

玉米醇溶蛋白菊粉糖基化改性成膜 工艺及其性能研究

Study on the modification conditions and properties of the zein-inulin

陈又铭¹ 张慧君^{1,2} 郭浩¹ 沙迪昕¹ 王一正¹

CHEN You-ming¹ ZHANG Hui-jun^{1,2} GUO Hao¹ SHA Di-xin¹ WANG Yi-zheng¹

(1. 齐齐哈尔大学食品与生物工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006;

2. 黑龙江省果蔬杂粮饮品工程技术研究中心, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

(1. College of Food Bioengineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China;

2. Beverage Engineering Technological Research Center of Fruit-vegetables and Coarse

Cereals of Heilongjiang Province, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

摘要:以菊粉作为羧基供体,与玉米醇溶蛋白的氨基进行糖基化反应,探讨改性成膜的最佳工艺,并对膜的各种性能进行了检测。结果表明:当物料比(蛋白/糖)10:1(g/g),反应溶液 pH 6,反应时间 48 h 制得的玉米醇溶蛋白-菊粉共价交联膜达到最佳状态,该条件下膜的抗拉强度为 10.12 MPa,接枝度为 37.5%。改性后的玉米醇溶蛋白膜的透光率、阻水、阻油、阻氧性均优于原玉米醇溶蛋白膜。

关键词:玉米醇溶蛋白;菊粉;糖基化;性能

Abstract: The modification conditions of the film were optimized using zein and inulin as raw materials, and the properties of them were measured. The results showed that the optimum conditions were material ratio 10 : 1 (g/g), pH 6 with reacting for 48 hours. Under these conditions, the tensile strength of the zein-inulin film was 10.12 MPa, with 37.5% of the graft. The light transmittance, water resistance, oil absorption, and oxygen barrier of inulin-modified zein films were better than those in the original ones.

Keywords: zein; glycosylation; inulin; properties

随着现代科技的飞速发展,由于塑料制品的不可降

解性导致的环境污染,已直接威胁到人们的健康及生活。近年来,美国、欧盟、日本等发达国家十分重视可降解材料产业,特别是原料来自可再生资源或产业废弃的可降解材料的发展^[1]。作为一种生物可降解材料,玉米醇溶蛋白(zein)膜凭借良好的成膜性逐渐凸显出来,玉米醇溶蛋白是玉米深加工的一种副产物,不需加入任何添加剂即可制成薄膜,该膜防潮、隔氧、抗紫外线、保香、不透油、防静电等特性较好,在食品、医药、包装等行业具有广阔的应用前景^[2]。

玉米醇溶蛋白膜的膜质较脆,机械性能较差。蛋白质改性是提高膜机械性能的一种常见方法,改性方法有物理改性、化学改性、酶法改性和基因工程改性。传统方法通常选择加入增塑剂的酰化改性,如张雪娜等^[3]在玉米醇溶蛋白中添加增塑剂后制成薄膜,考察了其对于荷兰瓜的保鲜效果,结果表明玉米醇溶蛋白膜可有效减少果蔬的水分散失。崔和平等^[4]研究了不同甘油含量对玉米醇溶蛋白膜储藏稳定性的影响,结果表明甘油含量为 0.3 g/g 的蛋白膜机械性能的稳定性较好。但此种改性方法通常会有化学试剂残留,同时酰化改性改变了蛋白质的结构,有研究^[5]表明此种改变会使蛋白质的生物效价降低。而糖基化改性仅通过加热使糖与蛋白质发生反应,改性产物的性能较好,并且具有一定的安全性。糖基化改性又分为干热法和湿热法,干热法是蛋白质与多糖基于固相体系发生的反应,反应时间长,但操作简单;而湿热法虽具有反应时间短、速度快等优点,但机械性能远低于干热法^[6]。

菊粉(inulin)是由果糖分子通过 $\beta(2-1)$ 键连接,末端含有一个葡萄糖分子的高分子碳水化合物,平均分子量

基金项目:黑龙江省自然科学基金面上项目(编号:C201455);黑龙江省教育厅基本业务专项“粮头食尾”项目(编号:LTSW201701);黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(植物性食品加工技术特色学科专项)(编号:YSTSXK201825)

作者简介:陈又铭,女,齐齐哈尔大学在读硕士研究生。

通信作者:张慧君(1969—),女,齐齐哈尔大学教授,硕士。

E-mail: zhanghuijun1997@163.com

收稿日期:2019-01-30

5 500 Da^[7],是一种多聚果糖。菊粉作为天然功能性食品的配料,具有膳食纤维和益生元双重功效,促进矿物质吸收、维生素合成和预防癌症等作用^[8]。目前,采用糖基化改性玉米醇溶蛋白,制备成膜的研究较少,本研究拟采用菊粉对玉米醇溶蛋白进行干法糖基化改性,并将改性产物制成薄膜,通过对水蒸气透过率、透光率、阻油性、阻氧性等性能的测定,为干法改性的玉米醇溶蛋白膜的后期应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

玉米醇溶蛋白:蛋白含量 90%,自制;

菊粉:聚合度(DP)>10,纯度>95%,佐源生物工程有限公司;

α -淀粉酶: 7×10^4 U/mL,宁夏夏盛实业集团有限公司;

邻苯二甲醛:化学纯,天津市光复精细化工研究所;

十二烷基硫酸钠:电泳级,天津市耀华化学试剂公司;

β -巯基乙醇:分析纯,天津市北联精细化学品开发有限公司;

硼砂:分析纯,天津市东丽区天大化学试剂厂;

硫代硫酸钠:分析纯,天津市博迪化工有限公司;

三氯甲烷:分析纯,天津市富宇精细化工有限公司。

1.1.2 仪器与设备

质构仪:QTS-25 型,美国博乐飞公司;

紫外可见分光光度计:L5 型,上海仪电分析仪器有限公司;

超声波信号发生器:WSL-1000D 型,南京顺流仪器有限公司;

真空冷冻干燥机:LYOQUEST-85 型,西班牙泰士达公司;

超低温冰箱:Thermo702 型,赛默飞世尔科技有限公司;

数显膜测厚仪:GBCY01 型,浙江盛泰芯电子科技有限公司;

隔水式恒温培养箱:PXY-DHS-5008S 型,北京市光明医疗器械厂。

1.2 方 法

1.2.1 原料预处理 取适量玉米黄粉(CGM),经酶法除淀粉、丙酮脱色后,用 70%乙醇溶液浸提后得到上清液,用冰水浸提,冷冻干燥后得玉米醇溶蛋白样品。

1.2.2 糖基化改性 称取玉米醇溶蛋白,用 70%乙醇溶液溶解,配制成一定浓度的玉米醇溶蛋白乙醇溶液,按比例加入一定质量菊粉,混匀,调节体系 pH,超声,冻干,打

磨成粉,置于 60℃、相对湿度为 79%的干燥器内反应一定时间,得玉米醇溶蛋白-菊粉糖基化改性产物。

1.2.3 改性成膜工艺优化

(1) 物料比(蛋白/糖):在反应溶液 pH 6、反应时间 36 h 条件下,考察物料比[5:1,7.5:1,10:1,12.5:1,15:1 (g/g)]对玉米醇溶蛋白改性成膜的影响。

(2) pH:在物料比(蛋白/糖)10:1 (g/g)、反应时间 36 h 条件下,考察反应溶液 pH 值(pH 4,6,8,10)对玉米醇溶蛋白改性成膜的影响。

(3) 反应时间:在物料比(蛋白/糖)10:1 (g/g)、pH 6 的条件下,考察糖基化反应时间(24,36,48,60,72 h)对玉米醇溶蛋白改性成膜的影响。

(4) 正交试验优化设计:在单因素基础上以物料比(蛋白/糖)、pH、反应时间为试验因素,以膜的抗拉强度为指标,探索最佳工艺条件。

1.2.4 膜的制备 称取糖基化改性产物,用 70%乙醇溶解配成 8%样品溶液,溶胶后倒入模具于 70℃烘干成膜。将膜置于 30℃、相对湿度 43%的干燥器内平衡 48 h,进行测定。

1.2.5 接枝度的测定 采用邻苯二甲醛 OPA 法^[9]。

(1) 试剂①:0.080 0 g OPA,2 mL 甲醇,6 mL 水混合均匀。

(2) 试剂②:10 mL SDS,0.1 mol/L 硼砂 100 mL,0.4 mL β -巯基乙醇,加少量蒸馏水混合后,定容至 200 mL。

(3) 测定时,量取 0.3 mL 试剂①,3.7 mL 试剂②和 200 μ L 样品,35℃水浴下反应 2 min,以 200 μ L 乙醇为空白对照,在 340 nm 波长处测其吸光值。采取同样的方法,用赖氨酸代替样品作标准曲线,依据赖氨酸的曲线图计算得出样品中游离氨基的含量 C。按式(1)计算接枝度。

$$DG = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

DG——接枝度,%;

C_0 ——未改性前溶液中游离氨基含量,mol/L;

C_1 ——改性后溶液中游离氨基含量,mol/L。

1.2.6 膜机械性能抗拉强度和断裂伸长率的测定 将玉米醇溶蛋白膜及改性膜裁成矩形条状(40 mm \times 10 mm),随机取 10 个点用数显测厚仪准确测量其膜厚度,取平均值。质构仪夹距 20 mm,拉伸速度 5.0 mm/s,每种膜测 3 次取平均值,按式(2)计算抗拉强度。

$$TS = \frac{F}{L \times W}, \quad (2)$$

式中:

TS——抗拉强度,MPa;

- F——最大拉力, N;
- L——膜样品厚度, mm;
- W——膜样品宽度, mm。

1.2.7 水蒸气透过系数的测定 采用杯式法测定膜的水蒸气透过系数, 根据 GB 1037—1988, 并略作修改: 将无水氯化钙(CaCl₂)粉碎为粒度 2 mm 粉末, 于 200 °C 干燥箱中干燥 2 h, 待冷却后加入到试管中, 使加入的 CaCl₂ 量至试管口 5 mm 处为止。选择均匀、无孔洞、无皱褶的膜将装有 CaCl₂ 的试管封口再用石蜡将其密封, 并将试管称重。将称重后的试管放入底部为去离子水的干燥器中(保持相对湿度 100%), 将干燥器放入 25 °C 隔水式恒温培养箱(纯水在 25 °C 时饱和水蒸气压为 3.167 1 kPa), 使膜内外两侧保持一定的蒸气压差。每隔 24 h 取出试管, 将其称重, 按式(3)计算水蒸气透过系数。

$$WVP = \frac{\Delta W \times T}{S \times t \times \Delta P}, \quad (3)$$

式中:

- WVP——水蒸气透过系数, g · mm/(m² · d · kPa);
- ΔP——水蒸气压差, kPa;
- T——膜厚, mm;
- ΔW——水增加量, g;
- t——时间, h;
- S——膜的面积, m²。

1.2.8 透明度的测定 根据文献[10], 修改如下: 将平衡后的膜裁剪成条状(12 mm × 40 mm), 将裁剪好的薄膜紧贴于比色皿(玻璃)外侧, 以空比色皿(玻璃)作对照, 在 460 nm 波长下测定其透光率, 以透光率的大小间接表示透明度。

1.2.9 阻氧性的测定 根据油脂过氧化值的大小, 来评价膜的阻氧性。在 250 mL 容器中加入 20.0 g 新鲜花生油, 用平衡后的膜覆盖瓶口并用石蜡密封, 将碘量瓶存放在 60 °C 培养箱中陈化 12 d, 根据 GB 5009.227—2016 方法, 测定花生油的过氧化值。过氧化值按式(4)计算。

$$POV = \frac{(V_1 - V_2) \times C \times 0.1269}{m} \times 100, \quad (4)$$

式中:

- POV——样品中过氧化值, g/100 g;
- V₁——样品消耗硫代硫酸钠标准溶液的体积, mL;
- V₂——空白试剂消耗硫酸钠标准溶液的体积, mL;
- C——硫代硫酸钠标准溶液的浓度, mol/L;
- m——待滴定样品的量, g。

1.2.10 阻油性的测定 根据透油系数的大小, 来评价膜的阻油性。取一只洁净干燥的试管, 加入 1.00 mL 新鲜花生油, 挑选完整均匀的膜将试管口封住并用高熔点石蜡密封, 将试管倒置于已称重的滤纸上。将试管连同倒置试管的滤纸放置在相对湿度为 50% 的恒湿箱中, 每隔 3 d 称重 1 次, 称量得出滤纸质量的变化, 称量至滤纸质量不

变为止。按式(5)计算透油系数。

$$P_0 = \frac{\Delta W \times F_T}{S \times T}, \quad (5)$$

式中:

- P₀——透油系数, g · mm/(cm² · d);
- ΔW——滤纸质量前后变化, g;
- F_T——膜厚度, mm;
- S——膜面积, m²;
- T——放置时间, d。

1.3 数据处理

试验均平行 3 次, 图像处理采用 Excel 软件, 数据统计分析采用 SPSS 19.0 软件, 并进行 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 改性成膜工艺优化

2.1.1 物料比(蛋白/糖)对玉米醇溶蛋白改性成膜的影响 由图 1 可知, 随着物料比的增加, 玉米醇溶蛋白—菊粉产物的接枝度增大, 抗拉强度也逐渐增强。当物料比为 10 : 1 (g/g) 时, 接枝度和抗拉强度均达到最高。说明玉米醇溶蛋白和菊粉分子接触碰撞几率逐渐增加, 反应机会增多, 接枝度增加, 使得改性后的分子结构发生改变^[11], 增加其抗拉强度。继续增加物料比, 接枝度和抗拉强度都下降, 可能是接枝部位的作用点被多余的物料包裹, 无法进行有效的糖基化反应^[12]。综合考虑选取最合适的物料比为 10 : 1 (g/g)。

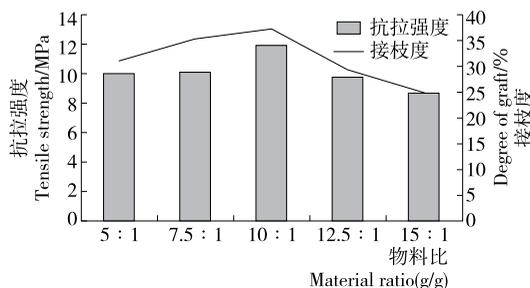


图 1 物料比对膜抗拉强度和接枝度的影响

Figure 1 Effect of different material ratio on tensile strength of film and degree of graft

2.1.2 pH 对玉米醇溶蛋白改性成膜的影响 由图 2 可知, 干法糖基化反应的最适 pH 值环境处于弱酸环境。当 pH 由 5 提高到 6 时, 其接枝度达到最高, 此时, 糖基化反应迅速, 糖与蛋白的接枝反应程度大大增加。随着 pH 值的继续增加, 玉米醇溶蛋白—菊粉产物的接枝度开始下降, 接枝反应达到平衡状态, 说明改性产物在碱性条件下, 会使蛋白质发生水解, 结构发生改变, 不利于糖基化反应的进行^[13]。而抗拉强度呈先升高后降低的趋势, 当体系处于 pH 6~7 时, 其抗拉强度达到最大值, 此时膜的韧性最佳, 继续增加体系的 pH 值, 会对糖基化反应不利,

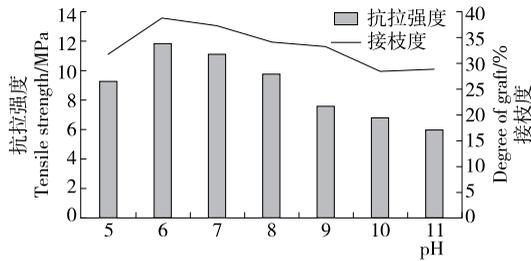


图2 糖基化反应溶液 pH 对膜抗拉强度和接枝度的影响

Figure 2 Effect of different pH on tensile strength of film and degree of graft

使膜的抗拉强度下降 50% 左右。因此选择 pH 6 的反应溶液作为改性体系。

2.1.3 反应时间对玉米醇溶蛋白改性成膜的影响 由图 3 可知,随着糖基化反应时间的增加,改性产物的抗拉强度和接枝度均呈先增后减的趋势,反应开始后,不断加热使蛋白质结构部分展开,多糖与蛋白质受热逐步接合,接枝度逐渐提高。当糖基化反应时间达到 36 h 时,接枝度达到最大值,膜的抗拉强度效果较好,如果再继续延长反应时间,会破坏蛋白质分子的一些赖氨酸,还会造成蛋白质分子伸展,使分子间的相互作用力增强,造成蛋白质凝聚和沉淀,而不利于接枝反应^[14]。综合考虑,选择糖基化反应时间为 36 h,此时的成膜效果和接枝度都相对较高。

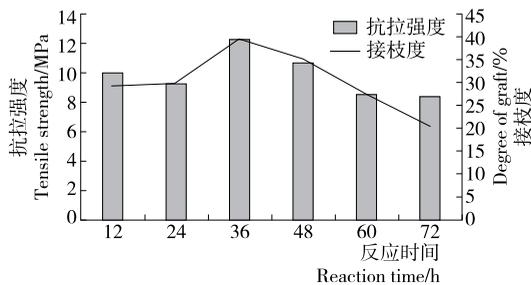


图3 糖基化反应时间对膜抗拉强度和接枝度的影响

Figure 3 Effect of different reaction time on tensile strength of film and degree of graft

2.1.4 正交试验设计 在单因素试验基础上,以物料比、pH、反应时间 3 个因素,采用正交试验进一步优化糖基化改性玉米醇溶蛋白成膜的工艺条件。正交试验因素水平表和结果分析如表 1、2 所示。

由表 2 可知,各因素对菊粉改性玉米醇溶蛋白的影响程度依次是 pH>物料比>加热时间,最佳成膜条件为物料比 10:1 (g/g),反应溶液 pH 6,反应时间 48 h,在此条件下制得玉米醇溶蛋白-菊粉共价交联膜的抗拉强度为 10.12 MPa,接枝率为 37.5%。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factor levels table of orthogonal experiment

水平	A 物料比(g/g)	B pH	C 反应时间/h
1	7.5 : 1	5	24
2	10 : 1	6	36
3	12.5 : 1	7	48

表 2 正交试验设计结果分析

Table 2 The result analysis of orthogonal experiment

序号	A	B	C	D 空列	TS/MPa
1	1	1	1	1	7.32
2	1	2	2	2	9.10
3	1	3	3	3	8.10
4	2	1	2	3	8.13
5	2	2	3	1	10.12
6	2	3	1	2	7.40
7	3	1	3	2	7.53
8	3	2	1	3	8.50
9	3	3	2	1	6.90
k_1	8.173	7.660	7.740	8.113	
k_2	8.550	9.240	8.043	8.010	
k_3	7.643	7.467	8.538	8.243	
R	0.907	1.773	0.843	0.233	

2.2 膜性能分析

水蒸气透过率是考察膜的透气性与膜扩散性的一个重要指标^[15]。由表 3 可知,纯玉米醇溶蛋白膜的水蒸气透过率优于改性后的膜,表明经菊粉糖基化改性能够有效改善原玉米醇溶蛋白膜的阻水性。可能是在糖基化反应的过程中形成的接枝产物中引入了一定量的多聚果糖,将玉米醇溶蛋白中所含的亲水氨基酸包裹,使膜的结构更加密实,有效地阻止其与水蒸汽接触^[16],该结果与孙琳琳等^[17]对脱脂豆粕膜水蒸气透过系数的测定数值相比有显著提高。另一方面,由于亲水性的糖分子会吸引水分子从而产生具有黏性且不会脱落的复合物,进一步阻隔水蒸气的进入,使水蒸气覆盖在膜的表面,降低了水蒸气透过率。

膜的透明度与原料自身颜色、膜液浓度和添加助剂的种类及含量有关^[18]。本研究结果表明,经菊粉改性后制备的膜较纯玉米醇溶蛋白膜透明度提高了 2 倍多,与文献^[19]结果一致,但透明度相对较低。另本研究后期主要应用于制备胶囊壳方面,胶囊在使用过程中为了防止内容物活性的降低,通常会添加遮光剂等,虽透光率较明胶胶囊略低,但仍符合使用规范。根据表 3 可以看出,改性后的玉米醇溶蛋白-菊粉膜的过氧化值与透油系数较改性前均有提高,说明糖基化改性可有效改善蛋白膜

表 3 膜性能检测结果[†]

Table 3 The testing result of film performance

性能指标	单位	玉米醇溶蛋白膜	玉米醇溶蛋白-菊粉膜
水蒸气透过系数	$\text{g} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa})$	4.39 ± 0.28^a	3.17 ± 0.25^b
透光率	%	7.47 ± 0.10^b	15.90 ± 0.55^a
过氧化值	$\text{g}/100 \text{g}$	2.147 ± 0.040^a	2.136 ± 0.090^b
透油系数	$\text{g} \cdot \text{mm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$	0.0153 ± 0.0100^a	0.0037 ± 0.0000^b

† 同行字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

的分子结构,使其内部结构更加紧密,阻碍氧分子或油脂分子的扩散,从而提高玉米醇溶蛋白膜的阻油性与阻氧性。

3 结论

本研究以玉米湿法生产淀粉的副产物——玉米醇溶蛋白为原料,探讨菊粉糖基化改性的成膜工艺,并在最优条件下对膜的基本性质进行测定。结果表明,改性蛋白膜的各项性能均优于纯玉米醇溶蛋白膜,尤其是解决了玉米醇溶蛋白膜质较脆的弊端,这一优良的性能可使其替代明胶制备的胶囊壳。

本研究采用的还原糖——菊粉,相比其他多糖虽功能性优异,但价格较高,后期研究中会筛选一些成本更低的多糖作为糖基化改性的羰基供体;此外,由于玉米醇溶蛋白膜在酸性条件下不溶,而溶于弱碱性或中性的溶液中,适宜制备肠溶胶囊壳,故后续将研究肠溶胶囊壳的制备及肠溶性的考察。

参考文献

- [1] 李秀明,陈野,王君子. PPC 对挤压成型 zein-PPC 复合薄膜性质的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(19): 3-10.
- [2] 姚晓敏,孙向军,卢杰. 可食性玉米醇溶蛋白成膜工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2002, 23(1): 20-23.
- [3] 张雪娜,任婷婷,左春艳,等. 可食性玉米醇溶蛋白膜的制备及其在食品保藏中的应用研究[J]. 粮食加工, 2012, 37(6): 34-37.
- [4] 崔和平,孙小红,郑慧,等. 甘油含量对玉米醇溶蛋白膜储藏稳定性的影响[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2014, 35(1): 46-50.
- [5] 李丹,崔凯. 食品蛋白质的改性技术[J]. 食品与发酵工业, 1999, 25(6): 58-62.
- [6] 史苏华. 米渣蛋白-卡拉胶糖基化改性及其价接枝物乳化性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011: 5-6.
- [7] 彭英云,郑清,张涛. 菊粉的功能与利用[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(10): 236-240.
- [8] 饶志娟,郑建仙,贾呈祥. 功能性食品基料-菊粉的研究进展[J]. 中国甜菜糖业, 2002(4): 26-30.
- [9] KATO A, SHIMOKAWA K, KOBAYASHI K. Improvement of the functional properties of insoluble gluten by pro-

nase digestion followed by dextran conjugation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1991, 39(6): 1053-1056.

- [10] 蔡花真,徐艳艳,李梦琴. 可食性复合蛋白成膜条件研究[J]. 包装与机械, 2010, 26(5): 112-113, 147.
- [11] 许彩虹,王金梅,姚玉静,等. 食品中蛋白质糖基化接枝的研究进展[J]. 现代食品科技, 2017, 33(8): 306-312, 261.
- [12] 张慧君,陈又铭,辛德慧,等. 麦芽糖浆糖基化改性玉米醇溶蛋白及在胶囊壳中的应用[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 29-35.
- [13] 孟祥勇,张慧恩,宋腾,等. 响应面法优化微波辅助米渣蛋白糖基化改性工艺[J]. 食品工业科技, 2018, 39(1): 156-161, 166.
- [14] 刘娟. 酪蛋白-葡聚糖接枝改性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 12-13.
- [15] 黄国平,杨晓泉. 玉米醇溶蛋白膜的降解性能和水蒸气透过率的研究[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(3): 22-23, 29.
- [16] 张雁飞,孟繁蓉,郭艺伟,等. 食品包装用卡拉胶-甲基纤维素膜的制备及表征[J]. 食品科技, 2017, 42(11): 62-66.
- [17] 孙琳琳,田波,岳莹,等. 茶多酚对脱脂豆粕膜性能及抗氧化性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 234-239.
- [18] 谢亚芬. BOPET 薄膜透明度影响因素及提高方法[J]. 塑料工业, 2005, 33(4): 64-66.
- [19] 王君,管艳君. 可食性大豆分离蛋白保鲜膜的研制[J]. 包装与食品机械, 2017, 35(3): 11-16.

(上接第 106 页)

- [7] 杜明英. 我国食品安全网络舆情预警研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 28-30.
- [8] 朱白,王瑞楠. 基于 FAHP 模型的高校网络舆情预警研究[J]. 商洛学院学报, 2018, 32(4): 93-96.
- [9] 王洋. 基于区间数的数控机床综合性能评价[J]. 工具技术, 2016, 50(1): 60-63.
- [10] 刘雅荣. 基于区间层次分析法的机械加工工艺方案评价研究[J]. 机械设计与制造, 2015(12): 258-260.
- [11] 李春强. 基于区间层次分析法的舰船动力系统方案评估研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(7): 124-127.
- [12] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 89.