察到丁香精油在模拟食品介质中是 Fickian 扩散。

2.2.3 GEO 的单侧释放与模型拟合

2.2.3.1 GEO 的单侧释放 GEO 在代表高脂肪含量食品的 95% 乙醇和正己烷两种模拟液中从 S-A-g 的结构中释放 132 h 的结果如图 3 所示。根据释放速率，在 95% 乙醇中观察到在测试前 12 h 内的快速释放，释放高达 42.47%；然后持续缓慢释放至基本恒定；这种行为可能是由于 S-A-g 内层膜表面的 GEO 与溶剂接触后，迅速迁移扩散到溶剂中，并使位于靠近表面区域的精油在测试的早期阶段被释放[31]。此后，由于 S-A-g 膜结构中的孔隙，乙醇渗透进入膜基质并通过与 GEO 的接触而逐渐增加薄膜深层基质中的 GEO 向表面迁移以及向介质中的释放。此外，GEO 的释放导致薄膜基质和模拟溶剂之间的浓度梯度降低，从而引起薄膜网络的释放速率降低，直至液-固平衡。

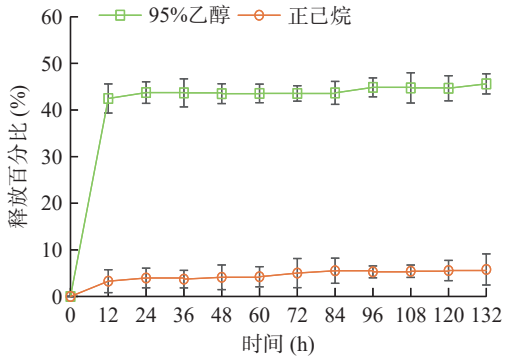


图 3 S-A-g 膜在不同模拟溶剂中的单侧释放曲线

Fig.3 One-way release curve of S-A-g film in stimulant solvent

琼胶-海藻酸钠因其亲水性，可与极性溶剂（95% 乙醇）形成氢键，这将导致水渗透到膜基质中引起膜基质的润胀并为乙醇-多糖基质相互作用提供条件。由此，基于薄膜基质与介质之间浓度梯度的差异，琼胶-海藻酸钠内层膜中的 GEO 扩散到介质中[32]。同时，模拟溶剂的极性与包装膜极性之间的差异会影响精油的扩散，即当两相极性相同或相近时，溶剂可以

表 2 S-A-g 薄膜在不同模拟溶剂的 GEO 的累积释放特性

Table 2 Cumulative release profile of GEO from S-A-g films in different stimulant solvent

模型	参数	蒸馏水	10%乙醇	50%乙醇	95%乙醇	正己烷
Rigter-Peppas	k	49.534	28.473	36.591	51.629	2.696
	n	0.077	0.106	0.081	0.090	0.419
	Adjusted R^2	0.62371	0.96251	0.94044	0.72684	0.98376
Peppas-Sahlin	k_1	40.938	21.581	40.715	47.429	1.904
	k_2	−5.552	7.239	−5.165	−6.582	−0.025
	n	0.239	0.080	0.109	0.214	0.533
	Adjusted R^2	0.96296	0.99408	0.99386	0.96307	0.99044
Kopcha	k_1	0.00126	0.00077	0.00092	0.00136	0.00022
	k_2	−4.838E-5	−2.784E-5	−3.431E-5	−5.090E-5	−2.703E-6
	Adjusted R^2	0.77713	0.78230	0.74174	0.77622	0.99079
Peleg	k_1	705.187	1256.596	817.956	706.802	23264.019
	k_2	129.553	194.197	174.027	115.892	271.144
	Adjusted R^2	0.97979	0.96635	0.98178	0.97609	0.97753

吸附在食品模拟物与聚合物膜的界面上，并渗透到膜基质中，使膜膨胀，同样也利于 GEO 向 95% 乙醇介质的迁移和扩散[33]。

相比而言，在整个单侧释放试验周期内，S-A-g 薄膜中的 GEO 在正己烷中的释放总体呈现缓慢增加趋势，且幅度远低于 95% 乙醇介质（图 3）；这可能是由于 SA 和 AG 都是水溶性多糖，可以吸收 95% 乙醇中存在的少量水而发生润胀，从而使膜基质生成更大的精油外扩和乙醇内渗的通道，产生更开放的结构，并因此提高了 GEO 的迁移率，利于 GEO 的扩散与释放[34]。综合 2.2.1 中浸渍释放试验结果，说明薄膜基质中精油等活性物质的释放速率受活性化合物含量、组成、成膜方法、模拟物介质的影响较大。

2.2.3.2　GEO 单侧释放的模型拟合　为研究从 S-A-g 双层抗菌膜中单侧释放 GEO 所涉及的机制，使用 1.2.6 中所列的 4 种数学模型拟合其释放行为；同时，根据决定系数（R^2）和释放特性参数（表 3）选择描述 GEO 从设计结构中释放行为的最佳模型。如表 3 所示，采用 Ritger-Peppas 模型研究薄膜的释放行为所得到的 n 参数均<0.45，即薄膜的 GEO 释放遵循 Fickian 扩散；但在 95% 乙醇模拟液中，拟合模型的 R^2 值（0.56912）较低。就相同食品模拟液中的释放行为来说，均是 Peppas-Sahlin 模型的 R^2 最高（95% 乙醇介质为 0.99172、正己烷介质为 0.97499），所以该模型很好地描述了在这两种食品模拟物中 S-A-g 抗菌膜结构中 GEO 的释放行为，其次为 Peleg 模型；这与浸渍释放试验的结果一致。此外，在 Rigter-Peppas 方程中，指数 n 小于 0.45，Peppas-Sahlin 方程中的 $k_1/k_2>1$；因此，可以得出结论，GEO 从 S-A-g 薄膜单侧释放的主要机制是 Fickian 扩散；这也与 Zhila 等[30]、Arancibia 等[35]、Kashiri 等[36] 的研究结果相一致。对于上述模型在拟合活性成分从基质向环境迁移-扩散-释放的实际过程中，大多是基于一定假设条件的预设，主要包括：a.活性成分在基质内部呈均匀分布状态，b.模拟物或模型食品中含有的活性成分浓度或含量为零，c.过程的传质系数不受活性成分浓度的影响。然而，对于以多糖为代表的生物基抗菌包装膜的实际场景应用，抗菌成分的释放情况往往更为复杂；比如膜基质可能在精油释放过程受湿度等环境因素影响而发生溶胀，可导致由膜基质结构变化而引起聚合物的自由体积、链段迁移速率发生变化，从而影响精油的释放。同时，精油是由一系列小分子化合物所组成的复杂混合物，其化合物组成与含量差异也在很大程度上影响其在薄膜基质和特定使用环境中的扩散、迁移与释放特性；因此，需进一步在上述传统的经典动力学模型拟合条件下，扩大在真实食品和复杂场景中的应用范围，强化不同实际场景和条件下的释放模拟，以更好地量化表征以精油为代表的抗菌活性成分在生物基包装薄膜中的实际应用效果。

表 3　S-A-g 薄膜在不同模拟溶剂的 GEO 的累积释放特性

Table 3　Cumulative release profile of GEO from S-A-g films in different stimulant solvent

模型	参数	模拟溶剂类型	
		95%乙醇	正己烷
Rigter-Peppas	k	37.80037	1.52344
	n	0.0392	0.27415
	Adjusted R^2	0.59612	0.93035
Peppas-Sahlin	k_1	26.20852	1.32267
	k_2	11.63105	0.30367
	n	0.02948	0.20416
	Adjusted R^2	0.99172	0.97499
Kopcha	k_1	0.00378	3.06823E-4
	k_2	−1.99095E-4	−1.02874E-4
	Adjusted R^2	0.79009	0.95309
Peleg	k_1	70.93064	8249.00297
	k_2	59.01473	409.74094
	Adjusted R^2	0.98712	0.93087

2.3　S-A-g 抗菌膜保鲜草鱼肉的性能评价

2.3.1　菌落总数（TVC）测定结果　所有处理组样品的 TVC 值均随贮藏时间延长而增加（图 4），尤其是 CK 组样品，其 TVC 值在第 6 d 时达到 6.87 lg CFU/g，接近推荐限值 7 lg CFU/g[37]；而 PE 组、S-A-0 组、S-A-GEO 组样品的 TVC 值约分别在第 11、10、13 d 时接近该推荐限值。同时，S-A-GEO 组样品的 TVC 值在整个贮藏期间均显著低于 CK 组和 S-A-0 组（$P<0.05$），也显著低于 PE 组（第 15 d 除外），这表明精油的存在可有效抑制鱼肉表面的微生物生长和繁殖，且参照推荐限值，S-A-GEO 膜包装处理较 CK 组、PE 组和 S-A-0 组可分别延缓草鱼肉约 6、2 和 3 d 的货架期。同时，S-A-GEO 组样品的 TVC 值在前 6 d 内的增加幅度变化较小，这可能与 GEO 在早期从膜基质的快速释放有关，而从第 9 d 至贮藏期结束，GEO 大体处于持续缓慢释放且在鱼肉表面维持相对较低的恒定浓度，对肉样表面微生物的生长与繁殖抑制效能逐渐减弱，因而表现出 TVC 值在此阶段的快速上升；由此可看出整个过程的 TVC 值变化与 GEO 的浸渍释放和单侧释放规律总体相符。

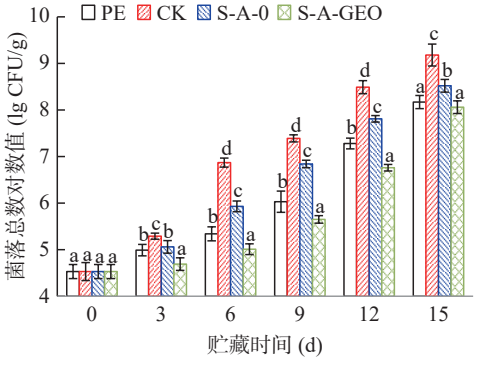


图 4　不同处理组样品的菌落总数变化

Fig.4　TVC changes in different treatment groups

注：同一时间点不同小写字母表示存在显著性差异（$P<0.05$）；图 5~图 6 同。

2.3.2 嗜冷菌(PTC)测定结果 嗜冷菌是造成肉类制品在低温有氧贮藏环境下发生腐败变质的主要微生物类型[38]。从图 5 可看出,类似菌落总数的变化趋势,各处理组样品的 PTC 值在贮藏期间均不断增加,且 CK 组呈现出最快的嗜冷菌生长速度,在第 0 d 除外的其余时间点均显著高于 S-A-GEO 组(P<0.05),这表明 GEO 协同低温对嗜冷菌的生长繁殖起到了理想的抑制作用,能较好地延缓草鱼肉的腐败劣变。此外,S-A-GEO 组样品第 6 d 的 PTC 值相比第 0 d 的增幅仅为 5.53%,这进一步证实薄膜基质中的 GEO 在早期的快速释放发挥了良好的抑菌效果;同时,从第 9 d 至贮藏期结束,S-A-GEO 组鱼样的嗜冷菌数量较第 0 d 的嗜冷菌数量分别增加了 22.84%、49.76%、71.39%,表明膜基质中的 GEO 对嗜冷菌的抑制能力随时间推移而逐渐减弱,这符合 GEO 在膜基质释放后期逐渐减少的变化趋势。此外,S-A-GEO 组样品的 PTC值从第 3 d 开始的贮藏期内显著低于 PE 组和 S-A-0 组(P<0.05),这与 GEO 在实验过程的持续释放所创造的良好抑菌微环境有关,且初步表明 S-A-GEO 薄膜的抗菌性能与阻隔性能的协同效应在草鱼肉低温保鲜方面的效果总体优于 PE 膜单一的高阻隔性。

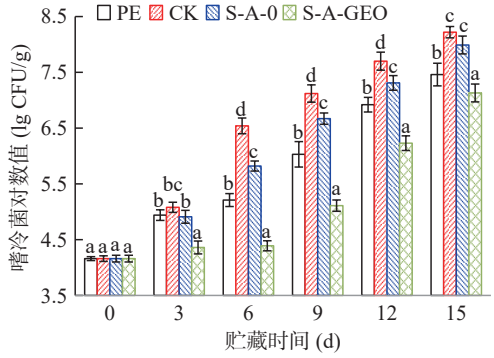


图 5 不同处理组样品的嗜冷菌变化

Fig.5 PTC changes in different treatment groups

2.3.3 挥发性盐基氮(TVB-N)值 动物性食品在贮藏期间,其所含蛋白质在内源性酶和细菌作用下会产生氨和胺等碱性含氮物质,这可以作为识别和评估鱼类产品新鲜度的指标。根据 GB 2733-2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》,TVB-N 值超过 25 mg/100 g 时,淡水鱼类将被视为变质[22]。图 6 显示,随着冷藏时间的延长,所有处理组样品的 TVB-N 值逐渐增大;其中,CK 组样品的 TVB-N 值上升速率最快,第 9 d 时已达 27.69 mg/100 g,其次为 PE 组和 S-A-0 组样品,且这两组样品的 TVB-N 值在整个贮藏期较为接近,均在第 9 d 时处于变质状态(分别为 26.45 mg/100 g 和 26.36 mg/100 g);而 S-A-GEO 处理组样品的 TVB-N 值升高相对缓慢,第 9 d 时仅为 19.36 mg/100 g(P<0.05),约在 11 d 时接近变质状态所对应的临界值,这可归因于薄膜基质中的 GEO 对鱼肉样品表面出现的细菌表现出有效的抑制或杀菌作用,从而延缓蛋白质降解过程。上述结果表明,以 TVB-N 值为指标,CK 组、PE 组、S-A-0 组、S-A-GEO 组样品的货架期约分别为 8、8、9、11 d,且 S-A-GEO 膜包装处理的草鱼肉储藏时间较 CK 组、PE 组和 S-A-0 组可分别延长 3、3、2 d 左右。此外,各处理组的 TVB-N 值均从第 6 d 开始上升幅度明显增大,这可能是由于膜基质中 GEO 在早期的快速释放较好地减缓了鱼肉样品因细菌分解蛋白质而产生的挥发性碱性含氮物质积累,而后期的 GEO 缓释使碱性含氮物质累积速率加快,并使体系微环境 pH 上升到内源性组织蛋白酶的较适范围,从而进一步激发酶的活性和加速鱼肉蛋白质的降解,导致 TVB-N 值迅速增加。

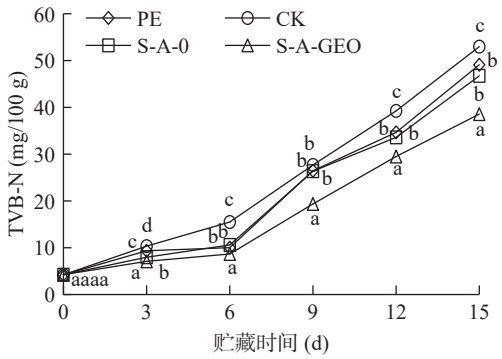


图 6 不同处理组样品贮藏期间的 TVB-N 值变化

Fig.6 Changes in TVB-N of different treatment groups during refrigeration

2.3.4 感官评价 动物性制品的颜色、气味等感官性状所构成的总体可接受度会影响消费者对产品的接受程度。从表 4 可看出,经不同处理的样品的整体可接受性随贮藏时间的延长而逐渐下降,尤其是 CK 组和 S-A-0 组,且这两组样品在第 6 d 时的整体可接受评分已低于 3 分,处于不可接受状态;PE 组样

表 4 不同包装处理的草鱼肉冷藏过程中的感官评价

Table 4 Sensory evaluation of grass carp sheet with different packaging treatments during refrigeration

处理组	贮藏时间(d)					
	0	3	6	9	12	15
CK	4.43±0.16^{a}	3.54±0.12^{a}	2.66±0.33^{a}	1.64±0.25^{a}	0.74±0.22^{a}	0.53±0.23^{a}
PE	4.47±0.14^{a}	3.98±0.17^{c}	3.02±0.33^{b}	2.68±0.19^{c}	1.97±0.39^{c}	1.26±0.18^{b}
S-A-0	4.41±0.13^{a}	3.78±0.14^{b}	2.99±0.13^{b}	2.01±0.19^{b}	1.49±0.25^{b}	0.68±0.23^{a}
S-A-GEO	4.44±0.11^{a}	4.23±0.18^{d}	3.73±0.24^{c}	3.19±0.15^{d}	2.53±0.18^{d}	1.99±0.29^{c}

注:同一列的不同字母表示差异显著(P<0.05)。

品第 6 d 的总体评分略高于 3 分，在后续各时间点均显著高于 CK 组和 S-A-0 组，表明 PE 的高阻隔性对延缓鱼肉腐败变质有一定的保护作用。相比而言，S-A-GEO 处理组样品在整个储存期间（除第 0 d 外）的综合评分最高，与其他处理组有显著差异（P<0.05），在第 9 d 时的整体可接受评分仍达 3.19，这可能是 GEO 较好地抑制了鱼肉表面和内部微生物的生长繁殖，从而使样品冷藏期延长至少 3 d。此外，根据评估结果和小组成员的观点，本研究中使用的含有 GEO 的薄膜对草鱼肉的感官特性没有不利影响。综合以上冷藏期间的感官、理化和微生物指标测定结果，表明 GEO 的添加可延长草鱼肉约 3 d 的冷藏货架期。

3　结论

本研究对含生姜精油的琼胶-海藻酸钠双层抗菌膜在不同食品模拟液中的浸渍释放和单侧释放动力学进行探讨，并用 4 种经典数学模型进行了释放行为的拟合；同时，将抗菌膜用于草鱼肉的冷藏保鲜。结果表明：除代表高脂食品的模拟液正己烷之外，GEO 在蒸馏水、10% v/v 乙醇、50% v/v 乙醇、95% v/v 乙醇溶液中的浸渍释放与单侧释放均呈首先快速释放、然后平稳持续释放的行为规律，表明 GEO 在所制备的 S-A-g 膜中实现了较好的缓释；且不同模型拟合 GEO 的释放行为结果表明，Peppas-Sahlin 模型被选为解释 GEO 从 S-A-g 薄膜浸渍和单侧释放行为的最佳机制，其次为 Peleg 模型，且 GEO 从 S-A-g 薄膜释放的主要机制是 Fickian 扩散。

S-A-g 膜对草鱼肉的贮藏保鲜试验结果表明：GEO 赋予薄膜的抗菌作用及其从膜基质的先快速后持续缓慢释放能有效提升草鱼肉冷藏期间的微生物品质，延长约 3~6 d 的冷藏货架期；也能延缓鱼肉蛋白的微生物分解和减少挥发性碱性含氮化合物的内源性生成，延长约 3 d 的冷藏货架期。同时，以总体感官可接受度为评价指标，GEO 在 S-A 膜中的添加及其释放特性可延长鱼肉样品至少 3 d 的冷藏货架期。综合上述感官、理化和微生物指标测定结果，可推断 S-A-GEO 双层膜能有效延长草鱼肉约 3 d 的冷藏货架期，为以草鱼肉为代表的鱼类保鲜提供了一定参考。另一方面，引起鱼类等水产和其它动物性食品腐败变质的微生物群通常比较复杂，且各类动物性食品的优势腐败菌或特征腐败菌各异；为更好地探讨含精油的多糖基活性薄膜的保鲜效用，需在今后的研究中进一步综合质构、生物胺、K 值、总巯基（SH）等指标的测定，并结合高通量测序技术、固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术等揭示活性包装薄膜的冷藏保鲜机理，解析鱼肉品质劣变机制及其与包装微环境的互作网络。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 陈静. 油茶籽饼蛋白-海藻酸钠活性包装膜的制备及其在水果保鲜中的应用研究[D]. 南宁：广西大学, 2025. [CHEN Jing. Preparation of oil tea seed cake protein sodium alginate active packaging film and its application in fruit preservation[D]. Nanning: Guangxi University, 2025.]

[2] 易靖. 没食子酸/Ag@CD-MOFs 玉米醇溶蛋白活性包装膜的研制及其应用研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2025. [YI Jing. Gallic acid/ Ag@CD-MOFs research on the development and application of corn alcohol soluble protein active packaging film[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2025.]

[3] 吴思语. 植物精油复合花青素膜的制备及在牛肉保鲜中的应用[D]. 长沙：中南林业科技大学, 2025. [WU Siyu. Preparation of plant essential oil composite anthocyanin film and its application in beef preservation[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2025.]

[4] SALVUCCI E, ROSSI M, COLOMBO A, et al. Triticale flour films added with bacteriocin-like substance (BLIS) for active food packaging applications[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 19: 193−199.

[5] APPENDINI P, HOTCHKISS J H. Review of antimicrobial food packaging[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2002, 3(2): 113−126.

[6] SINGH P, MAGALHãES S, ALVES L, et al. Cellulose-based edible films for probiotic entrapment[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 88: 68−74.

[7] NOORBAKHSH-SOLTANI S M, ZERAFAT M M, SABBAGHI S. A comparative study of gelatin and starch-based nanocomposite films modified by nano-cellulose and chitosan for food packaging applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 189: 48−55.

[8] RIQUELME N, HERRERA M L, MATIACEVICH S. Active films based on alginate containing lemongrass essential oil encapsulated: Effect of process and storage conditions[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 104: 94−103.

[9] HAGHIGHATPANAH N, OMAR-AZIZ M, GHARAGHANI M, et al. Effect of mung bean protein isolate/pullulan films containing marjoram (*Origanum majorana* L.) essential oil on chemical and microbial properties of minced beef meat[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 201: 318−329.

[10] HASSAN B, CHATHA S A S, HUSSAIN A I, et al. Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 109: 1095−1107.

[11] WANG L F, RHIM J W. Preparation and application of agar/alginate/collagen ternary blend functional food packaging films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 80: 460−468.

[12] LIU S, LI Y, LI L. Enhanced stability and mechanical strength of sodium alginate composite films[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 160: 62−70.

[13] JOÃO R, VICTOR G, ANA L. Chitosan/montmorillonite bionanocomposites incorporated with rosemary and ginger essential oil as packaging for fresh poultry meat[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2018, 17: 142−149.

[14] MIN T, SUN X, YUAN Z, et al. Novel antimicrobial packaging film based on porous poly(lactic acid) nanofiber and polymeric coating for humidity-controlled release of thyme essential oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 135: 110034.

[15] JAMSHIDIAN M, TEHRANY E A. Antioxidants release from solvent-cast PLA film: Investigation of PLA antioxidant-active packaging[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6: 1450−1463.
[16] EVA H, MARIA V, AMPARO C. Starch-polyester bilayer films with phenolic acids for pork meat preservation[J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132650.
[17] SIMIN H, CHIN P, WEI-LEE J, et al. Modification of physicochemical and mechanical properties of a new bio-based gelatin composite films through composition adjustment and instantizing process[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 116: 108575.
[18] 陈曦. 新型海藻酸钠/钙食品缓释抗菌包装膜的制备及其缓释机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018. [CHEN Xi. Preparation and study on the sustained-release mechanism of a new sodium alginate/calcium food sustained-release antibacterial packaging film [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.]
[19] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GB 4789.2-2022 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. [National Health Commission of the People's Republic of China. GB 4789.2-2022 National food safety standard-Microbiological examination of food-Determination of total bacterial count[S]. Beijing: China Standards Press, 2022.]
[20] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GB 5009.228-2016 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health Commission of the People's Republic of China. GB 5009.228-2016 National food safety standard-Determination of volatile basic nitrogen in foods[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.]
[21] ZHANG Y, ZHOU L, ZHANG C, et al. Preparation and characterization of curdlan/polyvinyl alcohol/thyme essential oil blending film and its application to chilled meat preservation[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 247: 116670.
[22] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GB 2733-2015 食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. [National Health Commission of the People's Republic of China. GB 2733-2015 National food safety standard for fresh and frozen animal aquatic products[S]. Beijing: China Standards Press, 2015.]
[23] LIU Z, LIN D, LI N, et al. Characterization of konjac glucomannan-based active films loaded with thyme essential oil: Effects of loading approaches[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107330.
[24] DIETZ C, SHUBHAM S, AMIT K, et al. Seaweeds polysaccharides in active food packaging: A review of recent progress[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 559−572.
[25] FABRA M J, HAMBLETON A, TALENS P, et al. Effect of ferulic acid and α-tocopherol antioxidants on the physicochemical properties of sodium caseinate-based films[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 1091−1099.
[26] LIAN H, PENG Y, SHI J, et al. Effect of emulsifier hydrophilic-lipophilic balance (HLB) on the release of thyme essential oil from chitosan films[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105213.
[27] LEE M H, KIM S Y, PARK H J. Effect of halloysite nanoclay on the physical, mechanical, and antioxidant properties of chitosan films incorporated with clove essential oil[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 58−67.
[28] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ L, CHÁFER M, GONZÁLEZ-MARTÍNEZ C, et al. Study of the release of limonene present in chitosan films enriched with bergamot oil in food simulants[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(1): 138−143.
[29] KE J, XIAO L, YU G, et al. The study of diffusion kinetics of cinnamaldehyde from corn starch-based film into food simulant and physical properties of antibacterial polymer film[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 125: 642−650.
[30] ZHILA A, AKRAM K, HASSAN R. Sustained release modeling of clove essential oil from the structure of starch-based bionanocomposite film reinforced by electrosprayed zein nanoparticles [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 173: 193−202.
[31] REZAEINIA H, GHORANI B, EMADZADEH B, et al. Electrohydrodynamic atomization of Balangu (*Lallemantia royleana*) seed gum for the fast-release of *Mentha longifolia* L. essential oil: Characterization of nano-capsules and modeling the kinetics of release[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 374−385.
[32] GIMÉNEZ B, LÓPEZ DE LACEY A, PÉREZ-SANTÍN E, et al. Release of active compounds from agar and agar-gelatin films with green tea extract[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30: 264−271.
[33] VÍCTOR H, CAMPOS-REQUENA, BERNABÉ L, et al. Release of essential oil constituent from thermoplastic starch/layered silicate bionanocomposite film as a potential active packaging material[J]. European Polymer Journal, 2018, 109: 64−71.
[34] AMALRAJ A, HAPONIUK J T, THOMAS S, et al. Preparation, characterization and antimicrobial activity of polyvinyl alcohol/gum arabic/chitosan composite films incorporated with black pepper essential oil and ginger essential oil[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 151: 366−375.
[35] ARANCIBIA M, GIMÉNEZ B, LÓPEZ-CABALLERO M E, et al. Release of cinnamon essential oil from polysaccharide bilayer films and its use for microbial growth inhibition in chilled shrimps [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59: 989−995.
[36] KASHIRI M, CERISUELO J, DOMÍNGUEZ I, et al. Zein films and coatings as carriers and release systems of *Zataria multiflora* Boiss. essential oil for antimicrobial food packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 70: 260−268.
[37] HE F, KONG Q, JIN Z, et al. Developing a unidirectionally permeable edible film based on κ-carrageenan and gelatin for visually detecting the freshness of grass carp fillets[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241: 116336.
[38] 胥凤芹. 不同臭氧水杀菌处理对冰鲜鸡腿保鲜效果的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023. [XU Fengqin. Study on the preservation effect of different ozone water sterilization treatment on frozen chicken legs[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023.]