

# 果胶的生物活性及其 用于包装材料的研究进展

刘娜, 黄雪松\*

(暨南大学理工学院食品科学与工程系, 广东广州 510632)

**摘要:**果胶是具有良好再生性、凝胶性及生物相容性等特点的生物聚合物,其在食品、医药等领域的应用日益广泛。本文综述了果胶的抗氧化、抑菌、抗炎及免疫调节、抗糖基化、抗凝血等生物活性,分别介绍了果胶与其他天然高分子物质、纳米材料、生物活性剂等复配后应用于食品包装材料的研究进展,并强调研究果胶及其衍生物的分子结构与生物活性之间的构效关系有助于果胶在相关领域的开发及应用,优化果胶基包装材料的性能和加工技术对实现其工业化生产是极为必要的。

**关键词:**果胶,多糖,生物活性,食品包装材料,薄膜

## Advance in Bioactivities of Pectin and Its Application in Packaging Materials

LIU Na, HUANG Xuesong\*

(College of Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** Pectin is a biopolymer with good regenerative properties, gelability and biocompatibility, and is increasingly widely used in food, medicine and other fields. This paper reviews the biological activities of pectin, such as antioxidant, antibacterial, anti-inflammatory and immune regulation, anti-glycation, anti-coagulation, etc., and introduces the research progress of biodegradable food packaging materials prepared by the combination of pectin with other natural polymer materials, nanometer materials and biological active agents, finally, it is pointed out that the study of the relationship between the molecular structure and bioactivity of pectin and its derivatives will contribute to the development and application of pectin in related fields, and the optimization of the performance and processing technology of pectin-based packaging materials is essential for their industrial production.

**Key words:** pectin; polysaccharides; bioactivity; food packaging material; film

中图分类号: TS209

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)06-0348-09

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020050101

**引文格式:** 刘娜, 黄雪松. 果胶的生物活性及其用于包装材料的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 348-356.

LIU Na, HUANG Xuesong. Advance in Bioactivities of Pectin and Its Application in Packaging Materials[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(6): 348-356. (in Chinese with English abstract) <http://www.spgykj.com>

果胶是一类存在于高等植物中的酸性大分子多糖,其一级结构以 $\alpha$ -1,4糖苷键连接的D-半乳糖醛酸(D-Galacturonic acid, GalA)及其甲酯为主,并由半乳糖醛酸聚糖(Homogalacturonan, HGA)区、鼠李糖半乳糖醛酸聚糖I(Rhamnogalacturonan-I, RG-I)区和鼠李糖半乳糖醛酸聚糖II(Rhamnogalacturonan-II, RG-II)区等部分组成,其中半乳糖醛酸占比约70%<sup>[1]</sup>。根据其半乳糖醛酸甲酯占总半乳糖醛酸的百分含量(即酯化度, Degree of esterification, DE)的

高低,可将其分为高酯果胶(HMP,即DE > 50%)和低酯果胶(LMP,即DE < 50%)<sup>[2]</sup>。

大量研究表明,果胶及其衍生物具有广泛的生物活性,应用前景广阔,但因其分子结构复杂,目前其生物活性与结构间的构效关系和作用机制还尚未明确,在一定程度上限制了相关产品的开发;果胶作为一种再生性、凝胶性、生物降解性及相容性等良好的天然产物,在保健食品、包装材料、药物递送、组织工程及伤口敷料等领域越来越受关注<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2020-05-09

作者简介: 刘娜(1997-),女,硕士研究生,研究方向:功能性食品, E-mail: 13548713653@163.com。

\*通信作者: 黄雪松(1957-),男,博士,教授,研究方向:功能性食品, E-mail: thxs@jnu.edu.cn。

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2018B020239001)。

果胶控制脂质消化、抗肿瘤及降胆固醇方面的生物活性已有综述报道<sup>[4]</sup>,本文综述了果胶的抗氧化、抑菌、抗炎及免疫调节、抗糖基化、抗凝血等生物活性,以及以果胶复合薄膜及涂层作为食品包装材料的研究进展,以为果胶在保健食品、相关药品及包装材料中的开发利用、提高农副产品的经济附加值等提供参考。

## 1 果胶的生物活性

### 1.1 抗氧化活性

氧化的本质是清除自由基,阻断自由基链式反应。综合相关的研究报道,果胶可通过两类机制达到清除自由基的效果:一类是直接清除,果胶(其结构中含大量羟基和羧基)可提供氢原子或电子以清除自由基;一类是间接清除,果胶可络合  $Fe^{2+}$ 、

$Cu^{2+}$  等金属离子,避免其引发或催化自由基的形成,同时,果胶也可增强抗氧化酶类活性,提高机体清除自由基的能力<sup>[5-6]</sup>。

果胶的抗氧化活性主要表现为其清除自由基(超氧阴离子、羟基自由基、DPPH 自由基等)、抑制脂质过氧化(降低脂质过氧化产物丙二醛的水平)、提高抗氧化酶活性(超氧化物歧化酶、过氧化氢酶等)及还原  $Fe^{3+}$  的能力(详见表 1)。

此外,对果胶进行适当的解聚可提高其抗氧化活性,例如超声波处理,它可产生低聚合度(degree of polymerization, DP)的果胶,暴露其原来隐藏的官能团,提高其抗氧化能力<sup>[7]</sup>。

### 1.2 抑菌活性

抑制细菌生长是食品、药品、保健食品的首要问

表 1 果胶的抗氧化活性  
Table 1 Antioxidant activity of pectin

| 类型               | 果胶来源       | 处理方法                    | 测定内容  | 抗氧化活性   | 文献   |
|------------------|------------|-------------------------|---|---|------|
| 天然果胶的<br>体外抗氧化活性 | 印尼山竹果皮     | 硫酸提取、醇沉法分离              | DPPH·清除率                                    | 其显示中等强度的抗氧化活性。  | [8]  |
|                  | 苹果渣        | 盐酸和亚硫酸混合提取、盐析法分离        | DPPH·、·OH、 $O_2^-$ ·清除率、卵黄脂蛋白脂质过氧化抑制率       | 其 DPPH·清除率及卵黄脂蛋白脂质过氧化抑制率均高于对·OH 及 $O_2^-$ ·的清除率。                                  | [9]  |
|                  | 红果参        | 盐酸提取、乙醇沉淀               | ·OH、 $O_2^-$ ·清除率、FRAP、抗油脂氧化能力              | 对·OH 和 $O_2^-$ ·的清除率分别为40%、26%,对动物油和植物油的保护率分别为39%、96%,对 $Fe^{3+}$ 的还原能力比 $V_C$ 弱。 | [10] |
|                  | 向日葵        | 酶法提取、超滤分级后得到三种不同 Mw 的果胶 | DPPH·、·OH、 $O_2^-$ ·清除率                     | Mw 显著影响抗氧化活性;其清除自由基的能力随着浓度的变化出现“极值”现象。  | [11] |
|                  | 葡萄柚果皮      | 传统加热提取、UAE              | ORAC、DPPH·清除率                               | UAE 果胶的抗氧化活性与抑制脂肪酶活性的能力强于传统加热提取的果胶。   | [12] |
|                  | 火龙果皮       | UAE、柠檬酸常规提取(CE)         | DPPH·、ABTS <sup>+</sup> ·清除率                | UAE 比 CE 果胶产量高且抗氧化活性强。45℃下,经 30 min UAE 的果胶的抗氧化活性最好。                              | [13] |
|                  | 无花果果皮      | UAE、超声-微波辅助提取           | DPPH·、ABTS <sup>+</sup> ·清除率                | 抗氧化活性随果胶浓度的增加而增加,超声-微波辅助提取果胶的抗氧化活性比 UAE 的更强。                                      | [5]  |
| 改性果胶的<br>体外抗氧化活性 | 商品果胶       | 水热法降解                   | DPPH·、 $O_2^-$ ·清除率                         | 水热降解显著提高了果胶对 DPPH·及 $O_2^-$ ·的清除能力。   | [14] |
|                  | 甘薯         | 超声处理                    | ORAC、FRAP                                   | 超声处理可提高其抗氧化活性。经 200 W、400 W 处理的果胶比 100W 的 ORAC、FRAP 值更高。                          | [7]  |
|                  | 山楂         | 超声处理                    | DPPH·、·OH 清除率、FRAP                          | 超声处理不改变果胶的主要结构,其 DE 和 Mw 降低,GaIa 含量和抗氧化活性提高。                                      | [15] |
| 果胶的体内<br>抗氧化活性   | 商业苹果果胶     | 酸碱改性、热改性                | DPPH·、·OH、ABTS <sup>+</sup> ·、 $O_2^-$ ·清除率 | 酸碱改性和热改性提高了果胶的 GaIa 含量,降低了 DE 和 Mw;酸碱改性提高了其抗氧化活性。                                 | [16] |
|                  | 山楂         | HWE、乙醇沉淀                | GSH、MDA 含量及 GSH-Px、SOD、CAT 活性               | 提高小鼠肝脏 GSH 的含量和抗氧化酶类 GSH-Px、SOD、CAT 的活性,降低小鼠肝脏中 MDA 的含量。                          | [17] |
|                  | 改性(水解)柑橘果胶 | -                       | MDA 含量及 GSH-Px、SOD 活性                       | 有抗氧化作用,可提高大鼠血清 SOD、GSH-Px 的活性、降低 MDA 水平,调节高脂血症大鼠的脂质过氧化。                           | [18] |

注:相对分子质量(Mw);DPPH 自由基(DPPH·);羟基自由基(·OH);超氧阴离子自由基( $O_2^-$ ·);ABTS<sup>+</sup> 自由基(ABTS<sup>+</sup>·);氧自由基吸收能力测定(ORAC); $Fe^{3+}$  还原能力测定(FRAP);超声辅助提取(Ultrasound-assisted extraction, UAE);热水提取(hot water extraction, HWE);谷胱甘肽(glutathione, GSH);谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px);超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD);过氧化氢酶(catalase, CAT);丙二醛(malondialdehyde, MDA)。

表2 果胶的抑菌活性  
Table 2 Antibacterial activity of pectin

| 果胶来源      | 处理方法       | 抑菌活性  | 文献   |
|-----------|------------|---|------|
| 柠檬皮       | 水动力空化法提取果胶 | 明显地抑制金黄色葡萄球菌,且抑菌效果强于商业柑橘果胶。   | [20] |
| 苹果<br>柑橘  | 碱性过氧化氢水解   | 在有·OH存在的食品体系中,苹果 POS 抑制大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的效果强于柑橘 POS。   | [21] |
| 向日葵<br>柑橘 | ED         | DP = 15~50 的向日葵果胶低聚糖(SPO)、柑橘果胶低聚糖(CPO)的抑菌活性最高,CPO 抑制枯草芽孢杆菌、大肠杆菌的效果大于 SPO,抑制金黄色葡萄球菌的效果小于 SPO,两种果胶对以上三种菌的 MIC 为 0.06~0.6 mg/mL。 | [22] |
| 山楂        | ED         | 果胶寡糖能破坏细菌胞膜的通透性和完整性,导致其内容物流失,影响细菌代谢而达到抑菌效果,当其平均 DP = 3 时,对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌效果最好,其 MIC 值分别为 1.250、0.625、0.625 g/L。        | [23] |
| 猕猴桃       | ED         | ED 产物在 pH = 9, 80 °C 时,抑菌活性最强。  | [24] |
| 商业果胶      | 季铵盐化       | 果胶和季铵盐化果胶无抗真菌活性,但对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、枯草芽孢杆菌三种细菌有抑制作用。随着季铵盐化果胶取代度的增加,其抑制金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的活性增加,抑制枯草芽孢杆菌的活性减弱,菌种会影响季铵盐化果胶的抗菌效果。            | [25] |

注:最小抑菌浓度(minimal inhibitory concentration, MIC);酶解(enzymatic degradation, ED)。

表3 果胶的抗炎活性  
Table 3 Anti-inflammatory activity of pectin

| 果胶来源   | 果胶特征/处理方法                        | 抗炎活性   | 文献   |
|--------|----------------------------------|--|------|
| 苜蓿茎    | 碱提取, RG-1 型果胶                    | 抑制脂多糖活化的 RAW264.7 细胞产生 IL-1 $\beta$ , IL-6, 降低其 COX-2 的表达水平, 抗炎效果显著。 | [27] |
| 商业柑橘果胶 | DE = 30%、DE = 60%、DE = 90% 的三种果胶 | 均抑制脂多糖活化的巨噬细胞中 iNOS、COX-2 的蛋白及 mRNA 的表达, 且 DE = 90% 果胶的效果最好。         | [28] |
| 榆树     | HWE、乙醇沉淀分离、硒化改性                  | 抑制脂多糖诱导的 RAW264.7 细胞产生 NO 而达到抗炎效果, 硒含量的增加可增强其抗炎作用。                   | [29] |
| 商业柑橘果胶 | DE = 72% 的 HMP、DE = 36% 的 LMP    | 小鼠口服 LMP 的抗炎效果比 HMP 好, HMP 对肠道炎症有抑制作用, 而 LMP 对局部和全身性炎症都有抑制作用。        | [30] |
| 柠檬     | DE = 7% 的 LMP                    | 抑制小鼠胰腺促炎因子的产生、促进短链脂肪酸的产生, 进而增强肠道屏障作用, 可积极调节急性胰腺炎。                    | [31] |

注:小鼠巨噬细胞 RAW264.7 (RAW264.7); 活性氧(ROS); 一氧化氮(NO); 一氧化氮合酶(iNOS); 环氧合酶(COX-2); 白介素 6(IL-6); 白介素 1 $\beta$ (IL-1 $\beta$ )。

题之一。果胶本身抑菌作用较弱,但其降解产物(大多数果胶产品中都含有大量的果胶降解产物)具有一定的抑菌活性(详见表2),尤其是果胶酶解产物,它们对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、副溶血性弧菌等常见的食源性致病菌有明显的抑制作用。国内已有固定化聚半乳糖醛酸酶制备抑菌性果胶低聚糖(pectin oligosaccharide, POS)的技术专利<sup>[19]</sup>,许多天然防腐剂的制备都会用到果胶或其酶解产物。此外,有研究报道,季铵盐化果胶也有明显的抑菌作用。

### 1.3 抗炎、免疫调节活性

抗炎和免疫调节往往紧密相连。研究表明,果胶能激活巨噬细胞、淋巴细胞等免疫细胞,调节抗炎因子(IL-10、IL-4等)及促炎因子(IL-1 $\beta$ 、TNF- $\alpha$ 、IFN- $\gamma$ 、一氧化氮等)的分泌水平(详见表3、表4)。适量地摄入果胶,既可预防慢性炎症,也可对急性炎症起到积极调节的作用。此外,对果胶进行合理改性,可提高其免疫调节活性<sup>[26]</sup>。

### 1.4 抗糖基化活性

非酶糖基化反应生成的不可逆晚期糖化终末产物(AGEs)是细胞衰老及许多慢性疾病的诱因之一。食物中的AGEs主要通过Maillard反应、葡萄糖氧化、脂质过氧化及多元醇降解途径产生<sup>[36]</sup>。而AGEs的抑制机理可分为两类,一类是抑制AGEs形成,另一类是断裂已形成的AGEs<sup>[37]</sup>,而果胶体外抗糖基化活性主要表现为其抑制食物中AGEs形成的能力。果胶抗糖基化活性的大小则与其单糖组成、Mw及降解程度有关且与其GalA含量及浓度正相关,详见表5。

### 1.5 抗凝血活性

硫酸酯化果胶有明显的抗凝血活性(详见表6),其中硫酸酯化是指果胶结构链中单糖残基的自由羟基被硫酸根基团取代,其硫酸基的取代度和取代位置也影响着果胶的抗凝能力。综合相关研究报道,硫酸酯化果胶主要是通过促进抗凝血酶III(AT-III)和肝素辅助因子II(HCII)对凝血因子(主要是凝血

表4 果胶的免疫调节活性  
Table 4 Immunomodulatory activity of pectin

| 果胶来源  | 果胶特征/处理方法               | 免疫调节活性  | 文献   |
|-------|-------------------------|---|------|
| 椴树花   | 沸水提取果胶后经分离纯化后得到三种果胶组分   | 均可诱导人全血吞噬细胞和小鼠巨噬细胞产生 ROS 和 NO, 同时也抑制由酵母聚糖诱导的 ROS 的产生及脂多糖诱导的 NO 产生、iNOS 表达, 有促炎和抗炎双重作用。              | [32] |
| 新疆芫菁  | HWE、乙醇沉淀分离后用再纯化         | 该果胶浓度在 12.5~100 μg/mL 时, 能提高小鼠巨噬细胞 RAW264.7 的增殖活性、吞噬能力, 刺激其释放 NO 及细胞因子 (IFN-γ、TNF-α、IL-1β), 且呈剂量效应。 | [33] |
| 可可豆荚壳 | 部分去乙酰化和去酯化的果胶 (MOP)     | MOP 比天然果胶的免疫刺激作用强, 且可活化小鼠巨噬细胞产生 NO、促炎细胞因子 (TNF-α、IL-12) 及抗炎细胞因子 (IL-10)。                            | [34] |
| 金钗石斛茎 | RG-I 型果胶, 乙酰基含量约为 8.9%。 | 能促进由刀豆蛋白 A 和脂多糖诱导的淋巴细胞增殖, 果胶侧链及乙酰基对其免疫活性有重要影响。  | [35] |

注: 肿瘤坏死因子-α (TNF-α); 干扰素-γ: (IFN-γ); 白介素 4 (IL-4); 白介素 10 (IL-10); 白介素 12 (IL-12); 其余缩写注释见表 3 注。

表5 果胶的体外抗糖基化活性  
Table 5 *In vitro* anti-saccharification activity of pectin

| 果胶来源  | 果胶特征/处理方法  | 抗糖基化活性   | 文献   |
|-------|--|--|------|
| 软枣猕猴桃 | 热水提取后分离为水洗多糖 (WPS: 由葡萄糖和半乳糖等组成的淀粉样多糖) 和盐洗多糖 (SPS-1: 富含鼠李半乳糖醛酸聚糖; SPS-2、SPS-3: 富含同聚半乳糖醛酸)。  | 均可清除自由基、抑制脂质过氧化及蛋白质糖基化, 其抑制 AGEs 的机制是抑制蛋白质羰基产生、保护巯基。SPS 的抗氧化、抗糖基化活性明显高于 WPS。 | [38] |
| 山楂    | HWE 得果胶、经柱层析得盐洗多糖 SPS-3, 再分别 ED。   | 抑制婴儿乳粉中形成 AGEs 的能力大小为: SPS-3 > SPS-3 酶解物 > 果胶 > 果胶酶解物                        | [39] |
| 山楂    | HWE、UAE、EAE  | 所得果胶的抗糖基化活性为: UAE > HWE > EAE  | [40] |
| 山楂    | 果胶经 ED、UAED 后得 LM-POS (MW < 700 Da); MM-POS (700 Da < MW < 3000 Da); HM-POS (MW > 3000 Da) | MM-POS 的抗糖基化活性优于 LM-POS 和 HM-POS, ED 获得的 MM-POS 其抗糖基化活性比 UAED 获得的 MM-POS 强。  | [41] |

注: 酶辅助提取 (enzyme-assisted extraction, EAE); 超声辅助酶促降解 (ultrasonic assisted enzymatic degradation, UAED)。

表6 硫酸酯化果胶的抗凝血活性  
Table 6 Anticoagulant activity of vitrified pectin

| 果胶来源           | 抗凝血活性   | 文献   |
|----------------|---|------|
| 柑橘             | 该硫酸酯化果胶有良好的抗凝血及抗血栓形成活性。   | [43] |
| 仙人掌            | 通过延长活化部分凝血活酶时间 (APTT) 和凝血酶时间 (TT) 而达到抗凝效果, 其抗凝活性与取代度有关。                       | [44] |
| 柑橘             | 主要通过抑制 α-凝血酶和凝血 Xa 因子而达到抗凝效果, 且优先抑制 α-凝血酶。                                    | [45] |
| 柑橘             | 抗凝血能力有浓度依赖性, 且主要依赖 HC II 介导的对凝血因子的抑制作用而实现抗凝, 而对 AT-III 的依赖较少。                 | [46] |
| DE = 75% 的商业果胶 | 在一定范围内, 其抗凝活性随取代度的增加而增加; Mw = 16、20、23 kDa 的三种硫酸酯化果胶中, Mw = 20 kDa 果胶的抗凝活性最好。 | [47] |

注: 表 6 中的果胶都是经过硫酸酯化的。

酶和凝血 Xa 因子) 的抑制来达到抗凝效果<sup>[42]</sup>。通常, 硫酸酯化果胶的抗凝能力比传统抗凝药肝素弱, 但肝素有自发性出血、骨质疏松、皮疹等不良反应, 而硫酸酯化果胶出现不良反应的风险较低, 故其有作为抗凝药成分的潜力。

### 1.6 其他活性

除以上活性外, 果胶及其衍生物还有消炎镇痛、抗疲劳、抗病毒等活性 (详见表 7)。果胶的结构是其生物活性的基础。一般地, 糖醛酸含量较高、有效基团较多、Mw 较小易于吸收的果胶有更好的生物活

性。研究表明, 富含阿拉伯糖的樱桃果胶及具有 RG-I 和 HG 的人参果胶有明显的抗疲劳效果。果胶除可抗疱疹病毒、脊髓灰质炎病毒及乙肝病毒外, 也有抗流感病毒及艾滋病病毒的活性, 且果胶的硫酸化、磷酸化等可增强其抗病毒活性<sup>[48-49]</sup>。总体来说, 果胶的生物活性众多且安全性高、毒副作用小, 在食品和医药行业中有良好的应用前景。

## 2 果胶在食品包装材料中的应用

食品包装的主要功能是将食品与外界分隔开, 以免食品受不良因素 (微生物、氧气、水蒸气及异味

表7 果胶的其他活性  
Table 7 Other bioactivities of pectin

| 果胶来源 | 果胶特征/处理方法                        | 活性                    | 作用及分析   | 文献   |
|------|----------------------------------|-----------------------|---|------|
| 金盏花  | UAE(柠檬酸为提取剂)、乙醇沉淀、膜透析分级          | 抗氧化、消炎、镇痛             | 其活性众多,可能是源于其高 GalA 含量及较低的 Mw、DE 值。                  | [50] |
| 针叶樱桃 | 沸水萃取后经冻融处理,得到水可溶性的富含阿拉伯糖的果胶。     | 抗疲劳活性                 | 可减少小鼠体内乳酸的蓄积、提高其骨骼肌呼吸能力及海马神经元的抗氧化能力,以达到抗疲劳的效果。      | [51] |
| 人参   | HWE、层析分离得到富含 RG-I 和 HG 结构域的酸性果胶。 | 抗疲劳活性                 | 可减少机体内乳酸的蓄积及脂质过氧化的损伤、促进脂肪动员、稳定血糖水平,以达到抗疲劳效果。        | [52] |
| 印加果  | 草酸铵提取、乙醇沉淀                       | 抗 1 型单纯疱疹病毒及脊髓灰质炎病毒活性 | 通过抑制病毒的初始复制阶段达到抗病毒效果。                               | [53] |
| 雪莲花瓣 | HWE、乙醇沉淀、柱层析提纯                   | 抗乙肝病毒活性               | 抑制 HepG2.2.15 细胞分泌 HBsAg(乙肝表面抗原)和 HBeAg(乙肝病毒 e 抗原)。 | [54] |

等)作用而导致食品败坏。但随着食品工业的快速发展,由食品包装材料产生的白色污染已造成了越来越严重的环境破坏。近年来,依据果胶可生物降解、成膜性好、天然无毒、生物相容性好、量大价廉等优点<sup>[55]</sup>,利用其制备可生物降解的薄膜类包装材料(涂层及薄膜)的研究报道越来越多。

一般地,果胶基薄膜是阻隔气体的良好屏障,能防油、防异味、抗氧化,但仅用果胶制作的薄膜,有热稳定性低、隔水防潮性能差等缺陷<sup>[56]</sup>。因此,常添加其它成分或物质予以改善。依据所添加的成分或物质,主要有如下类型的添加材料。

## 2.1 添加天然高分子物质

### 2.1.1 共混膜

常添加多糖(如壳聚糖、海藻酸盐、淀粉等)、脂类(如油类、蜡类、树脂等)或蛋白质(如明胶、酪蛋白、乳清蛋白等)等与果胶制成共混膜,而所添加物质的化学结构及其与果胶分子间的相互作用是改善薄膜性能的关键。

果胶是酸性多糖,壳聚糖是碱性多糖,二者经静电相互作用形成的共混膜,组织致密、无相分离,且拥有比单一果胶或单一壳聚糖膜更好的弹性和柔韧性<sup>[57]</sup>。Šešlija 等<sup>[58]</sup>发现,相比纯果胶膜,果胶/羧甲基纤维素共混膜有更好的机械强度和热稳定性。

脂质的低极性和高疏水性可显著提高薄膜的隔水防潮性能。Luangtana-Anan 等<sup>[59]</sup>向果胶膜中添加 50% 的虫胶以提高其防潮性能,但同时也降低了其机械强度,故需添加一定的增塑剂改善其机械性能。

一般地,与多糖膜相比,蛋白质膜有更好的机械性能<sup>[60]</sup>。Eghbal 等<sup>[61]</sup>发现在 LMP/酪蛋白薄膜中,蛋白质含量越高,膜的含水量和吸水率则越低,当酪蛋白酸钠/LMP 的质量比为 0.05 时,薄膜的杨氏模量和拉伸强度达到最大值,其延伸率也有所增加。Das 等<sup>[62]</sup>发现按质量比为鸡毛蛋白:果胶=25:75 制备的共混膜的综合性能最好,用其包装炸鱼,可减少炸鱼在贮藏中的微生物滋长、水分损失及硬化程度。

### 2.1.2 双层膜

双层膜也是一种将不同成膜原料的优点和性能结合,改善薄膜综合性能的方法。Bora

等<sup>[63]</sup>以酪蛋白层为内层、海藻酸钠/果胶层为外层制备双层膜,其膜组分之间有很高的相容性,增加了两层膜之间的结合强度,很好地综合了蛋白质膜和多糖膜的优点。

## 2.2 添加纳米材料作为填充剂

若向果胶基膜中添加少量纳米材料,其在薄膜中的均匀分布及与果胶分子间的相互作用,可改善薄膜的诸多性能<sup>[64]</sup>。而常用的纳米填料有如下几种。

### 2.2.1 纳米纤维素

纳米纤维素一般可分为纳米纤维素晶体(CNC)和纳米纤维素纤丝(CNF)<sup>[65]</sup>。Maryam 等<sup>[66]</sup>发现果胶基膜中 CNC 的质量分数较低(2%、5%)时,其与果胶间良好的相容性和相互作用,以及其形成的刚性连续网络,改善了膜的力学性能并降低了其吸湿性;另外,CNC 在薄膜中的均匀分布,延长了水蒸气扩散路径,故提高了其水蒸气阻隔性能;而薄膜中 CNC 的质量分数较高(7%),则易出现团聚现象,其与果胶间的相互作用也减小,故上述改善效果也减小。Silva 等<sup>[67]</sup>发现 CNC 的添加几乎不改变薄膜的热稳定性,但会增大其脆性。

### 2.2.2 蒙脱土

蒙脱土(MMT)属于天然黏土,是纳米复合材料中最常用的一种层状硅酸盐。薄膜中 MMT 与果胶分子间的氢键作用,可改善其机械性能;有序而分散的 MMT 纳米层,可提高其水蒸气阻隔性;MMT 良好的隔热作用可提高其热稳定性<sup>[68-69]</sup>。Oliveira 等<sup>[70]</sup>发现随果胶基膜中 MMT 质量分数的递增(0.2%、4%、6%、8%),其水蒸气透过率及延伸率逐渐降低(脆性增大),而其拉伸强度和弹性模量则先增大后减小,并在 6% 时取得最大值。

### 2.2.3 金属及金属氧化物纳米颗粒

金属及金属氧化物纳米颗粒可显著增强薄膜的抗菌性及紫外线阻隔性,也可改善薄膜的其他性能。例如,银纳米粒子的添加赋予了果胶基膜良好的抗菌性,提高了其紫外线阻隔率(从 70% 增至 97%),改善了其热稳定性、机械强度及水蒸气阻隔性等<sup>[71]</sup>。Dash 等<sup>[72]</sup>发现随淀粉/果胶膜中二氧化钛质量分数(0.5%~4%)的

表8 添加不同活性剂的果胶复合膜  
Table 8 Pectin composite films with different surfactants added

| 活性剂        | 薄膜原料      | 效果   | 文献   |
|------------|-----------|--|------|
| 柠檬精油       | 海藻酸盐、果胶   | 添加0.15%、0.3%精油使薄膜呈轻微黄色,增强了其热稳定性、阻隔性及机械强度等。                                   | [74] |
| 丁香花蕾精油     | 柑橘果胶      | 添加0.5%~1.5%精油改善了膜的隔水性、力学性能、热稳定性、抗氧化及抗菌性,增加了其不透明度,有抗金黄色葡萄球菌、单增李斯特菌等食源性致病菌的作用。 | [75] |
| 茶多酚        | 果胶、魔芋葡甘聚糖 | 添加2%茶多酚提高了膜的力学性能、耐水性、抗氧化性及对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的抗菌性。                                 | [76] |
| 溶菌酶        | LMP       | 复合薄膜可控制溶菌酶的释放;因果胶酶能增加溶菌酶的活性,故该膜能有效抑制产果胶酶的溶菌酶敏感菌。                             | [77] |
| 柠檬皮中的抗氧化物质 | 柠檬皮果胶     | 添加20%提取物增加了膜的抗氧化性,使膜能有效降低大豆油贮藏30 d后的脂质氧化程度。                                  | [78] |
| 纳他霉素       | 海藻酸盐、果胶   | 添加4%纳他霉素降低了膜的拉伸强度,增加了水蒸气透过率和不透明度;膜对纳他霉素有控释作用,有作防腐包装材料的潜力。                    | [79] |
| 乳酸链球菌素     | 聚乳酸、果胶    | 含有500 IU/mg乳酸链球菌素的复合膜可有效抑制单核增生李斯特菌。  | [80] |

增加,其拉伸强度、热稳定性、水蒸气及紫外线阻隔性等逐渐增强,但其延伸率有所降低。Ngo等<sup>[73]</sup>发现果胶/藻酸盐薄膜中氧化锌(ZnO-NPs)质量分数为5%时,对薄膜性能的改善效果最好;当ZnO-NPs质量分数为25%时,则易出现团聚、颗粒分布不均匀及再结晶等现象,对薄膜性能有负面影响。

### 2.3 添加生物活性剂

近年来,天然保鲜剂以其安全、健康、资源丰富等优势得到了关注,而抗氧化和抗菌又是食品保鲜中的主要方面,故常向薄膜中添加精油、乳酸链球菌素、纳他霉素、多酚类物质等天然的抗氧化或抗菌剂作为活性剂,使其成为活性膜(详见表8)。以薄膜为载体的优势在于活性剂能均匀地覆盖于食品表面并逐渐释放,减少其本身的颜色或气味对食品感官的影响,在发挥活性剂最佳效果、保证食品原有风味的同时延长保质期。

## 3 展望

基于近年来果胶的活性及其应用于包装材料的进展,要使果胶的生物活性及其作为食品包装材料的潜力得到大范围的开发,仍需进行大量的应用基础研究。今后的相关研究应集中在以下方面:从理论上探讨果胶结构(包括Mw、分支度、DP、差向异构、单糖组成、立体结构、尤其是HGA、RG-I、RG-II各区的比例等)与其生物活性,尤其是与抑菌抗菌之间的关系,即构效关系,进而指导其在包装材料、保健食品等领域的应用与开发;研究衍生化果胶(硫酸酯化、酰胺化、硒酸酯化等)的衍生化方法及取代度、取代位置等果胶分子结构变化与生物活性的关系,以利于实现有针对性地提取或修饰天然果胶、以便高效开发或利用其生物活性;果胶复合薄膜或涂层要达到传统包装材料的实用性、简便性及低成本性,不仅需要着力改善其机械性能、阻隔性能及热性能等,还需对其加工技术进行优化,使其能够工业生产。以上问题的探索均有助于副产品的加工升值、避免残次副产品造成环境污染以及利用果胶为社会创

造出更好的效益。

### 参考文献

[1] Mohnen D. Pectin structure and biosynthesis [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2008, 11(3): 266-277.

[2] Wang H, Fei S, Wang Y, et al. Comparative study on the self-assembly of pectin and alginate molecules regulated by calcium ions investigated by atomic force microscopy [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 231: 115673.

[3] 姚冰. 果胶纳米纤维的电纺、交联及生物医用性能研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2016.

[4] 刘成梅, 刘琪, 陈军, 等. 果胶功能性质新进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 344-351.

[5] Gharibzahedi S M T, Smith B, Guo Y. Pectin extraction from common fig skin by different methods: The physicochemical, rheological, functional, and structural evaluations [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 136: 275-283.

[6] 董成国. 辣木籽水溶性多糖的分离纯化、结构表征及其抗氧化活性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

[7] Ogutu F O, Mu T H. Ultrasonic degradation of sweet potato pectin and its antioxidant activity [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 726-734.

[8] Wathoni N, Shan C Y, Yi Shan W, et al. Characterization and antioxidant activity of pectin from Indonesian mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) rind [J]. Heliyon, 2019, 5(8): e02299.

[9] 张欣萌, 吕春茂, 孟宪军, 等. 盐析法制备寒富苹果渣果胶及其抗氧化性研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 170-176, 183.

[10] 陈莉华, 王晓静, 肖琴, 等. 红果参果胶提取物的抗氧化作用研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(4): 143-145, 150.

[11] 马雪梅, 徐霞, 贺胜龙, 等. 不同级分向日葵盘果胶的体外抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2016(12): 122-126.

[12] Wang W J, Ma X B, Jiang P, et al. Characterization of pectin from grapefruit peel: A comparison of ultrasound-assisted and conventional heating extractions [J]. Food Hydrocolloids, 2016,

61:730-739.

[13] Nguyen B M N, Pirak T. Physicochemical properties and antioxidant activities of white dragon fruit peel pectin extracted with conventional and ultrasound-assisted extraction [J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2019, 5(1):1633076.

[14] 姜美云, 唐硕, 王婷, 等. 果胶多糖水热法降解及其产物体外抗氧化性评价 [J]. *食品科学*, 2019, 40(12):253-259.

[15] Chen X W, Qi Y J, Zhu C H, et al. Effect of ultrasound on the properties and antioxidant activity of hawthorn pectin [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 131:273-281.

[16] 马丽苹, 焦昆鹏, 罗磊, 等. 改性苹果果胶性质及抗氧化活性 [J]. *食品科学*, 2017, 38(23):121-128.

[17] 董银萍, 李艳平. 山楂果胶的抗氧化活性 [J]. *食品科学*, 2014, 35(3):29-32.

[18] 张丽芳. 修饰柑橘果胶对高脂血症大鼠脂质过氧化调节作用的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

[19] 金征宇, 龙杰, 薛琳, 等. 一种固定化聚半乳糖醛酸酶制备具有抑菌性的芒果皮果胶低聚糖的方法: 中国, 110699405A [P]. 2020-01-17.

[20] Presentato A, Scurria A, Albanese L, et al. Superior antibacterial activity of integral lemon pectin extracted via hydrodynamic cavitation [J]. *Chemistry Open*, 2020, 9(5):628-630.

[21] Martinov J, Krstić M, Spasić S, et al. Apple pectin-derived oligosaccharides produce carbon dioxide radical anion in Fenton reaction and prevent growth of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. *Food Research International*, 2017, 100:132-136.

[22] 沈雪亮, 张建勋, 章银军, 等. 两种不同植物来源果胶低聚糖的抑菌性能研究 [J]. *发酵科技通讯*, 2015, 44(3):23-27.

[23] 王巍, 牟德华, 李丹丹. 山楂果胶寡糖的抑菌性能及机理 [J]. *食品科学*, 2018, 39(3):110-116.

[24] 王岩松. 软枣猕猴桃果胶的提取工艺及抑菌和抗氧化活性研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.

[25] Fan L H, Cao M, Gao S, et al. Preparation and characterization of a quaternary ammonium derivative of pectin [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 88(2):707-712.

[26] 魏子澍, 杨伟, 刘夫国, 等. 改性柑橘果胶研究进展 [J]. *中国食品添加剂*, 2014(3):194-200.

[27] Chen L, Liu J, Zhang Y Q, et al. Structural, thermal, and anti-inflammatory properties of a novel pectic polysaccharide from alfalfa (*Medicago sativa* L.) stem [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(12):3219-3228.

[28] Chen C H, Sheu M T, Chen T F, et al. Suppression of endotoxin-induced proinflammatory responses by *Citrus* pectin through blocking LPS signaling pathways [J]. *Biochemical Pharmacology*, 2006, 72(8):1001-1009.

[29] Lee J H, Lee Y K, Choi Y R, et al. The characterization, selenylation and anti-inflammatory activity of pectic polysaccharides extracted from *Ulmus pumila* L [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 111:311-318.

[30] Popov S V, Markov P A, Popova G Y, et al. Anti-inflammatory activity of low and high methoxylated citrus pectins

[J]. *Biomedicine & Preventive Nutrition*, 2013, 3(1):59-63.

[31] Sun Y J, He Y, Wang F, et al. Low-methoxyl lemon pectin attenuates inflammatory responses and improves intestinal barrier integrity in caerulein-induced experimental acute pancreatitis [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2017, 61(4):1600885.

[32] Georgiev Y N, Paulsen B S, Kiyohara H, et al. *Tilia tomentosa* pectins exhibit dual mode of action on phagocytes as  $\beta$ -glucuronic acid monomers are abundant in their rhamnogalacturonans I [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 175:178-191.

[33] 王伟, 布丽根·加冷别克, 陈恺, 等. 新疆芜菁果胶多糖组成分析及免疫活性评价 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(24):62-67.

[34] Amorim J C, Vriesmann L C, Petkowicz C L O, et al. Modified pectin from *Theobroma cacao* induces potent pro-inflammatory activity in murine peritoneal macrophage [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92:1040-1048.

[35] Wang J H, Zhang Y D, Luo J P. Structure elucidation of a pectin from *Dendrobium nobile* Lindl. and its immunological activity [J]. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2018, 32(3):744-750.

[36] 房红娟. 食品加工过程中晚期糖基化末端产物形成及控制研究 [D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2013.

[37] 周燕琼. 植物多酚抑制食品中晚期糖基化终末产物的形成的作用机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

[38] Zhu R G, Zhang X Y, Wang Y, et al. Characterization of polysaccharide fractions from fruit of *Actinidia arguta* and assessment of their antioxidant and antiglycated activities [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 210:73-84.

[39] 张鑫雨. 山楂果胶的体外抗氧化和抗糖基化活性及其应用研究 [D]. 沈阳: 辽宁大学, 2019.

[40] 侯玉婷, 苏金芳, 陈诗悦, 等. 不同方法提取的山楂果胶理化性质及体外抗糖基化活性的对比 [J]. *现代食品科技*, 2018, 34(4):159-166.

[41] Zhu R G, Zhang X Y, Wang Y, et al. Pectin oligosaccharides from hawthorn (*Crataegus pinnatifida* Bunge. Var. major): Molecular characterization and potential antiglycation activities [J]. *Food Chemistry*, 2019, 286:129-135.

[42] 罗兰. 四种海参来源的硫酸化多糖的理化性质及其抗凝活性比较 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

[43] Román Y, de Oliveira Barddal H P, Iacomini M, et al. Anticoagulant and antithrombotic effects of chemically sulfated fucogalactan and *Citrus* pectin [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 174:731-739.

[44] Chaouch M A, Hammi K M, Dhahri M, et al. Access to new anticoagulant by sulfation of pectin-like polysaccharides isolated from *Opuntia Ficus indica Cladodes* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120:1794-1800.

[45] Maas N C, Gracher A H P, Sasaki G L, et al. Sulfation pattern of Citrus pectin and its carboxy-reduced derivatives: Influence on anticoagulant and antithrombotic effects [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 89(4):1081-1087.

- [46] 尹馨梓. 柑橘果胶的硫酸酯化及其活性的探究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [47] Fan L H, Gao S, Wang L B, et al. Synthesis and anticoagulant activity of pectin sulfates[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 124(3): 2171–2178.
- [48] 徐晓飞. 香菇多糖 L2 的免疫调节机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [49] 郑义. 人参果胶与半乳凝素-8 相互作用的构效关系研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [50] Mzoughi Z, Abdelhamid A, Rihouey C, et al. Optimized extraction of pectin-like polysaccharide from *Suaeda frutescens* leaves: Characterization, antioxidant, anti-inflammatory and analgesic activities [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 185: 127–137.
- [51] Klosterhoff R R, Kanazawa L K S, Furlanetto A L D M, et al. Anti-fatigue activity of an Arabinan-rich pectin from acerola (*Malpighia emarginata*) [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 109: 1147–1153.
- [52] 王佳. 人参多糖抗疲劳和抗抑郁作用及其机制的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [53] Godoi A M, Faccin-Galhardi L C, Rechenchoski D Z, et al. Structural characterization and antiviral activity of pectin isolated from *Inga* spp [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 139: 925–931.
- [54] Chen W B, Zhu X L, Ma J J, et al. Structural elucidation of a novel pectin-polysaccharide from the petal of *Saussurea laniceps* and the mechanism of its anti-HBV activity [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 223: 115077.
- [55] Ye S, Zhu Z J, Wen Y Y, et al. Facile and green preparation of pectin/cellulose composite films with enhanced antibacterial and antioxidant behaviors [J]. *Polymers*, 2019, 11(1): 57.
- [56] Mohamed S A A, El-Sakhawy M, El-Sakhawy M A M. Polysaccharides, protein and lipid-based natural edible films in food packaging: A review [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 238: 116178.
- [57] Baron R D, Pérez L L, Salcedo J M, et al. Production and characterization of films based on blends of chitosan from blue crab (*Callinectes sapidus*) waste and pectin from Orange (*Citrus sinensis* Osbeck) peel [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 98: 676–683.
- [58] Šešlija S, Nešić A, Škorić M L, et al. Pectin/carboxymethylcellulose films as a potential food packaging material [J]. *Macromolecular Symposia*, 2018, 378(1): 1600163.
- [59] Luangtana-Anan M, Soradech S, Saengsod S, et al. Enhancement of moisture protective properties and stability of pectin through formation of a composite film: Effects of shellac and plasticizer [J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(12): 2915–2925.
- [60] Bourtoom, T. Edible protein films: Properties enhancement [J]. *International Food Research Journal*, 2009, 16(1): 1–9.
- [61] Eghbal N, Yarmand M S, Mousavi M, et al. Complex coacervation for the development of composite edible films based on LM pectin and sodium caseinate [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 151: 947–956.
- [62] Das P, Borah P P, Badwaik L S. Transformation of chicken feather keratin and pomelo peel pectin into biodegradable composite film [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, 26(5): 2120–2129.
- [63] Bora A, Mishra P. Characterization of casein-silver conjugated nanoparticle containing multifunctional (pectin-sodium alginate/casein) bilayer film [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(10): 3704–3714.
- [64] Villa-Rojas R, Valdez-Fragoso A, Mújica-Paz H. Manufacturing methods and engineering properties of pectin-based nanobiocomposite films [J]. *Food Engineering Reviews*, 2018, 10(1): 46–56.
- [65] 王晓宇. 纳米纤维素晶体和纤丝及其气凝胶的制备与特性分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- [66] Maryam Chaichi, Maryam Hashemi, Fojan Badii, et al. Preparation and characterization of a novel bionanocomposite edible film based on pectin and crystalline nanocellulose [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 157: 167–175.
- [67] Silva I S V, Neto W P F, Silvério H A, et al. Mechanical, thermal and barrier properties of pectin/cellulose nanocrystal nanocomposite films and their effect on the storability of strawberries (*Fragaria ananassa*) [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2017, 28(8): 1005–1012.
- [68] 刘晓菲. 壳聚糖/蒙脱土复合膜的制备及性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [69] Saha N R, Sarkar G, Roy I, et al. Studies on methylcellulose/pectin/montmorillonite nanocomposite films and their application possibilities [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 136: 1218–1227.
- [70] Oliveira T í S, Zea-Redondo L, Moates G K, et al. Pomegranate peel pectin films as affected by montmorillonite [J]. *Food Chemistry*, 2016, 198: 107–112.
- [71] Shankar S, Tanomrod N, Rawdkuen S, et al. Preparation of pectin/silver nanoparticles composite films with UV-light barrier and properties [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 842–849.
- [72] Dash K K, Ali N A, Das D, et al. Thorough evaluation of sweet potato starch and lemon-waste pectin based-edible films with nano-titania inclusions for food packaging applications [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 139: 449–458.
- [73] Ngo T M P, Dang T M Q, Tran T X, et al. Effects of zinc oxide nanoparticles on the properties of pectin/alginate edible films [J]. *International Journal of Polymer Science*, 2018, 2018: 1–9.
- [74] Siracusa V, Romani S, Gigli M, et al. Characterization of active edible films based on citral essential oil, alginate and pectin [J]. *Materials*, 2018, 11(10): 1980.
- [75] Nisar T, Wang Z C, Yang X, et al. Characterization of *Citrus* pectin films integrated with clove bud essential oil: Physical, thermal, barrier, antioxidant and antibacterial properties [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 106: 670–680.



- [76] Lei Y L, Wu H J, Jiao C, et al. Investigation of the structural and physical properties, antioxidant and antimicrobial activity of pectin-konjac glucomannan composite edible films incorporated with tea polyphenol [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94:128-135.
- [77] Bayarri M, Oulahal N, Degraeve P, et al. Properties of lysozyme/low methoxyl (LM) pectin complexes for antimicrobial edible food packaging [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 131:18-25.
- [78] Rodsamran P, Sothornvit R. Lime peel pectin integrated with coconut water and lime peel extract as a new bioactive film sachet

- to retard soybean oil oxidation [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97:105173.
- [79] Bierhalz A C K, da Silva M A, Kieckbusch T G. Natamycin release from alginate/pectin films for food packaging applications [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(1):18-25.
- [80] Jin T, Liu L S, Zhang H, et al. Antimicrobial activity of nisin incorporated in pectin and polylactic acid composite films against *Listeria monocytogenes* [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2009, 44(2):322-329.

(上接第 303 页)

2018, 49(8):1136-1141.

- [23] 陈婷, 徐文斌, 洪怡蓝, 等. 响应面法优化甜叶菊残渣中总黄酮提取工艺及抗氧化活性 [J]. 食品科学, 2016, 37(18):52-57.
- [24] 肖安凤, 王芳, 倪辉, 等. 单宁酶固体酶制剂的喷雾干燥制备工艺优化 [J]. 中国食品学报, 2013, 13(7):144-151.
- [25] 段振华, 张慤. 葡萄保鲜技术的研究 [J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(1):68-71.
- [26] Xiao X, Fu Z, Zhu Z, et al. Improved preservation process for table grapes cleaner production in cold chain [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211(20):1171-1179.
- [27] 王妍丹, 张平, 朱志强, 等. 不同保鲜剂处理对茉莉莎葡萄贮藏品质和生理生化的影响 [J]. 保鲜与加工, 2016, 16(2):15-21.
- [28] 那广宁, 高聪聪, 纪海鹏, 等. 保鲜剂不同组合对无核白葡萄贮藏保鲜的影响 [J]. 包装工程, 2020, 41(1):11-16.
- [29] Xue M, Yi H. Induction of disease resistance providing new insight into sulfur dioxide preservation in *Vitis vinifera* L [J].

Scientia Horticulturae, 2017, 225:567-573.

- [30] Zutahy Y, Lichter A, Kaplunov T, et al. Extended storage of 'Red Globe' grapes in modified SO<sub>2</sub> generating pads [J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 50(1):12-17.
- [31] Crisosto C H, Palou L, Garner D, et al. Concentration by time product and gas penetration after marine container fumigation of table grapes with reduced doses of sulfur dioxide [J]. Horttechnology, 2002, 12(2):241-245.
- [32] 徐永霞, 李娟, 李保同, 等. 非季铵盐型松香基表面活性剂的研究进展 [J]. 材料导报, 2016, 30(1):61-66.
- [33] Meyer M C, Straughn A B, Mhatre R M, et al. The effect of gelatin cross-linking on the bioequivalence of hard and soft gelatin acetaminophen capsules [J]. Pharmaceutical Research, 2000, 17(8):962-966.
- [34] 贾晓昱, 杨维巧, 潘艳芳, 等. 红提葡萄 SO<sub>2</sub> 脉冲式防腐保鲜技术 [J]. 包装工程, 2019, 40(9):22-27.
- [35] 魏佳, 张政, 赵芳芳, 等. 鲜食葡萄 SO<sub>2</sub> 气体精准熏蒸保鲜控制系统设计 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(1):260-268.

(上接第 347 页)

Chemistry, 2018, 263:142-150.

- [38] Xue H, Xu M, Liao M F, et al. Effects of tea and *Illicium verum* braise on physicochemical characteristics, microstructure, and molecular structure of heat-induced egg white protein gel [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110:106181.
- [39] 徐保立, 李斌, 范劲松, 等. 食品添加剂对鸡蛋清凝胶强度的影响 [J]. 食品工业科技, 2010, 31(8):297-299.
- [40] 胡瑞, 李纯, 周文倩, 等. 杂粮粉对鸡蛋凝胶特性的影响 [J]. 食品科学, 2013, 34(23):151-154.
- [41] 周绪霞, 陈婷, 吕飞, 等. 茶多酚改性对蛋清蛋白凝胶特性的影响及机理 [J]. 食品科学, 2018, 39(16):13-18.

[42] 王轶男, 程缘, 迟玉杰. 低酯果胶协同 NaCl 对全蛋液凝胶性质的影响 [J]. 食品科学, 2020, 41(4):32-40.

- [43] 王然, 迟玉杰. 转谷氨酰胺酶提高蛋清粉凝胶性能的研究 [J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(2):109-113.
- [44] 雷明辉, 叶劲松, 张铭容, 等. 谷氨酰胺转氨酶对鸡蛋蛋白热凝固性的影响 [J]. 食品工业科技, 2015, 36(13):143-149.
- [45] 周长旭, 靳红果, 辛营营, 等. 蛋白质量浓度对鸡蛋热诱导凝胶特性的影响 [J]. 食品科学, 2012, 33(9):118-121.
- [46] 艾民珉, 汤婷, 蒋爱民, 等. 化学作用力对皮蛋蛋黄凝胶形成的影响 [J]. 食品与机械, 2018, 34(6):5-9.