

超临界流体技术制备肉桂醛/ 壳聚糖膜抑菌包装材料

唐川,杨铭,卢轩

(大连大学生命科学与技术学院,辽宁大连 116622)

摘要:采用超临界溶液浸渍技术(SSI)将肉桂醛(CI)负载于壳聚糖膜(CSF)中制备抑菌材料,研究了SSI过程参数对肉桂醛负载量的影响,并对CI-CSF的形貌、水蒸气透过率、不透明度和抑菌性能进行了考察。结果表明,CI-CSF的负载量随着泄压速度的升高而降低,在压力15 MPa、泄压速度1 MPa/min时负载量达到最大为2.44%。CSF经SSI过程负载肉桂醛后,水蒸气透过率由 $0.96 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ 增大至 $2.72 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$,不透明度由 1.31 mm^{-1} 升高至 4.59 mm^{-1} 。CI-CSF对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌表现出较好的抑制作用,抑菌圈分别达到17.3和16.0 mm,在食品活性包装领域具有应用潜力。

关键词:超临界溶液浸渍法,食品,抑菌包装,肉桂醛,壳聚糖

Preparation of Cinnamaldehyde/Chitosan Film as Antimicrobial Packaging Using Supercritical Fluid Technology

TANG Chuan, YANG Ming, LU Xuan

(College of Life Science and Technology, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: Chitosan film (CSF) loaded with cinnamaldehyde (CI) for antimicrobial packaging was prepared using supercritical solution impregnation (SSI). The effects of impregnation pressure and depressurization rate on loading capacity (LC) of CI-CSF were investigated, and the properties of CI-CSF were characterized such as morphology, water vapor permeability (WVP), opacity and antibacterial tests. The results showed that LC of CI-CSF decreased with the raise of the depressurization rate, and the maximum LC achieved to 2.44% at 15 MPa and 1 MPa/min. After the SSI process, the WVP of CI-CSF increased from $0.96 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ to $2.72 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ while the opacity of CI-CSF increased from 1.31 to 4.59 mm^{-1} . CI-CSF showed good antibacterial activity against *Staphylococcus aureus* and *E. coli* with inhibition zones of 17.3 and 16.0 mm, respectively. The cinnamaldehyde loaded chitosan film prepared using supercritical solution impregnation process was promising for potential application in active food packaging.

Key words: supercritical solution impregnation (SSI); food; antimicrobial packaging; cinnamaldehyde; chitosan

中图分类号: TS206

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2019)15-0166-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.15.027

引文格式:唐川,杨铭,卢轩.超临界流体技术制备肉桂醛/壳聚糖膜抑菌包装材料[J].食品工业科技,2019,40(15): 166-169,177.

随着人们对食品质量及其安全要求的提高,只起到简单隔绝作用的传统食品包装已不能满足人们的需求。具有抑菌、抗氧化等功能的包装材料逐渐受到关注,这些活性包装材料通常采用“基质材料+活性物质”的策略^[1-3]。基质材料多为生物相容性及生物可降解性聚合物,如聚乳酸(PLA)、聚羟基脂肪酸酯(PHA)、聚己内酯(PCL)等人工合成高分子材料及目前研究更为广泛的淀粉类、纤维素类、壳聚糖类等天然高分子材料;活性物质多采用具有抑菌、抗氧化作用的丁香酚、香芹酚、百里香酚、肉桂醛等天

然植物提取物^[4-6]。壳聚糖(chitosan, CS)是甲壳素经脱乙酰得到的产物,来源广泛价格低廉,具有良好的生物相容性和生物可降解性,且成膜性好、可食用,作为基质材料在食品领域研究广泛^[7-9]。肉桂醛(cinnamaldehyde, CI)是一种天然醛类化合物,广泛存在于肉桂等植物内,具有较强的抑菌作用,是良好的天然抑菌剂^[10]。将肉桂醛负载于基质材料中是制备抑菌材料的一种有效策略^[11-13]。

目前,将活性物质负载于基质材料中的方法主要有溶液浸渍法和直接混入法。这些方法在处理过

收稿日期:2018-12-21

作者简介:唐川(1986-),男,博士,讲师,研究方向:超临界流体技术,E-mail:jiemotc@gmail.com。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(21606030)。

程中会使用大量有机溶剂或需要在较高温度下操作,易导致活性物质失活、分布不均匀和产品有机溶剂残留等问题。超临界溶液浸渍法(supercritical solution impregnation, SSI)是一种将小分子物质通过超临界二氧化碳(SC-CO₂)负载到基质材料中的技术^[14]。SSI操作条件温和,对环境友好,不改变基质材料结构,且活性物质负载量可通过调节过程参数进行调节,在食品工业中具有极大应用潜力。但目前SSI在食品包装中的研究较少,国内还未见报导,并且国外的研究多集中于合成高分子包装材料中活性物质的负载,天然高分子包装材料中活性物质的负载研究较少,相关研究亟待开展^[15-16]。

本研究拟通过SSI过程将肉桂醛负载至壳聚糖膜(chitosan film, CSF)中,制备得到CI-CSF抑菌包装材料。对CI-CSF的肉桂醛负载量、形貌、水蒸气透过率、结晶性、不透明度以及抑菌性能进行考察,探索SSI过程制备食品活性包装的应用潜力,为SSI过程制备食品活性包装的应用提供基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

壳聚糖(CS,脱乙酰度85.0%,黏度154 mPa·s) 济南海得贝海洋生物工程有限公司;肉桂醛(CI,纯度>95.0%) 生工生物工程(上海)股份有限公司;CO₂(食品级,纯度>99.9%) 大连永丰气体有限公司;冰醋酸、甘油(分析纯) 国药集团化学试剂有限公司;大肠杆菌(*E.coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*) 大连大学生命科学与技术学院。

SFE-500MR-2-FMC10 SSI装置 美国Waters公司;S-4800型扫描电子显微镜 日本日立公司;Magna-550 II型红外光谱仪 美国尼高力公司;X'Pert RPD型X射线衍射仪 荷兰PANalvital公司;DNP-9162型恒温培养箱 上海精宏实验设备有限公司;DZF-6021型真空干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 壳聚糖膜的制备 壳聚糖基质膜采用溶液浇注法制备,制备方法如下:将壳聚糖原料溶解于1% V/V醋酸水溶液中,形成4% W/V的壳聚糖溶液,并向壳聚糖溶液中加入甘油作为塑化剂至1% V/V;取壳聚糖溶液50 mL倒入100 mm×100 mm的Teflon方皿中,45℃下干燥过夜,脱模后即得壳聚糖膜。得到的壳聚糖膜密封保存于干燥皿中备用。

1.2.2 SSI过程负载肉桂醛 采用SSI过程制备负载肉桂醛壳聚糖膜(CI-CSF),SSI过程设备如图1所示。SSI流程参照本课题组之前的研究^[17]:壳聚糖膜包裹于滤纸中置于高压釜搅拌桨上部,肉桂醛加入至高压釜底部,不与壳聚糖膜直接接触,肉桂醛加入量可保证高压釜内超临界二氧化碳(SC-CO₂)达到饱和;CO₂经冷却槽冷却至0℃,通过高压泵送入高压釜中,高压釜中压力和温度分别由高压泵及加热夹套控制,待压力和温度达到设定值后,浸渍2 h;实验结束后,关闭高压泵,打开泄压阀,以一定速率进

行泄压;最终取出样品置于密封袋中,保存于干燥皿中,等待进一步的表征。本研究考察浸渍温度40℃,浸渍时间2 h条件下,浸渍压力(10、15 MPa)及泄压速度(1、5 MPa/min)对肉桂醛在壳聚糖膜中的负载量的影响。

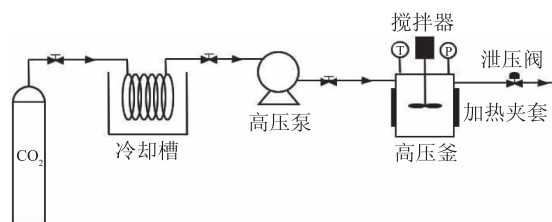


图1 SSI过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of SSI process

1.2.3 CI-CSF形貌的表征 CI-CSF的形貌采用扫描电子显微镜进行表征。将CI-CSF样品裁剪成适宜大小片状,通过碳胶带固定于样品台上,CI-CSF截面样品采用剪刀进行切割后通过碳胶带固定于样品台上,样品在真空环境下,喷金处理20 s后,加速电压5.0 kV下,进行扫描电子显微镜表征,观察其形貌。采用螺旋测微仪对CI-CSF膜厚进行测量,在CI-CSF上任意取5点进行厚度测量,结果取平均值。

1.2.4 CI-CSF负载量的测定 CI-CSF中肉桂醛负载量采用分光光度法测定^[18]。取50 mg的CI-CSF浸于10 mL乙醇中,超声功率600 W下处理30 min,使负载的肉桂醛全部溶解于乙醇中。随后样品溶液经0.45 μm微孔滤膜过滤后滤液于290 nm处测定吸光值,根据标准曲线($A = 0.06428C + 0.01814$, A为吸光值, C为肉桂醛浓度,单位mg/L, $R^2 = 0.9991$)计算得到负载的肉桂醛质量。CI-CSF负载量(loading capacity, LC)定义为负载的CI质量与CSF质量之比。

1.2.5 CI-CSF水蒸气透过率(WVP)的测定 CI-CSF水蒸气透过率按照ASTME96-90标准测定^[19]。选用直径40 mm的透湿杯,内装3 g无水氯化钙,用CI-CSF将透湿杯口覆盖并密封固定,称重后置于干燥器中。干燥器中盛有饱和氯化钠溶液保持相对湿度75%,并置于30℃培养箱中。每12 h称量一次,记录透湿杯质量的增加量,根据式1计算水蒸气透过率:

$$WVP = \frac{\Delta W \times l}{\Delta t \times A \times \Delta P} \quad \text{式(1)}$$

式中, $\Delta W/\Delta t$ 为单位时间内增加的水的质量(g/s); l 为CI-CSF厚度(m); A 为有效的扩散面积(m²); ΔP 为CI-CSF两侧的水蒸气渗透压差(Pa)。

1.2.6 CI-CSF不透明度的测定 CI-CSF不透明度按照文献中方法进行测定^[6]。将样品膜裁剪成4 cm×1 cm大小,贴在比色皿一侧,采用可见分光光度计以空白比色皿为参比于600 nm处测定其吸光度,不透明度(Opacity)由式2计算:

$$\text{不透明度} = \frac{A_{600}}{l} \quad \text{式(2)}$$

式中, A_{600} 为600 nm处样品吸光度; l 为样品厚度(mm)。

1.2.7 CI-CSF结晶性的测定 CI-CSF结晶性通过

表1 CI-CSF 负载量、厚度、水蒸气透过率、不透明度结果
Table 1 LC,thickness,WVP and opacity of CI-CSF results

压力 (MPa)	泄压速度 (MPa/min)	负载量(%)	厚度(μm)	水蒸气透过率 ($10^{-10}\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$)	不透明度 (mm^{-1})
10	1	2.33 ± 0.17	126 ± 6	2.67 ± 0.25	4.59 ± 0.09
	5	1.80 ± 0.16	124 ± 6	2.71 ± 0.33	4.23 ± 0.16
15	1	2.44 ± 0.18	130 ± 6	2.51 ± 0.34	4.48 ± 0.12
	5	1.64 ± 0.21	128 ± 9	2.72 ± 0.26	4.13 ± 0.14
CSF			117 ± 4	0.96 ± 0.08	1.31 ± 0.02

X 射线衍射仪进行表征,工作电压 40 kV,管电流 40 mA,Cu 靶,Ni 过滤片 $\text{K}\alpha$ 发射,扫描范围 $5\sim60^\circ$,扫描速度 $5^\circ/\text{min}$ 。

1.2.8 CI-CSF 抑菌性的测定 通过抑菌圈法对 CI-CSF 的抑菌性能进行考察^[17]。将大肠杆菌和金黄色葡萄球菌分别在 Luria-Bertani (LB) 培养基中 37°C 下培养 8 h 进行活化,活化后在 Tryptic Soy Agar (TSA) 平板上培养得到单菌落。挑取单菌落接种于 5 mL LB 培养基中, 37°C 下摇床培养 8 h。将菌液稀释 10 倍,取 200 μL 涂布于 TSA 平板,然后将直径为 10 mm 的 CI-CSF 置于平板上,于 37°C 下培养 24 h,测量 CI-CSF 抑菌圈大小。同时取空白 CSF 作为阴性对照。

1.3 数据处理

本文中所有实验均平行三次或三次以上。数据均以平均值 (mean) $\pm$ 标准差 (SD) 表示。数据图采用 Origin 7.5 软件完成。

2 结果与分析

2.1 CI-CSF 负载量

CI-CSF 中肉桂醛负载量结果如表 1 所示,CI-CSF 中肉桂醛的负载量在 1.64%~2.44% 范围内,浸渍压力 15 MPa,泄压速度 1 MPa/min 时负载量最大,为 2.44%。由结果可见,在同一压力下,泄压速度为 1 MPa/min 时,CI-CSF 负载量大于泄压速度为 5 MPa/min 时的 CI-CSF 负载量。这是由于在较低泄压速度下,肉桂醛从 SC-CO_2 中析出负载于壳聚糖膜中;在较高的泄压速度下,溶解有肉桂醛的 SC-CO_2 更加倾向于离开壳聚糖膜,最终导致肉桂醛的负载量降低。并且在较高浸渍压力下,这种现象更加明显,这可能是由于在较高压力时,肉桂醛在 SC-CO_2 中的溶解度也更大^[20],泄压时随 SC-CO_2 扩散出壳聚糖膜的肉桂醛也更多。从结果中还可以看出,在相同的泄压速度下,CI-CSF 的负载量随压力变化不明显,这说明 SSI 过程中泄压速度对肉桂醛在 CI-CSF 中负载量影响更大。

2.2 CI-CSF 形貌

SSI 过程前后壳聚糖膜形貌如图 2 所示。图 2 中(a)、(b)为溶液浇注法制备得到壳聚糖膜表面及截面图,(c)、(d)为 SSI 过程(15 MPa,1 MPa/min)制备得到的 CI-CSF 样品表面及截面图。由结果可见,CSF 表面平整光滑,经过 SSI 过程负载肉桂醛后,CI-CSF 表面较平整,但出现鳞状结构,这可能是由于肉桂醛负载至 CSF 中,使壳聚糖分子链之间产生间隙,

并且 SSI 过程泄压时压力的变化使壳聚糖表面产生轻微剥离现象,因此表面产生鳞状结构。但由图 2 (b)、(d)截面图可见,SSI 过程前后 CSF 截面并未出现明显变化,这可能是由于壳聚糖分子链之间的间隙较小,难以在 SEM 图片中观察到。截面 SEM 图片中出现挤压及变形现象,这是由于 CSF 及 CI-CSF 截面样品制备时,采用剪刀进行切割导致的,SSI 过程前后 CSF 和 CI-CSF 截面形貌并未发生明显变化。由图 2 (c) 可见,CI-CSF 样品表面无明显肉桂醛附着,结合 CI-CSF 负载量结果可知,SSI 过程肉桂醛的负载并不是简单地析出附着在壳聚糖膜表面,而是由 SC-CO_2 将肉桂醛溶解后,扩散进入壳聚糖膜中,泄压后均匀析出分散于壳聚糖膜中,这一结果也与之之前的研究结果相符^[21]。

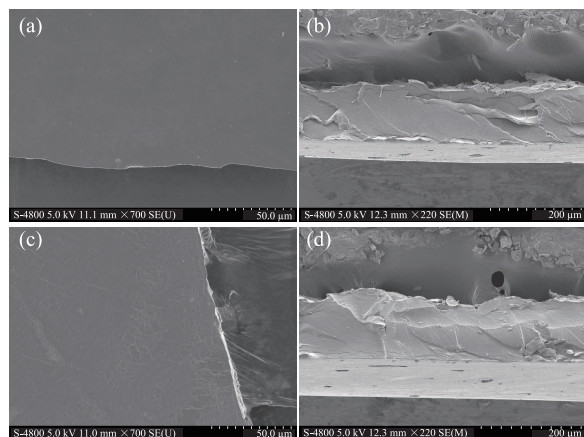


图2 CSF 及 CI-CSF 扫描电镜图

Fig.2 SEM images of CSF and CI-CSF

注:(a):CSF;(b):CSF 截面;(c):15 MPa,1 MPa/min 条件下制备的 CI-CSF;(d):15 MPa、1 MPa/min 条件下制备的 CI-CSF 截面。

2.3 CI-CSF 水蒸气透过率及不透明度

CI-CSF 水蒸气透过率结果如表 1 所示。采用 SSI 过程负载肉桂醛制备得到的 CI-CSF 与空白 CSF 相比,水蒸气透过率明显升高。虽然肉桂醛的疏水性质可能会导致 CI-CSF 的水蒸气透过率降低,但是结合 CI-CSF 的 SEM 结果可知,CI-CSF 表面 SEM 图片中可观察到轻微剥离现象,这可能是由于肉桂醛在 CI-CSF 中的负载使得壳聚糖分子间产生间隙,并且 SC-CO_2 在泄压过程中使得 CSF 中产生微小的空隙,但这种空隙较小,未在 CI-CSF 截面 SEM 图片中直接观察到,在这些因素共同作用下,使得 CI-CSF 的水蒸气透过率增大^[22],同时也使得 CI-CSF 的不透

表2 CI-CSF 对供试菌的抑菌圈直径
Table 2 Diameter of inhibition cycle of CI-CSF on two bacterias

压力(MPa)	泄压速度(MPa/min)	负载量(%)	大肠杆菌(mm)	金黄色葡萄球菌(mm)
10	1	2.33 ± 0.17	15.7 ± 0.5	17.0 ± 0.8
	5	1.80 ± 0.16	14.0 ± 0.0	14.7 ± 0.5
15	1	2.44 ± 0.18	16.0 ± 0.8	17.3 ± 0.9
	5	1.64 ± 0.21	14.0 ± 0.0	14.7 ± 0.4
CSF			10.0 ± 0.0	10.0 ± 0.0

注:抑菌圈测量数据取整数,平均值保留一位小数。

明度显著增加。

2.4 CI-CSF X 射线衍射谱图

SSI 过程浸渍前后 CSF 和 CI-CSF 的 XRD 谱图如图 3 所示。由图 3 中(a)可知,CSF 衍射角在 20 ° 附近出现衍射峰,说明壳聚糖具有晶体结构。SSI 过程负载肉桂醛后,CI-CSF 在 10 °附近出现较弱的衍射峰,且衍射峰较宽,说明晶粒尺寸较小,这一现象也与文献中的结果相似^[23]。

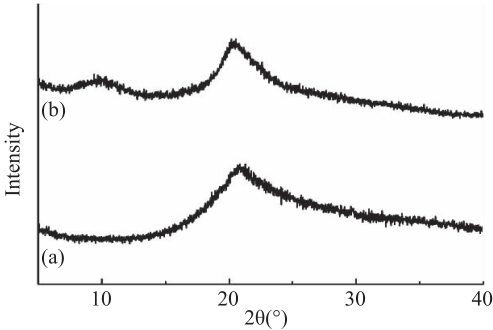


图3 CSF 及 CI-CSF 的 X 射线衍射谱图
Fig.3 XRD spectra of CSF and CI-CSF

注:(a):CSF;(b):15 MPa、1 MPa/min 条件下制备的 CI-CSF。

2.5 CI-CSF 抑菌性能

肉桂醛可破坏细菌的细胞膜,影响细胞的正常生长,进而抑制细菌的繁殖^[24]。采用 SSI 过程制备的负载肉桂醛的 CI-CSF,其抑菌性能对其应用具有重要意义。本研究采用抑菌圈法考察了 CI-CSF 对两种常见食源性细菌的生长抑制情况,结果如表 2 所示。CI-CSF 对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌均有抑制作用,且对金黄色葡萄球菌抑制作用强于大肠杆菌。并且由表 2 可见,随着 CI-CSF 中肉桂醛负载量的增加,对细菌生长的抑制作用增强,这是由于肉桂醛对细菌的生长抑制作用具有浓度依赖性,因此负载量大的 CI-CSF 具有更好的抑菌性能。空白 CSF 未展示出对供试菌的生长抑制作用,说明 CI-CSF 对供试菌的生长抑制作用源于其中负载的肉桂醛。

3 结论与讨论

本研究以 CSF 为基质,肉桂醛为抑菌物质,通过 SSI 过程将肉桂醛负载至 CSF 中制备 CI-CSF 用于抑菌包装材料。通过调节 SSI 过程参数,可对 CI-CSF 中肉桂醛负载量进行调节,泄压速度对肉桂醛在 CI-CSF 中负载量影响较大,浸渍压力 15 MPa、泄压速度 1 MPa/min 条件下,CI-CSF 中肉桂醛的负载量最高为 2.44%。SSI 过程后 CI-CSF 表面较平整,水

蒸气透过率和不透明度较空白 CSF 均有升高。CI-CSF 对大肠杆菌及金黄色葡萄球菌均有抑制作用。采用 SSI 方法将肉桂醛负载于 CSF 中制备 CI-CSF,过程条件温和且避免了有机溶剂的使用,所得 CI-CSF 具有良好的抑菌效果,在食品活性包装领域具有应用潜力。

参考文献

[1] Wu Z, Huang X, Li Y C, et al. Novel chitosan films with laponite immobilized Ag nanoparticles for active food packaging [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 199: 210–218.

[2] 曾少甫, 胡长鹰, 匡衡峰, 等. 肉桂醛在壳聚糖复合活性包装膜中的释放及在鲜猪肉冷藏中的应用 [J]. 食品科学, 2018 (9): 182–189.

[3] 张慧芸, 郭新宇, 吴静娟. 添加丁香精油对玉米醇溶蛋白膜性能及结构的影响 [J]. 食品科学, 2016, 37(12): 7–12.

[4] Villegas C, Torres A, Rios M, et al. Supercritical impregnation of cinnamaldehyde into polylactic acid as a route to develop antibacterial food packaging materials [J]. Food Research International, 2017, 99: 650–659.

[5] Chen G, Liu B. Cellulose sulfate based film with slow-release antimicrobial properties prepared by incorporation of mustard essential oil and β -cyclodextrin [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 55: 100–107.

[6] Kurek M, Garofulić I E, Bakić M T, et al. Development and evaluation of a novel antioxidant and pH indicator film based on chitosan and food waste sources of antioxidants [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 238–246.

[7] Ren L, Yan X, Zhou J, et al. Influence of chitosan concentration on mechanical and barrier properties of corn starch/chitosan films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 105: 1636–1643.

[8] Halim A L A, Kamari A, Phillip E. Chitosan, gelatin and methylcellulose films incorporated with tannic acid for food packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1119–1126.

[9] Medina E, Caro N, Abugoch L, et al. Chitosan thymol nanoparticles improve the antimicrobial effect and the water vapour barrier of chitosan-quinoa protein films [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 240: 191–198.

[10] 李京晶, 籍保平, 周峰, 等. 丁香和肉桂挥发油的提取、主要成分测定及其抗菌活性研究 [J]. 食品科学, 2006 (8):

(下转第 177 页)

setting in bigeye snapper surimi[J].Food Research International, 2003,36(3):253-266.

[18] Benjakul S, Visessanguan W, Thongkaew C, et al. Comparative study on physicochemical changes of muscle proteins from some tropical fish during frozen storage[J].Food Research International, 2003,36(8):787-795.

[19] Kubota S, Tamura Y, Morioka K, et al. Variable pressure-scanning electron microscopic observation of *Walleye Pollack* surimi gel[J].Journal of Food Science, 2003,68(1):307-311.

[20] 郭培, 申铨日, 周清平. 添加紫苏籽油对罗非鱼鱼糜品质的影响[J].食品科技, 2016(2):167-171.

[21] 周绪霞, 姜珊, 顾赛麒, 等. 油茶籽油对鱼糜凝胶特性及凝胶结构的影响[J].食品科学, 2017,38(9):27-33.

[22] Hughes E, Mullen A M, Troy D J. Effects of fat level, tapioca starch and whey protein on frankfurters formulated with 5% and 12% fat[J].Meat Science, 1998,48(1-2):169-180.

[23] 米红波, 王聪, 赵博, 等. 大豆油、亚麻籽油和紫苏籽油对草鱼鱼糜品质的影响[J].食品工业科技, 2017,38(18):60-64.

[24] Lee C M, Hampson J W, Abdollahi A. Effect of plastic fats on thermal stability and mechanical properties of fat-protein gel

products[J].Journal of the American Oil Chemists Society, 1981, 58(11):983-987.

[25] Benjakul S, Visessanguan W, Kwalumtharn Y. The effect of whitening agents on the gel-forming ability and whiteness of surimi[J].International Journal of Food Science & Technology, 2010,39(7):773-781.

[26] 秦影, 汤海青, 欧昌荣, 等. 超高压处理对大黄鱼鱼糜水分状态和蛋白质结构的影响[J].农业工程学报, 2015,31(23):246-252.

[27] 杨文鸽, 张问, 王小飞, 等. 用低场核磁共振研究盐溶液漂洗对带鱼鱼糜凝胶品质的影响[J].农业工程学报, 2016,32(7):263-269.

[28] Garrison W M. ChemInform abstract: Reaction mechanisms in the radiolysis of peptides, polypeptides and proteins [J]. Cheminform, 1986,18(49):381-398.

[29] Winterbourn C C, Metodiewa D. Reactivity of biologically important thiol compounds with superoxide and hydrogen peroxide [J].Free Radic Biol Med, 1999,27(3-4):322-328.

[30] 王艳霞, 张金丽, 张瑞婷, 等. 鱼种和亲水胶体对鱼糜制品凝胶性质的影响[J].食品工业科技, 2016,37(2):143-147.

(上接第169页)

64-68.

[11] Ye S, Zhu Z, Wen Y, et al. Facile and green preparation of pectin/cellulose composite films with enhanced antibacterial and antioxidant behaviors[J].Polymers, 2019,11(1):57.

[12] Chen H, Li L, Ma Y, et al. Development of active packaging film containing bioactive components encapsulated in β -cyclodextrin and its application[J].Food Hydrocolloids, 2019, 90:360-366.

[13] Maftoonzad N, Shahamirian M, John D, et al. Development and evaluation of antibacterial electrospun pea protein isolate-polyvinyl alcohol nanocomposite mats incorporated with cinnamaldehyde[J].Materials Science and Engineering C, 2019, 94:393-402.

[14] 关怡新, 余金鹏, 姚善涇, 等. 超临界溶液浸渍法制备缓释药物[J].化工学报, 2010(2):269-274.

[15] 唐川. 超临界溶液浸渍法制备食品活性包装研究进展[J].食品工业科技, 2018,39(22):309-313.

[16] Mir S A, Shah M A, Dar B N, et al. Supercritical impregnation of active components into polymers for food packaging applications [J]. Food and Bioprocess Technology, 2017,10(9):1749-1754.

[17] 唐川, 关怡新, 姚善涇, 等. 超临界溶液浸渍法制备负载磺胺嘧啶银不对称壳聚糖膜伤口敷料研究[J].高分子学报,

2014(6):774-781.

[18] 李萍, 舒婷, 丛方地, 等. 超声波法制备肉桂醛- β -环糊精包合物的研究[J].中国食品添加剂, 2016(9):82-89.

[19] Aydinli M, Tutas M. Water sorption and water vapour permeability properties of polysaccharide(locust bean gum)based edible films [J].LWT-Food Science and Technology, 2000,33(1):63-67.

[20] Baseri H, Haghighi Asl A, Lotfollahi M N. Effects of operating parameters on the cinnamaldehyde content of extracted essential oil using various methods [J].Chemical Engineering & Technology, 2010,33(2):267-274.

[21] Yu J, Guan Y, Yao S, et al. Preparation of roxithromycin-loaded poly (L-lactic acid) films with supercritical solution impregnation [J].Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011,50(24):13813-13818.

[22] Lina W, Fei L, Yanfeng J, et al. Synergistic antimicrobial activities of natural essential oils with chitosan films [J].Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2011,59(23):12411.

[23] 曾少甫, 胡长鹰, 刘婧. 壳聚糖-肉桂醛复合抗菌降解膜的制备及性能 [J].食品科学, 2016(10):6-11.

[24] 张贤彬, 刘笑宇, 姜萍萍, 等. 肉桂醛对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌作用及抑菌机理研究 [J].现代食品科技, 2015(5):31-35.

权威 · 核心 · 领先 · 实用 · 全面