刘金金, 雷红, 王濛濛, 等. 肉桂精油-介孔 SBA15 复合物的制备及其对青条鱼的保鲜效果 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 356−364. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120280

LIU Jinjin, LEI Hong, WANG Mengmeng, et al. Preparation of Cinnamon Essential Oil-mesoporous SBA15 Complex and Its Preservation Effect on *Pneumatophorus japonicus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 356−364. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120280

· 贮运保鲜 ·

肉桂精油-介孔 SBA15 复合物的制备及其对青条鱼的保鲜效果

刘金金, 雷　红*, 王濛濛, 农家慧

（南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏南京 210023）

摘　要: 以介孔材料 SBA15 和肉桂精油为原料制备肉桂精油-SBA15 复合物（cinnamon essential oil-mesoporous SBA15 complex，CEO-SBA15），通过单因素实验探究不同条件对 CEO-SBA15 负载率和得率的影响，得到 CEO-SBA15 复合物最佳工艺条件，并以扫描电镜、傅里叶红外光谱、X 射线光电子能谱和缓释行为对 CEO-SBA15 复合物进行结构表征和性能分析，同时探究其对青条鱼在 4 ℃ 下的保鲜效果。结果表明，CEO-SBA15 复合物最佳制备工艺条件为：SBA15 与肉桂精油质量比 1∶20、超声时间 20 min、吸附时间 24 h，该条件下制备的 CEO-SBA15 复合物的精油负载率为 66.22%±0.58%，得率为 77.65%±1.62%。SEM 观察 CEO-SBA15 为纤维状，FTIR 和 XPS 表明肉桂精油通过物理吸附被装载进 SBA15 的表面及内部，缓释行为分析结果表明，CEO-SBA15 可达到肉桂精油的长效释放作用。CEO-SBA15 复合物能够有效降低青条鱼在贮藏期内的挥发性盐基氮、三甲胺、硫代巴比妥酸含量，有效延缓青条鱼 pH 上升速率和颜色、气味的劣变，对青条鱼具有良好的保鲜作用，为 CEO-SBA15 复合物作为食品除味保鲜剂的应用提供新思路。

关键词: 肉桂精油, 介孔材料 SBA15, 性能表征, 青条鱼, 保鲜

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0356−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120280

本文网刊:

Preparation of Cinnamon Essential Oil-mesoporous SBA15 Complex and Its Preservation Effect on *Pneumatophorus japonicus*

LIU Jinjin，LEI Hong*，WANG Mengmeng，NONG Jiahui

（College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing 210023, China）

Abstract: CEO-SBA15 complex was prepared in the present study, exploiting mesoporous material SBA15 and cinnamon essential oil (CEO) as raw materials. The conditions of optimal process of CEO-SBA15 complex were obtained by single factor experiment, investigating the effect of different conditions on the load rate and yield of CEO-SBA15. The structure and properties of CEO-SBA15 complex were characterized by scanning electron microscopy, Fourier infrared spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy and the release behavior of CEO-SBA15. The effect of CEO-SBA15 on preservation of *Pneumatophorus japonicus* at 4 ℃ was also investigated. Results showed that the optimum preparation conditions of CEO-SBA15 complex were as follows: mass ratio of SBA15 to cinnamon essential oil 1∶20, ultrasonic time 20 min, adsorption time 24 h. Under these conditions, the essential oil load rate of CEO-SBA15 complex was 66.22%±0.58%, and the yield was 77.65%±1.62%. SEM investigation showed that CEO-SBA15 was fibrous in shape. FTIR and XPS showed that cinnamon essential oil was loaded into the surface and interior of SBA15 by physical adsorption. The sustained release behavior analysis of CEO-SBA15 showed that the long-term release effect of cinnamon essential oil could be achieved.

收稿日期: 2024−12−23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目（31872899）; 江苏高校优势学科建设工程资助项目（PAPD）。

作者简介: 刘金金（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品贮藏与保鲜, E-mail: jinjinliu0722@163.com。

*** 通信作者:** 雷红（1973−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品功能因子, E-mail: leihong56@163.com。

Moreover, CEO-SBA15 compound could effectively reduce the contents of volatile basic nitrogen, trimethylamine and thiobarbituric acid during the storage period, and could effectively delay the increasing rate pH and the deterioration of color and odor of green fillet, which indicated that CEO-SBA15 had a good preservative effect on green fillet. The present study provided a new idea for the application of CEO-SBA15 compound as the agent of food deodorizer and preservative.

Key words: cinnamon essential oil; mesoporous material SBA15; properties characterization; *Pneumatophorus japonicus*; preservation

青条鱼(*Pneumatophorus japonicus*)，也名鲭鱼、鲐鱼，因其高产量、广分布和高营养价值，已成为我国常见的海洋经济鱼类[1]。青条鱼含有丰富的维生素、蛋白质和健康不饱和脂肪酸(如二十碳四烯酸和二十二碳六烯酸)等营养物质[2−3]，然而其在贮藏转运和售卖过程中易发生蛋白质降解和脂肪氧化等反应而导致鱼体变质，其体内的氧化三甲胺也在微生物或酶的作用下转化为三甲胺，使其产生浓重鱼腥味[4−5]，影响其销售和食用。因此减少青条鱼中三甲胺异味并减缓其腐败变质是一个亟待解决的问题。

植物精油具有易挥发、抑菌和抗氧化特性[6−7]，近年来被广泛应用于各类食品的保鲜[8−10]。肉桂精油是其中的一种常见精油，Jitpasutham 等[11] 将壳聚糖和肉桂精油纳米乳液结合，开发了一款绿色薄膜对虾米进行保鲜，发现在贮藏期内虾米的三甲胺和挥发性盐基氮的含量显著减少；Zhu 等[12] 结合肉桂精油和山仓子制成纳米乳剂对植物肉进行保鲜，发现其能有效延缓植物肉的氧化变质和感官特性恶化。然而，肉桂精油中的肉桂醛、反式肉桂酸、苯甲醛、水杨酸甲酯和肉桂酸乙酯等易挥发性成分暴露于光、热或氧气中容易氧化变质[13−14]，影响其应用。因此常采用载体对其封装，以期达到提高精油稳定性和长效释放。SBA15 是一种孔容大、生物相容性好、热稳定性高的介孔二氧化硅材料[15−16]，已有国标规定二氧化硅可用作食品添加剂[17]。近年常有二氧化硅被用于精油的负载和缓释，以更好地应用于食品的贮藏和保鲜[18−20]。将介孔 SBA15 与肉桂精油制成复合物用作食品除味保鲜剂却未有报道。

本研究以肉桂精油负载率和得率为指标，通过单因素实验优化肉桂精油-SBA15 复合物的制备工艺，并对其进行表征和性质，评价其对青条鱼的保鲜效果，旨在为青条鱼保鲜提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

肉桂精油　广州国威生物科技有限公司；青条鱼　南京市仙林农贸市场，运输全程鱼体无冻结，鱼体表面无破损；TEOS(分析纯)　天津大茂化学试剂厂；乙醇、氢氧化钠、三氯乙酸、重质氧化镁、盐酸、硼酸、溴甲酚绿、甲基红、硫代巴比妥酸　分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；P123(分析纯)、正己烷(色谱纯)、无水乙醇(色谱纯)　上海默克有限公司。

SHZ-D(III)型台式循环水真空泵　郑州市仪特仪器有限公司；SX-4-10 型马弗炉　天津泰斯特仪器有限公司；1500F 超声波分散仪　宁波新芝生物科技有限公司；RCD-1A 型高速均质乳化机　常州越新仪器制造有限公司；HJ-5A 型数显多功能加热搅拌器　常州国宇仪器制造有限公司；pHS-25 型数显 pH 计　上海精密科学仪器有限公司；K1100 全自动凯氏定氮仪　海能未来技术集团股份有限公司；TA.XTplus 食品物性测定仪　英国 Stable Micro System 公司；CM-5 色度计　日本柯尼卡美能达控股公司；H2050R5 台式离心机　湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；U-3900 型紫外分光光度计　日本 Hitachi 集团。

1.2　实验方法

1.2.1　CEO-SBA15 制备　取一定质量的 SBA15 粉末(参照前人实验方法[21−22])于适量肉桂精油中，室温超声处理(超声功率为 1500 W)一定时间使粉末分散均匀，分散后以 250 r/min 磁力搅拌一定时间，搅拌结束后抽滤除去剩余的精油，放入真空干燥箱 40 ℃ 烘干即得到 CEO-SBA15[23]。

1.2.2　单因素实验　以 SBA15 和 CEO 的质量比、超声时间、吸附时间为单因素，以 CEO-SBA15 负载率和得率为评价指标，优选 CEO-SBA15 的最佳制备工艺。

1.2.2.1　SBA15 和 CEO 的质量比的筛选　实验条件固定为超声时间 20 min、吸附时间 24 h，在此基础上，分别制备了 SBA15 和 CEO 的质量比为 1∶10、1∶20、1∶30、1∶40 的 CEO-SBA15 复合物，考察 SBA15 和 CEO 的质量比对 CEO-SBA15 负载率和得率的影响。

1.2.2.2　超声时间的筛选　实验条件固定为 SBA15 和 CEO 的质量比 1∶20、吸附时间 24 h，在此基础上，分别制备了超声时间为 0、10、20、30 min 的 CEO-SBA15 复合物，考察超声时间对 CEO-SBA15 负载率和得率的影响。

1.2.2.3　吸附时间的筛选　实验条件固定为 SBA15 和 CEO 的质量比 1∶20、超声时间 20 min，在此基础上，分别制备了吸附时间为 6、12、24、36 h 的 CEO-SBA15 复合物，考察吸附时间对 CEO-SBA15 负载率和得率的影响。

1.2.2.4　负载率和得率测定　记 SBA15 使用量为 m_1，坩埚重为 m_2，干燥后的 CEO-SBA15 和坩埚总

重 m_3, 将坩埚在电炉加热至无烟冒出后放入马弗炉 550 ℃ 煅烧 2 h, 冷却后的 CEO-SB1A15 和坩埚总重为 m_4。负载率和得率计算方法如下:

$$负载率(\%)=\frac{m_3-m_4}{m_3-m_2}\times 100 \quad 式（1）$$

$$得率(\%)=\frac{m_4-m_2}{m_1}\times 100 \quad 式（2）$$

1.2.3 CEO-SBA15 的表征及缓释特性研究

1.2.3.1 扫描电镜 采用扫描电子显微镜观察样品的表观形貌, 将微量样品置于导电胶上, 吹去多余样品, 经喷金处理和抽真空后不断调整位置和放大倍数观察。

1.2.3.2 傅里叶红外光谱 取少量样品置于红外测试仪全反射晶体反射面上, 使用 ATR 模式对样品进行红外光谱分析, 分析范围 4000~400 cm^{-1}, 扫描次数 32 次。

1.2.3.3 X 射线光电子能谱 采用 X 射线光电子能谱分析仪对 SBA15 及 CEO-SBA15 的 C、O、Si 元素进行分析。

1.2.3.4 4 ℃ 下的缓释行为 肉桂精油标准曲线测定: 精确称取 10 mg 肉桂精油(CEO), 用无水乙醇溶解并定容到 100 mL, 摇匀后得到精油的乙醇溶液, 系列稀释成 0.5~5 μg/mL 溶液, 在最大吸收波长 285 nm 处, 以浓度为横坐标、吸光度为纵坐标建立标准曲线 Y=0.1965X−0.1137(R^2=0.9996)。

将 CEO 及 CEO-SBA15 置于 4 ℃ 恒温箱中, 在第 1、3、5、7、10、15、20、25、30 d 取少量样品溶于无水乙醇, 超声 20 min 后在 10000 r/min 下离心 15 min, 取上清液测定其吸光值并计算肉桂精油剩余含量, 平行三次实验。以时间(d)为横坐标、肉桂精油累积释放率(%)为纵坐标, 绘制时间-肉桂精油释放率关系曲线[24]。计算关系如下:

$$累积释放率(\%)=\frac{w_0-w_r}{w_0}\times 100 \quad 式（3）$$

式中: w_0 为初始 CEO-SBA15/CEO 中肉桂精油的量(g/mL); w_r 为放置 t d 后 CEO-SBA15/CEO 中肉桂精油的量(g/mL)。

1.2.4 CEO-SBA15 对青条鱼的保鲜作用

1.2.4.1 除味处理 将刚从市场买来的鱼在低温有冰环境下去头、去皮、去骨、去内脏, 取背部肌肉的鱼肉部分作为样品, 无菌生理盐水处理后用厨房纸吸干表面水分, 将鱼肉样品处理为大小较均一的鱼块后, 分四组放置在带盖保鲜盒中(每盒放入约 150 g 鱼肉)并放入保鲜剂(SBA15 为 0.8 g; CEO 为 1.2 g; CEO-SBA15 为 2 g), 分别为空白对照组、SBA15 组、CEO 组、CEO-SBA15 组, 保鲜剂不与鱼肉接触, 将样品放置在 4 ℃ 环境下, 每日定时测定挥发性盐基氮、三甲胺、硫代巴比妥酸、pH, 每隔 1 d 测定质构、颜色和感官评价。

1.2.4.2 挥发性盐基氮(TVB-N)含量的测定 参考 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》[25] 并稍作改动, 将 10 g 鱼肉放入 75 g 水中, 9000 r/min 匀浆 1 min, 4 ℃ 下 10000 r/min 离心 15 min 取上清液, 加入 1 g 重质氧化镁立即用全自动凯氏定氮仪测定。

1.2.4.3 三甲胺(TMA)的测定 称取 10 g 鱼肉, 加入 20 mL 7.5% 三氯乙酸水溶液, 9000 r/min 匀浆 1 min, 4 ℃ 下 10000 r/min 离心 15 min 取上清液, 使用 Whatman 三级滤纸过滤再取上清, 加入 20 mL 10% 甲醛溶液后使用凯氏定氮仪测定[26−27], 方法参考挥发性盐基氮的测定。三甲胺(TMA)值以 mg TMA/100 g 样品表示。

1.2.4.4 硫代巴比妥酸(TBA)的测定 称取 5 g 鱼肉于烧杯中, 加入 25 mL 7.5%(W/V)的三氯乙酸, 9000 r/min 匀浆 1 min, 滤纸过滤后取 5 mL 上清液, 加入 5 mL 0.02 mol/L 硫代巴比妥酸溶液, 摇匀后沸水浴反应 30 min, 冷却后用紫外在 532 nm 处测吸光值[28]。TBA 值用丙二醛质量分数表示, mg MDA/kg, 计算公式见式(4)。

$$TBA(mg\ MDA/kg)=\frac{A532}{m}\times 9.24 \quad 式（4）$$

式中, A532 为 532 nm 处测得的吸光值; m 为鱼肉质量(g)。

1.2.4.5 pH 测定 称取 5 g 鱼肉加 50 mL 超纯水后均质, 室温下静置 30 min 后取上清用 pH 计测定。

1.2.4.6 质构分析 将鱼肉(取自背部肌肉同一部位)搅成碎块放入 6 mm 培养皿中, 测定时将其取出测定其硬度、弹性、黏聚性、咀嚼性、回复性、胶粘性。使用 P/36R 探头[29], 测试速率: 2 mm/s, 应变程度 25%, 停留时间 5 s, 触发力 0.049 N。

1.2.4.7 颜色测定 选择反射测量模式并进行黑白校正后, 将鱼肉置于色差仪对其 L^*、a^*、b^*值进行测定。

1.2.4.8 感官评价 感官评价评分标准(表 1)依据 GB/T 18108-2019《鲜海水鱼通则》制定[30], 感官评价小组由 10 名受过专业培训的人组成, 设定分值共计 10 分, 其中合格品为 6~10 分, 低于 6 分为劣质产品, 低于 3 分为不可接受范围。

表 1 鱼气味感官评价评分标准

Table 1 Scoring criteria for sensory evaluation

分数	0~2.0分	2.0~4.0分	4.0~6.0分	6.0~8.0分	8.0~10.0分
气味表现	腥臭味不可接受	有明显的腥臭味	有明显腥味, 略有臭味	有轻微鱼腥味, 无臭味	鲜海鱼自身气味

1.3　数据处理

实验均设置三次平行，数据用平均值±标准差来表示。所有数据用 Origin 2018 进行作图，用 SPSS Statistics 26 进行显著性分析，P<0.05 表示显著性差异。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果

2.1.1　SBA15 和肉桂精油的质量比对 CEO-SBA15 复合物负载率和得率的影响　如图 1 所示，随着 SBA15 与肉桂精油投料质量比的增大，CEO-SBA15 复合物的负载率和得率均先增加后趋于平缓，在质量比为 1∶20 后无显著性增加，其原因可能是肉桂精油的增加使得 SBA15 在能够充分吸附肉桂精油的同时避免(减少)了粉末的团聚，质量比增加至 1∶20 后，SBA15 在肉桂精油中分散良好，负载率已接近饱和，为节约精油成本，因此选择工艺条件为 SBA15 与肉桂精油的质量比为 1∶20。

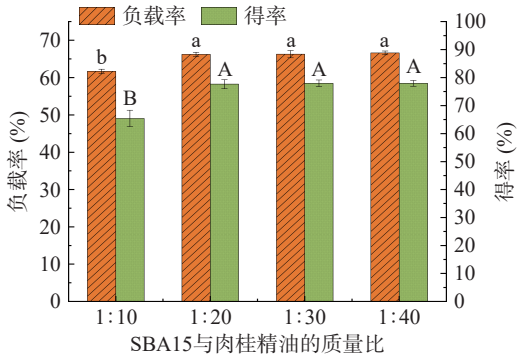


图 1　不同 SBA15 与肉桂精油质量比对 CEO-SBA15 复合物负载率和得率的影响

Fig.1　Effects of different mass ratio of SBA15 to cinnamon essential oil on the load rate and yield of CEO-SBA15 composites

注：小写字母表示不同 SBA15 与肉桂精油质量比下复合物的负载率有显著性差异(P<0.05)，大写字母表示不同 SBA15 与肉桂精油质量比下复合物的得率有显著性差异(P<0.05)。

2.1.2　超声时间对 CEO-SBA15 复合物负载率和得率的影响　如图 2 所示，随着超声时间的增加，CEO-SBA15 复合物的负载率呈现先增加后降低的趋势，得率呈现先增加后趋于平缓趋势，在超声时间 20 min 时达到最高负载率，且此后得率无显著性增加。超声时间的延长能够使 SBA15 在肉桂精油中更均匀的分散，且一部分肉桂精油在此时进入 SBA15 孔道，有利于实现肉桂精油的负载。但超声时间过长引起的热效应会引起精油温度升高[31]，可能会导致部分有效成分的分解或变质，因此选择工艺条件为超声时间 20 min。

2.1.3　吸附时间对 CEO-SBA15 复合物负载率和得率的影响　如图 3 所示，随着吸附时间的增加，CEO-SBA15 复合物的负载率和得率均有增加，吸附时间至 24 h 时二者无显著性增加，此时负载率为 66.22%±0.58%，得率为 77.65%±1.62%，肉桂精油已基本占满 SBA15 的内部孔道，为节约时间成本，因此选择工艺条件为吸附 24 h。

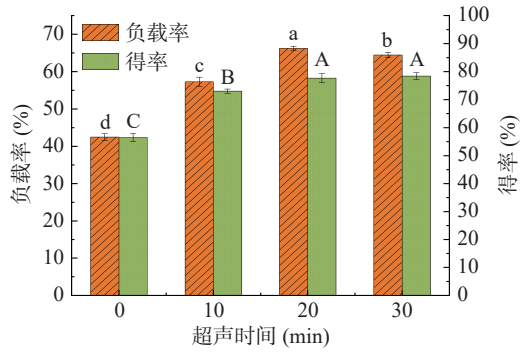


图 2　不同超声时间对 CEO-SBA15 复合物负载率和得率的影响

Fig.2　Effects of different ultrasonic time on the load rate and yield of CEO-SBA15 composites

注：小写字母表示不同超声时间下复合物的负载率有显著性差异，大写字母表示不同超声时间下复合物的得率有显著性差异(P<0.05)。

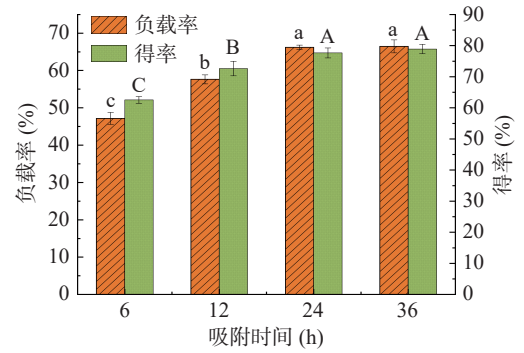


图 3　不同吸附时间对 CEO-SBA15 复合物负载率和得率的影响

Fig.3　Effects of different adsorption time on the load rate and yield of CEO-SBA15 composites

注：小写字母表示不同搅拌时间下复合物的负载率有显著性差异(P<0.05)，大写字母表示表示不同搅拌时间下复合物的得率有显著性差异(P<0.05)。

2.2　CEO-SBA15 的表征及缓释特性分析

2.2.1　扫描电镜　图 4 为 SBA15 装载肉桂精油前后的 SEM 图，由图 4 可知制备的 SBA15 为多个纤维状结构集结堆积而成，分布较为均匀，形貌较好；肉桂精油的装载未改变其形貌，但表面附着了很多小颗粒，可能为 CEO-SBA15 表面的肉桂精油。

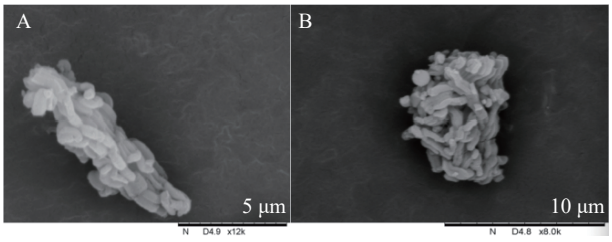


图 4　SBA15 及 CEO-SBA15 的扫描电镜图

Fig.4　SEM of SBA15 and CEO-SBA15

2.2.2　傅里叶红外光谱　CEO、SBA15、CEO-SBA15 的红外光谱图如图 5 所示。SBA15 在 1068 cm^{-1} 处的吸收峰代表 Si-O-Si 键非对称伸缩振动，在 796 cm^{-1} 处的吸收峰代表 Si-O-Si 键对称伸缩振动，在 446 cm^{-1} 处的吸收峰代表 Si-O-Si 键弯曲振动[32]。CEO 在 2990 cm^{-1} 处的吸收峰代表-C-H-键的拉伸振动，在 1667 cm^{-1} 和 1624 cm^{-1} 处的吸收峰代表醛羰基双键-C=O 的伸缩振动，在 1447 cm^{-1} 处的吸收峰代表-C=C-苯环骨架振动，在 1124 cm^{-1} 处的吸收峰代表 C-H-O 的拉伸振动，在 678、745 和 1289 cm^{-1} 处的吸收峰均对应肉桂醛的苯基[33]。CEO-SBA15 同时具有 SBA15 和 CEO 的特征峰，说明 SBA15 已将肉桂精油负载；CEO-SBA15 中肉桂精油的峰明显减弱可能是由于肉桂精油被装载后分子振动受限，部分吸收信号被阻碍无法被检测；CEO-SBA15 吸收峰的位置未发生偏移，说明肉桂精油与 SBA15 的结合是物理吸附，且装载肉桂精油后 SBA15 的硅氧硅骨架未发生破坏。

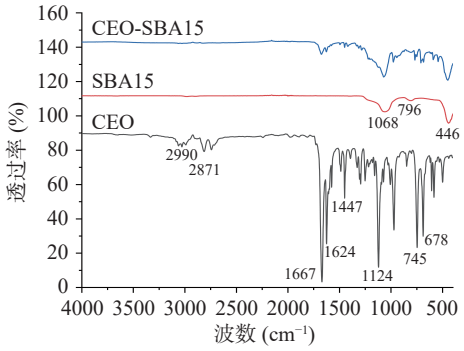


图 5　CEO、SBA15、CEO-SBA15 傅里叶红外光谱

Fig.5　FTIR of CEO, SBA15 and CEO-SBA15

2.2.3　X 射线光电子能谱　利用 XPS 对 MCM41、GEO-MCM41 表面的元素组成进行探究，以 C1s 峰（284.8 eV）作为标准对其它峰进行校正。由图 6 和表 2 关于 SBA15 和 CEO-SBA15 关于 C、O、Si 三个元素相关数据分析可知，在装载了肉桂精油后，CEO-SBA15 相较于 SBA15 元素含量占比发生了较大的变化，其中 O 元素减少了 19.73%，Si 元素减少了 5.62%，C 元素增加了 25.36%。肉桂精油的主要成分是肉桂醛，另外还包含很多有机物质，C 含量占比较大，肉桂精油的装载导致其 Si 和 O 的峰强度明显减弱，同时 C 峰强度增强，表明肉桂精油被载入 SBA15。

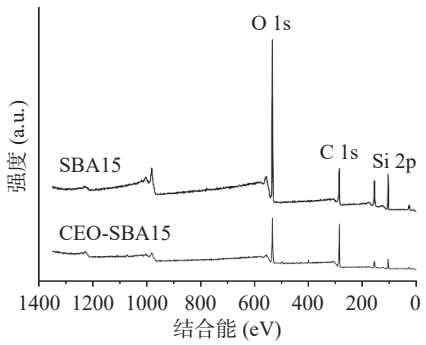


图 6　SBA15、CEO-SBA15 的 XPS 谱图

Fig.6　XPS of SBA15 and CEO-SBA15

表 2　SBA15、CEO-SBA15 的 Si、C、O 元素含量分析

Table 2　Si, C and O element content analysis of SBA15 and CEO-SBA15

除味剂	Si含量(%)	C含量(%)	O含量(%)
SBA15	22.86	27.36	49.78
CEO-SBA15	17.24	52.71	30.05

2.2.4　4 ℃ 下的缓释分析　由图 7 可以看出，在 10 d 内肉桂精油及其复合物有较快的挥发，可能是由于在初始阶段肉桂精油浓度较高、复合物表面肉桂精油挥发导致，10 d 后上升较为平稳缓慢，在 30 d 时肉桂精油及其复合物的累计释放率分别为 40.13%±1.46%、18.78%±1.78%，表明在 4 ℃ 下 CEO-SBA15 的释放量小于肉桂精油的释放量，用 SBA15 负载肉桂精油能够实现肉桂精油的长效释放。

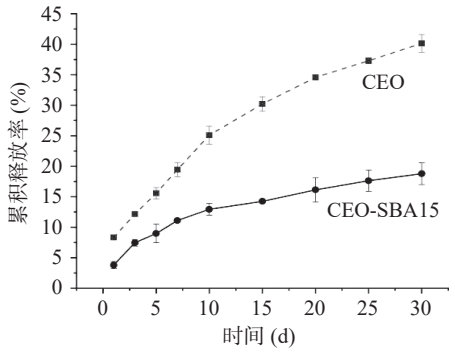


图 7　CEO 及 CEO-SBA15 在 4 ℃ 下的累积释放曲线

Fig.7　CEO and CEO-SBA15 cumulative release curves at 4 ℃

2.3　CEO-SBA15 对青条鱼的保鲜效果

2.3.1　CEO-SBA15 对青条鱼挥发性盐基氮含量的影响　TVB-N 值为肉类中的蛋白质或氨基酸在贮藏期内受细菌或内源酶作用产生氨或胺类等碱性挥发性含氮物质，是检测海产品新鲜程度的重要指标[34]。由图 8 可看出，随着贮藏时间的延长，四组样品的

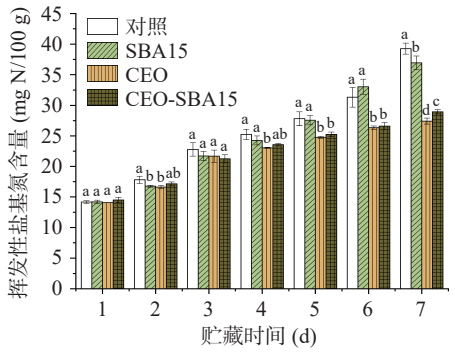


图 8　青条鱼在贮藏期间的挥发性盐基氮含量变化

Fig.8　Change of TVB-N content of mackerel during storage

注：不同小写字母表示同一贮藏时间不同组间的显著性差异（P<0.05），图 9~图 10、图 12 同。

TVB-N 含量逐渐增加。根据国标 GB 2733-2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》中对海鱼的卫生新鲜要求，优质品、合格品海鱼的 TVB-N 值分别不高于 15 mg N/100 g 和 30 mg N/100 g[35]，四组样品仅在第 1 d 未超过 15 mg N/100 g，第 5 d 起 CEO-SBA15 组 TVB-N 值显著（P<0.05）低于对照组和 SBA15 组，第 6 d 起对照组和 SBA15 组均已超过 30 mg N/100 g，CEO 组和 CEO-SBA15 组在第 7 d 时 TVB-N 值分别为 27.429±0.495 和 28.954±0.344 mg N/100 g，一周内均为合格品，这可能是由于肉桂精油的抑菌作用和对部分氨或胺类的清除作用。因此，CEO 和 CEO-SBA15 能够有效较低青条鱼中的 TVB-N值，对青条鱼具有显著的保鲜作用。

2.3.2　CEO-SBA15 对青条鱼三甲胺含量的影响　贮藏期内青条鱼三甲胺含量变化如图 9 所示。由图 9 可知随着贮藏时间的延长，四组样品的三甲胺含量逐渐增加，前 3 d 内三组实验组对三甲胺的清除效果无显著差异，第 4 d 起 CEO-SBA15 组三甲胺含量显著（P<0.05）低于其他组，CEO 组次之，在贮藏的第 7 d，对照组青条鱼三甲胺含量为 23.191±0.157 mg/100 g，而 CEO-SBA15 组青条鱼的三甲胺含量为 14.748±0.223 mg/100 g，表明 CEO-SBA15 能够降低青条鱼中三甲胺的含量，具有减少青条鱼贮藏期内三甲胺异味的作用。

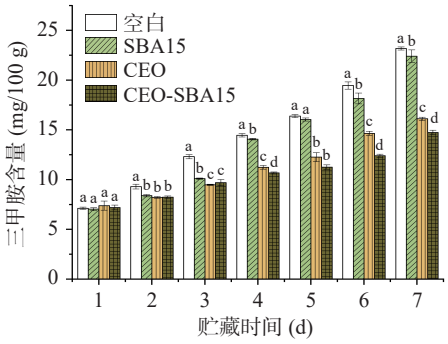


图 9　青条鱼在贮藏期间的三甲胺含量变化

Fig.9　Changes of TMA content of mackerel during storage

2.3.3　CEO-SBA15 对青条鱼硫代巴比妥酸含量的影响　在储藏过程中，鱼肉中的脂质易发生氧化生成不稳定的刺激产物并进一步分解出次级产物，硫代巴比妥酸值（TBARS）可作为鱼肉脂肪氧化程度的指标来反映其储藏过程中的脂质氧化程度[36]。贮藏期内青条鱼 TBARS 含量变化如图 10 所示，在贮藏期间各组的 TBARS 值均呈稳定的上升趋势，第 2 d 起 CEO-SBA15 组 TBARS 值已显著（P<0.05）低于对照组和 SBA15 组。一般当水产品的 TBARS 值超过 1 mg/kg 时即失去了其食用价值[37]，对照组和 SBA15 组在贮藏第 4 d TBARS 值已超过 1 mg/kg，而 CEO-SBA15 组在贮藏第 7 d TBARS 值为 0.95 mg/kg，属于可食用范围内，表明在贮藏过程中 CEO-SBA15 持续释放肉桂精油对鱼肉具有较好的抗氧化作用。

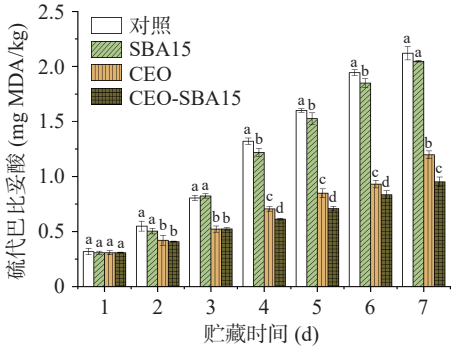


图 10　青条鱼在贮藏期间的硫代巴比妥酸含量变化

Fig.10　Changes of TBARS content of mackerel during storage

2.3.4　CEO-SBA15 对青条鱼 pH 的影响　pH 的变化一定程度上也可以验证海产品的新鲜程度，青条鱼贮藏期间 pH 变化如表 3 所示，四个组均呈现先降低后升高的趋势，可能因为青条鱼死初期鱼体内糖原在酶的作用下通过糖酵解生成乳酸，乳酸在体内积累导致 pH 下降；随着贮藏时间延长，青条鱼内蛋白质受内源酶和微生物作用产生氨或胺类等碱性物质导致 pH 上升[38]。由表 3 可得第 4 d 起对照组和 SBA15 组的 pH 显著（P<0.05）高于 CEO 组和 CEO-SBA15 组，表明 CEO 和 CEO-SBA15 能够抑制青条鱼中蛋白质的分解，减缓青条鱼的腐败。

2.3.5　CEO-SBA15 对青条鱼质构的影响　在青条鱼的贮藏过程中，在自身内源酶和腐败微生物的共同作用下青条鱼开始逐渐腐败，致使其质构指标发生变化[39]，贮藏期内青条鱼质构变化如图 11 所示，随着贮藏时间的延长，不同处理组中青条鱼的硬度、弹性、咀嚼性、胶着性、黏连性和回复性均呈现降低趋势，且四个处理组之间均无显著性差异（P>0.05），结果表明 CEO-SBA15 在贮藏过程中不会对青条鱼的质构产生不良影响。

表 3　青条鱼在贮藏期间的 pH 变化

Table 3　Changes of pH of mackerel during storage

处理组	贮藏时间(d)						
	1	2	3	4	5	6	7
对照	5.64±0.01^{a}	5.61±0.01^{a}	5.79±0.02^{a}	5.93±0.01^{a}	6.11±0.05^{a}	6.46±0.05^{a}	7.08±0.01^{a}
SBA15	5.63±0.01^{a}	5.55±0.05^{a}	5.68±0.01^{a}	5.89±0.01^{a}	6.05±0.05^{a}	6.44±0.02^{a}	7.07±0.02^{a}
CEO	5.57±0.01^{a}	5.53±0.01^{a}	5.58±0.01^{b}	5.70±0.01^{b}	5.85±0.01^{b}	6.18±0.02^{b}	6.67±0.01^{b}
CEO-SBA15	5.72±0.01^{a}	5.64±0.03^{a}	5.66±0.01^{a}	5.72±0.01^{b}	5.89±0.04^{b}	6.12±0.01^{b}	6.65±0.01^{b}

注：不同小写字母表示同一贮藏时间不同组间的显著性差异（P<0.05），表4同。

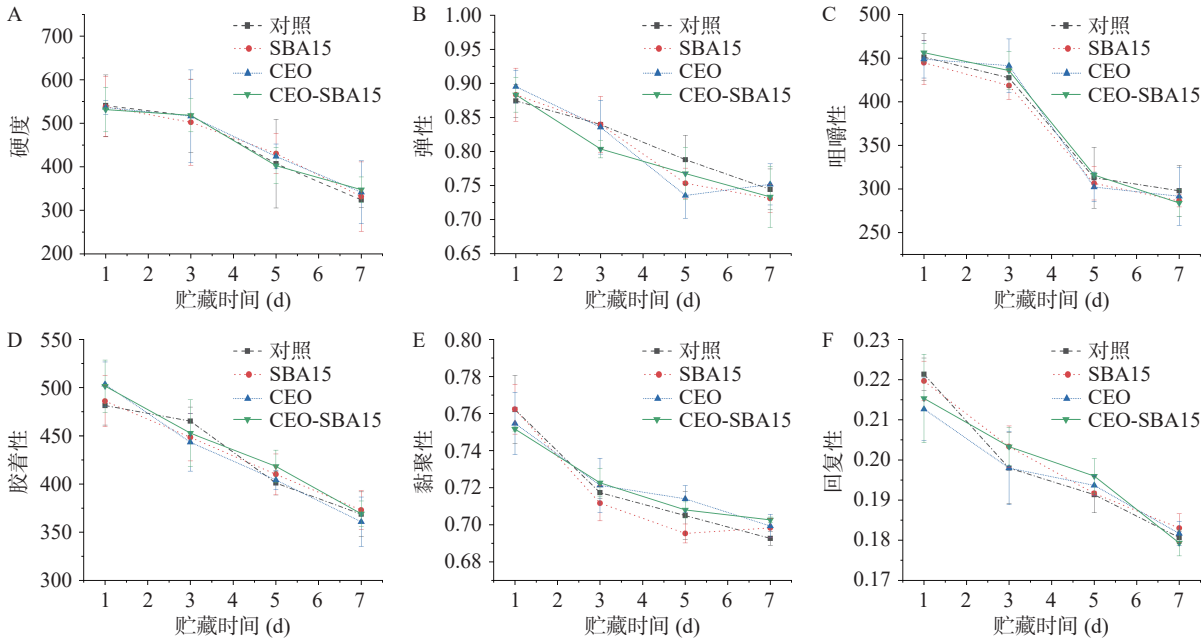


图 11 青条鱼贮藏期间质构变化

Fig.11 Textural changes of mackerel during storage

注: A. 硬度; B. 弹性; C. 咀嚼性; D. 胶着性; E. 黏聚性; F. 回复性。

2.3.6 CEO-SBA15 对青条鱼颜色的影响 鱼肉的颜色也是表现鱼肉品质优劣的重要指标, 其变化与肌红蛋白和脂质氧化等因素相关[40], 青条鱼贮藏期间颜色变化(L^*值即亮度、a^*值即红度/绿度、b^*值即黄度/蓝度)如表 4 所示。随着贮藏时间的延长, 各个处理组的鱼肉的 L^*和 a^*值逐渐降低, b^*值逐渐升高, 整体表现为鱼肉亮度越来越低, 鱼肉偏向黄色趋势, 与贮藏第 1 d 颜色差距越来越显著。第 3 d 起 CEO-SBA15 组的 b^*值显著(P<0.05)低于对照组和 SBA15 组, 第 5 d 起 CEO-SBA15 组的 L^*值和 a^*值显著(P<0.05)高于另外两组, 表明 CEO-SBA15 能够延缓亮度、红度降低和黄度升高, 可能与 CEO-SBA15 能够降低肌红蛋白和脂质的氧化相关。因此, CEO-SBA15 应用于青条鱼的贮藏过程中可以延缓鱼肉的颜色变化, 提高其肉色稳定性。

表 4 青条鱼贮藏期间颜色变化

Table 4 Color changes of mackerel during storage

指标	名称	贮藏时间(d)			
		1	3	5	7
L^*	对照	45.23±0.39^a	44.14±0.51^a	41.88±1.05^a	38.56±0.43^a
	SBA15	45.52±0.35^a	44.05±0.53^a	41.62±0.24^a	38.93±0.87^a
	CEO	45.7±0.54^a	44.17±0.92^a	42.78±0.77^b	40.11±0.11^b
	CEO-SAB15	45.88±0.69^a	44.34±0.62^a	43.24±0.51^b	40.63±0.99^b
a^*	对照	5.13±0.67^a	4.20±0.46^a	3.44±0.34^a	1.85±0.13^a
	SBA15	5.13±0.09^a	4.46±0.32^a	3.36±0.44^a	1.69±0.26^a
	CEO	5.51±0.86^a	4.52±0.53^a	4.25±0.36^b	2.45±0.43^b
	CEO-SAB15	5.27±0.45^a	4.67±0.37^a	4.51±0.48^b	2.69±0.18^b
b^*	对照	12,89±0.71^a	14.83±0.79^a	15.81±0.81^a	17.27±0.46^a
	SBA15	12.58±0.63^a	14.92±0.61^a	15.69±0.58^a	16.95±0.85^a
	CEO	12.96±0.14^a	13.46±0.88^b	14.39±0.44^b	15.08±0.42^b
	CEO-SAB15	12.81±0.27^a	13.50±0.48^b	14.51±0.5^b	14.57±0.56^b

2.3.7 CEO-SBA15 对青条鱼感官评分的影响 新鲜青条鱼鱼肉无臭味, 随着贮藏时间的延长, 各个对照组的感官评分均明显呈下降趋势。第 1 d 各对照组无显著性差异, 从第 3 d 起, 空白组和 SBA15 组感官评分显著(P<0.05)低于 CEO-SBA15 组; 在第 7 d, 空白组和 SBA15 组的感官评分已低于 2, 达到不可接受值, 而 CEO-SBA15 组感官评分降低缓慢, 感官评分仍高于 3, 表明 CEO 及 CEO-SBA15 在青条鱼贮藏期内能有效提高其感官评分, 可能与 CEO 及其复合物能够有效抑制微生物作用或鱼体蛋白质腐败而降低三甲胺等不良物质的产生有关。贮藏期内 CEO-SBA15 组的感官评分略高于 CEO 组, 与 CEO 气味过于浓郁、严重刺激测试者感官有关。因此, CEO-SBA15 应用于青条鱼的贮藏过程中可以显著改善青条鱼的感官评分, 优于 SBA15 或 CEO 单独使用。

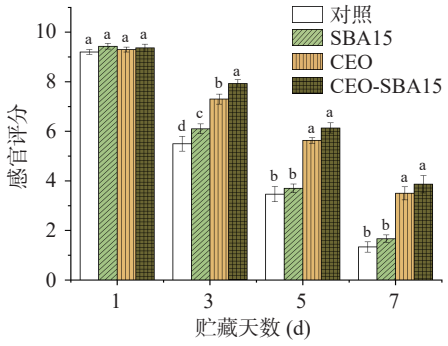


图 12 青条鱼贮藏期间的感官评分

Fig.12 Sensory evaluation of mackerel during storage

3 结论

本研究探究了介孔材料 SBA15 与肉桂精油质

量比、超声时间、吸附时间对复合物 CEO-SBA15 负载率和得率的影响，并以此确定了制备 CEO-SBA15 复合物的最佳工艺条件为：SBA15 与肉桂精油质量比 1∶20、超声时间 20 min、吸附时间 24 h，最佳条件下制备的 CEO-SBA15 复合物的精油负载率为 66.22%±0.58%，得率为 77.65%±1.62%，表征结果表明 SBA15 及其肉桂精油复合物均呈纤维状，肉桂精油通过物理吸附载入 SBA15 内部，并实现了肉桂精油的长效释放。CEO-SBA15 复合物可以在不影响青条鱼质构的同时，延缓了其在贮藏期内挥发性盐基氮、三甲胺、硫代巴比妥酸和 pH 的上升速度，有助于提高其肉色稳定性和感官评分，对青条鱼具有良好的保鲜作用，为 CEO-SBA15 复合物作为食品除味保鲜剂的应用提供新思路。

© 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］ 颜阿娜, 洪燕婷, 蔡琪琪, 等. 鲭鱼抗氧化肽的性质鉴定及稳定性研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2023, 42(3): 16−22. ［YAN Ana, HONG Yanting, CAI Qiqi, et al. Characterization and stability analysis of antioxidant peptides from mackerel[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2023, 42(3): 16−22.］

［2］ LAN Weiqing, ZHAO Jiaxin, LIU Lin, et al. Relevance of cathepsins activity and texture in slightly acidic electrolyzed water-slurry iced mackerel (*Pneumatophorus japonicus*)[J]. Food Bioscience, 2022, 49: 101924.

［3］ ZHOU Yueqi, WU Shumeng, PENG Yulu, et al. Effect of lactic acid bacteria on mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) seasoning quality and flavor during fermentation[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 100971.

［4］ 黄艳茹, 丁洁, 刘亮军, 等. 以牛至精油为芯材的普鲁兰多糖/热塑性聚氨酯同轴静电纺丝膜的制备及对海鲈鱼鱼片的保鲜性能[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 120−130. ［HUANG Yanru, DING Jie, LIU Liangjun, et al. Preparation of pullulan polysaccharide/thermoplastic polyurethane coaxial electrospinning film with oregano essential oil as core material and its preservative effect on the quality of *Lateolabrax japonicus* fillets[J]. Food Science, 2023, 44(13): 120−130.］

［5］ 王者, 关荣发, 刘振峰, 等. 溶菌酶脂质体对冷藏金鲳鱼保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 227−232. ［WANG Zhe, GUAN Rongfa, LIU Zhenfeng, et al. Effect of lysozyme liposomes on *Trachinotus ovatus* preservation[J]. Food Science, 2018, 39(11): 227−232.］

［6］ SINGH A, AHUJA A, MADAN M, et al. Active packaging film of poly (lactic acid) incorporated with plant-based essential oils of *Trachyspermum ammi* as an antimicrobial agent and *Vanilla* as an aroma corrector for waffles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 135086.

［7］ 吴天琳. 60 种植物精油的抗菌活性筛选及牛至精油的抗菌作用机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022. ［WU Tianlin. Antimicrobial activity evaluation of 60 essential oils and mode of action of oreganoessential oil[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.］

［8］ LUO Qingying, RONG Xingyu, XIAO Zhenkun, et al. Effect of chitosan films containing clove essential oil-loaded microemulsions combined with deep learning on pork preservation and freshness monitoring[J]. Food Control, 2025, 168: 110914.

［9］ YANG Liying, LIU Xueyi, XIAO Douxin, et al. Sustained release composite antimicrobial film containing oregano essential oil microcapsule for postharvest strawberry preservation[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 46: 101387.

［10］ LIU Shuting, LAN Weiqing, XIE Jing. Natural preservative *Litsea cubeba* essential oil: With emphasis on its biological activities, encapsulation methods and application in food preservation[J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105557.

［11］ JITPASUTHAM S, SINSOMSAK W, CHUESIANG P, et al. Green active coating from chitosan incorporated with spontaneous cinnamon oil nanoemulsion: Effects on dried shrimp quality and shelf life[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262: 129711.

［12］ ZHU Yiqun, GU Mengqing, SU Yuhan, et al. Effect of *Litsea cubeba* and cinnamon essential oil nanoemulsion coatings on the preservation of plant-based meat analogs[J]. Foods, 2024, 13(21): 3365.

［13］ 王芳. 几种植物精油成分分析、抑菌及其应用工艺优化[D]. 天津: 天津科技大学, 2019. ［WANG Fang. Research on composition the bacteriostatic and it's application of several kinds plant essential oils[D]. Tianjin: Tianjin University of Science&technology, 2019.］

［14］ DO X T, NGUYEN T H T, PHAM N T. Experimental study and process modeling of vacuum batch rectification column for cinnamon essential oil fractionation[J]. Food and Bioproducts Processing, 2024, 148: 400−409.

［15］ LOPEZ FERNANDEZ M, LEN T, URBANO J, et al. Transformation of furfural into dimorpholinocyclopentenone using Al-SBA-15 materials[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2024, 39: 101573.

［16］ CHAABANE L, NIKOLANTONAKI M, WEBER G, et al. Functionalization of SBA-15 mesoporous silica for highly efficient adsorption of glutathione: Characterization and modeling studies[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2023, 152: 105169.

［17］ 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 25576-2020 食品安全国家标准 食品添加剂 二氧化硅[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020: 2−3. ［National Health Commission, State Administration for Market Regulation National. GB 25576-2020 Food safety standard for food additive silicon dioxide[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020: 2−3.］

［18］ JIAO Long, LI Yuwei, HU Jiajie, et al. Curcumin-loaded food-grade nano-silica hybrid material exhibiting improved photodynamic effect and its application for the preservation of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*)[J]. Food Research International, 2024, 188: 114492.

［19］ SURENDHIRAN D, ROY V C, PARK J S, et al. Fabrication of chitosan-based food packaging film impregnated with turmeric essential oil (TEO)-loaded magnetic-silica nanocomposites for surimi preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 203: 650−660.

［20］ 逯文倩, 王娟. 牛至精油-介孔纳米二氧化硅/海藻酸钠复合膜对双孢蘑菇保鲜效果研究[J]. 中国果菜, 2021, 41(4): 1−9. ［LU Wenqian, WANG Juan. Preservation effect of OEO-MSNPs/Sodium alginate film on *Agaricus bisporus*[J]. China Fruit and Vegetable, 2021, 41(4): 1−9.］

[21] ATIYAH N A, ALBAYATI T M, ATIYA M A. Interaction behavior of curcumin encapsulated onto functionalized SBA-15 as an efficient carrier and release in drug delivery[J]. Journal of Molecular Structure, 2022, 1260: 132879.
[22] 崔雨蕊. 纳米介孔 SBA-15 作为阿莫西林缓释载体的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022. [CUI Yurui. Study on nano-mesoporous SBA-15 as amoxicillin sustained release carrie[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022.]
[23] HAO Qiulian, PENG Huan, ZHAO Ruichen, et al. Reactive nano-essential oils for sustained release of essential oils and application to wallpaper[J]. Chinese Chemical Letters, 2022, 33(1): 320−323.
[24] ZHANG Rongfei, CHENG Meng, WANG Xiangyou, et al. Bioactive mesoporous nano-silica/potato starch films against molds commonly found in post-harvest white mushrooms[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 517−525.
[25] 国家卫生和计划生育委员会. GB/T 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: 3-5. [National Health and Family Planning Commission. GB/T 5009.228-2016 National standard for food safety-Determination of volatile basic nitrogen in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 3-5.]
[26] MOKRANI D, OUMOUNA M, CUESTA A. Fish farming conditions affect to European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) quality and shelf life during storage in ice[J]. Aquaculture, 2018, 490: 120−124.
[27] LI Peiyun, CHEN Zhijie, TAN Mingtang, et al. Evaluation of weakly acidic electrolyzed water and modified atmosphere packaging on the shelf life and quality of farmed puffer fish (*Takifugu obscurus*) during cold storage[J]. Journal of Food Safety, 2020, 40(3): e12773.
[28] YU Dawei, ZHAO Wenyu, DONG Junli, et al. Multifunctional bioactive coatings based on water-soluble chitosan with pomegranate peel extract for fish flesh preservation[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131619.
[29] KLINMALAI P, FONG-IN S, PHONGTHAI S, et al. Improving the quality of frozen fillets of semi-dried gourami fish (*Trichogaster pectoralis*) by using sorbitol and citric acid[J]. Foods, 2021, 10(11): 2763.
[30] 国家标准化管理委员会, 国家市场监督管理总局. GB/T 18108-2019 食品安全国家标准 鲜海水鱼通则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 1−2. [National Standardization Administration, State Administration for Market Regulation. GB/T 18108-2019 National food safety standard. General rules for fresh marine fish[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019: 1−2.]
[31] 彭莹芸. 葡萄柚精油微胶囊的制备及稳定性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019. [PENG Yingyun. Preparation and stability of grapefruit essential oil microcapsules[D]. Changsha: Hunan University, 2019.]
[32] 孙晗. 茴拉西坦介孔二氧化硅复合物的制备及释药机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2019. [SUN Han. Preparation and release mechanism of *Aniracetam mesoporous* silica complex [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2019.]
[33] ABEDI E, SAYADI M, OLIYAEI N. Fabrication and characterization of emulsion-based edible film containing cinnamon essential oil using *Chia seed* mucilage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 266: 131173.
[34] 朱卫忠. 蒙脱土—丁香精油杂化抗菌材料的制备及其在鲍鱼保鲜中的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023. [ZHU Weizhong. Preparation of montmorillonite-clove essential oil hybrid antimicrobial materia land its application in abalone preservation [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.]
[35] 国家卫生和计划生育委员会. GB/T 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: 1−2. [National Health and Family Planning Commission. GB/T 18108-2019 National food safety standard for fresh and frozen animal aquatic products[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015: 1−2.]
[36] 由舒晗. κ-卡拉胶基复合膜在海水鱼鲜度监测和保鲜中的应用[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023. [YOU Shuhan. Application of κ-Carrageenan composite films in freshness monitoring and preservation of marine fish[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2023.]
[37] PIRANAVATHARSAN U, JINADASA B K K K, JAYASINGHE C V L. Validation of thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) method for measuring secondary lipid oxidation products in fresh Indian mackerel (*Rastrelliger kanagurta*)[J]. Food and Humanity, 2023, 1: 1194−1199.
[38] 凌玉. 含有酸刻蚀埃洛石纳米管/丁香精油混合负载物的 PBAT/PPC 复合薄膜制备及其对海鲈鱼保鲜应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023. [LING Yu. Preparation of the PBAT/PPC Composite films containing mixed acid-etched halloysite nanotubes/clove essential oil and study on their preservations application forthe sea bass[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.]
[39] 崔方超, 周闪闪, 张星晖, 等. 叶醛/玉米醇溶蛋白纳米纤维膜的制备及其在金枪鱼保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 309−318. [CUI Fangchao, ZHOU Shanshan, ZHANG Xinghui, et al. Preparation of leaf aldehyde/zein nanofiber film and its applicationin tuna preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 309−318.]
[40] MONTEIRO M L G, ROSÁRIO D K A, TORRES NETO L, et al. Exploring high hydrostatic pressure for enhancing the preservation of white and dark muscle fish fillets stored at different packaging systems under refrigeration[J]. Food Control, 2024, 155: 110038.