

食品与饲料用化学品

甜玉米芯多糖纳米乳涂膜的制备及对水果的保鲜

王鑫^{1,2}, 罗钰¹, 修伟业¹, 遇世友¹,
周卓¹, 田梦甜¹, 马永强^{1*}

(1. 哈尔滨商业大学 食品工程学院, 黑龙江省谷物食品与谷物资源重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150028;
2. 黑龙江省林业科学院, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要: 以甜玉米芯多糖纳米乳和壳聚糖的冰乙酸溶液为原料, 以甘油、阿拉伯胶水溶液为增稠剂, 制成甜玉米芯多糖纳米乳涂膜(简称涂膜)。以涂膜拉伸强度为指标, 通过单因素实验和响应面实验得到最优配方, 即壳聚糖溶液质量浓度为10 g/L、阿拉伯胶水溶液质量浓度为150 g/L、壳聚糖溶液(10 mL)与阿拉伯胶水溶液的体积比1:2、甘油1.8 mL、甜玉米芯多糖纳米乳1.2 mL, 在该条件下制备的甜玉米芯多糖纳米乳涂膜拉伸强度为(92.37±2.07) kPa。将涂膜用于千禧果、金钱橘、葡萄的保鲜处理, 以水果的腐败率、失重率、颜色色差、多酚含量、可滴定酸含量、可溶性固形物含量为评价指标, 测定其保鲜效果。结果表明, 与未涂膜的水果相比, 涂膜处理的水果营养指标与感官指标均有更好的结果。主成分分析结果表明, PC1和PC2的累积方差贡献率为92.354%, 说明涂膜对水果保鲜有效。

关键词: 甜玉米芯多糖; 纳米乳; 壳聚糖; 涂膜保鲜; 水果保鲜; 食品用化学品

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1003-5214(2023)07-1520-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Preparation and fruit preservation performance of sweet corn cob polysaccharide nano emulsion coating

WANG Xin^{1,2}, LUO Yu¹, XIU Weiye¹, YU Shiyu¹, ZHOU Zhuo¹,
TIAN Mengtian¹, MA Yongqiang^{1*}

(1. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Cereal and Comprehensive Processing of Cereal Resources, College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, Heilongjiang, China; 2. Heilongjiang Academy of Forestry, Harbin 150081, Heilongjiang, China)

Abstract: Sweet corn cob polysaccharide nano emulsion coating was prepared from sweet corn cob polysaccharide nano emulsion and chitosan glacial acetic acid solution with glycerol and arabic gum aqueous solution used as thickeners. Under the optimized formula, which was obtained by single factor experiment and response surface experiment taking tensile strength of coating as index, of mass concentration 10 g/L chitosan glacial acetic acid solution, mass concentration 150 g/L arabic gum aqueous solution, $V(\text{chitosan glacial acetic acid solution } 10 \text{ mL}) : V(\text{arabic gum aqueous solution}) = 1 : 2$, 1.8 mL glycerol and 1.2 mL sweet corn cob polysaccharide nano emulsion, the coating exhibited a tensile strength of (92.37±2.07) kPa. When applied for the preservation of millennium fruit, kumquat and grape with the decay rate, weight loss rate, color difference, polyphenol content, titratable acid and soluble solids of fruits as evaluation indexes, the coating led to improvement in nutritional and sensory indicators. Data from principal component analysis showed that the cumulative variance contribution rate of PC1 and PC2 was 92.354%, indicating that the coating was effective for fruit preservation.

Key words: sweet corn cob polysaccharide; nano emulsion; chitosan; coating preservation; fruit preservation; food chemicals

收稿日期: 2022-11-04; 定用日期: 2023-01-07; DOI: 10.13550/j.jxhg.20221002

基金项目: 哈尔滨商业大学“青年创新人才”支持计划项目(2019CX31); 哈尔滨商业大学产业化项目(22CZ16)

作者简介: 王鑫(1984—), 女, 副教授。联系人: 马永强(1963—), 男, 教授, E-mail: qym126@163.com。

食品在运输、贮藏、销售、消费的过程中极易受到环境中的腐败菌、细菌等有害微生物的污染,造成食品的腐败、营养品质下降、色泽暗淡、食用后会引发食物中毒等食源性疾 病,严重者可能会造成死亡^[1-3]。这些问题促使人们必须研究食品的保鲜方法,从而推动了食品保鲜技术的不断发展。其中,水果的储藏期短、易腐烂等问题尤为突出,水果的保鲜技术研究也越来越重要。目前,常用的水果保鲜方法有:低温储藏、通风库储藏、机械制冷储藏、气调保鲜等,但这些方法所需成本较高,条件较为复杂,有的甚至会对环境造成污染^[4-6]。

涂膜保鲜技术是利用天然无毒的原料制成的涂膜液体进行水果的浸泡或喷涂的一种保鲜技术,涂膜使得水果与外界环境隔绝,减缓了水果的腐败和氧化,提高了产品的货架期。涂膜保鲜主要有两方面的原因:一是加入的功能性物质具有自身独特的生理生化活性;二是涂膜基质对加入的功能性物质的包被性及其所具有的独特性质^[7-9]。这种技术对环境无污染且成本低,操作简单,是一种安全与环保兼具的保鲜方法,是一种非常实用且值得推广的水果保鲜方法^[10]。现阶段,涂膜保鲜材料大致可分为四大类:多糖类^[11-13]、脂质类、蛋白类^[14-15]和复合基质。多糖类材料主要以壳聚糖、普鲁兰多糖等为涂膜基质,天然多糖类涂膜材料开发较少,研究表明,天然植物多糖具有较好的抑菌活性、抗氧化活性。因此,利用天然多糖的抗菌性^[16-17]、抗氧化性^[18]能在涂膜保鲜中发挥更好的作用。

甜玉米芯多糖是甜玉米芯中一种具有抑菌、抗氧化、降血糖等功效的活性物质^[19-21],但是单一的多糖溶液稳定性、机械性较差,采用纳米乳液包埋多糖,能避免大分子多糖的聚集,形成均一性、稳定性较好的乳液,更能有效地发挥其活性功能^[22-23]。

本研究以甜玉米芯为原料,先提取甜玉米芯多糖,然后以甜玉米芯多糖纳米乳和壳聚糖溶液(以冰乙酸为溶剂)为原料,以甘油、阿拉伯胶水溶液为增稠剂,制成甜玉米芯多糖纳米乳涂膜(简称涂膜),通过响应面法优化配方,得到涂膜液最佳制备条件;将涂膜液应用于千禧果、金钱橘、葡萄的保鲜研究,以主成分分析(PCA)方法对保鲜效果进行综合评价,为甜玉米芯多糖在水果涂膜保鲜方面的应用提供重要参考。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

甜玉米芯,昊伟农业有限公司;千禧果、金钱

橘、葡萄,市售;液体石蜡,天津市致远化学试剂有限公司;壳聚糖,上海蓝季科技发展有限公司;阿拉伯胶,上海化学试剂站分装厂;冰乙酸,天津市富宇精细化工有限公司;福林-酚试剂Ⅱ,天津市光复精细化工研究所;无水碳酸钠,天津市东丽区天大化学试剂厂;Tween80、Span80,山东优索化工科技有限公司;以上试剂均为分析纯。实验用水为蒸馏水。

79-1 磁力搅拌器,天津得利实验分析仪器制造厂;HWS-26 电热恒温水浴锅,上海一恒科学仪器有限公司;FJ200-SH 高速剪切机,上海沪析实业有限公司;KQ-250DE 超声清洗机,昆山市超声仪器有限公司;AF2011007 紫外分光光度计,上海元析仪器有限公司;107-0AB 电热鼓风干燥箱,天津泰斯特科学仪器有限公司;Nano-ZS90 激光粒度仪,英国马尔文仪器有限公司;FTIR-650 傅里叶变换红外光谱仪,天津市能谱科技有限公司;DHR-3 流变仪,美国 TA 仪器公司;CS-800 型分光测色仪,上海群弘仪器设备有限公司;WYA-2WAJ 阿贝折光仪,力辰科技有限公司;ME104E 分析天平,日本岛津公司;PHS-25-3C-3E-2F pH 计,上海雷磁仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 涂膜的制备

1.2.1.1 甜玉米芯多糖的制备

以甜玉米芯为原料,采用水提醇沉法^[24],经过干燥、粉碎、过筛、脱脂、水提、浓缩、脱蛋白、脱色、体积分数 80%乙醇醇沉,最后冷冻干燥得到甜玉米芯多糖。

1.2.1.2 甜玉米芯多糖纳米乳的制备

参考王鑫等^[25]研究采用自发乳化法制备甜玉米芯多糖纳米乳。分别将油相液体石蜡加入到混合表面活性剂(Tween 80 与 Span 80 质量比为 1:1)和助表面活性剂无水乙醇中,搅拌下三者充分混合均匀,再添加甜玉米芯多糖水溶液,同时用磁力搅拌器进行混合,甜玉米芯多糖水溶液加入后体系由澄清变得浑浊,混合均匀后体系再次澄清,即得甜玉米芯多糖纳米乳液,配方为 $m(\text{混合表面活性剂}):m(\text{无水乙醇}):m(\text{液体石蜡}):m(\text{质量分数为 1.5\% 的甜玉米芯多糖水溶液})=22.2:11.1:55.6:11.1$ 。

1.2.1.3 甜玉米芯多糖纳米乳涂膜的制备

参考杨志坤^[26]方法并稍作修改,将 0.1 g 壳聚糖溶于 10 mL 冰乙酸中,升温到 60 °C 搅拌 3 h,制成质量浓度为 10 g/L 的壳聚糖溶液,过滤除去杂质,加入 1 mL 甘油搅拌均匀后,室温静置除去气泡,备用。将 1.5 g 阿拉伯胶粉末溶于 10 mL 蒸馏水,在

40 °C下搅拌 2 h, 制得质量浓度为 150 g/L 的阿拉伯胶水溶液, 加入 1 mL 甘油, 搅拌均匀后, 室温静置, 备用。室温下, 将壳聚糖溶液 (10 mL) 与阿拉伯胶水溶液按照体积比 1 : 2 混合后, 再加入 1.2 mL 甜玉米芯多糖纳米乳, 以 10000 r/min 高速剪切 5 min, 再超声 (功率 100 W) 5 min 至完全除去气泡, 得到涂膜液, 室温下将涂膜液倒入硅胶模具中流延成膜后, 放入 40 °C 的烘箱中烘干, 即得涂膜干膜, 其成膜机理示意图如图 1 所示^[27]。

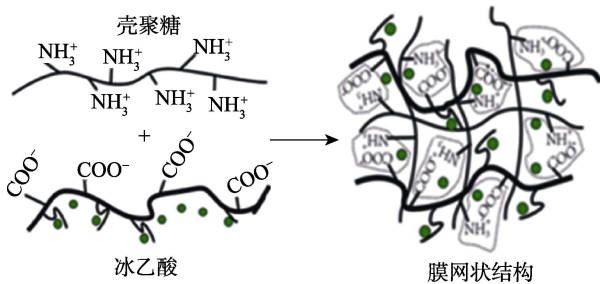


图 1 涂膜成膜机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coating formation mechanism

1.2.2 单因素实验设计

根据上述制备方法, 固定阿拉伯胶水溶液的质量浓度为 150 g/L、壳聚糖溶液与阿拉伯胶溶液的体积比为 1 : 2、增稠剂甘油 2 mL、甜玉米芯多糖纳米乳 1 mL, 分别考察壳聚糖溶液 (以冰乙酸为溶剂) 质量浓度分别为 5、10、20、30 和 40 g/L 对涂膜拉伸强度的影响; 固定壳聚糖溶液与阿拉伯胶水溶液的体积比为 1 : 2、增稠剂甘油 2 mL、甜玉米芯多糖纳米乳 1 mL、壳聚糖溶液质量浓度为 10 g/L, 考察阿拉伯胶水溶液质量浓度分别为 50、100、150、200、250 g/L 对涂膜拉伸强度的影响; 固定阿拉伯胶水溶液质量浓度为 150 g/L、增稠剂甘油 2 mL、壳聚糖溶液质量浓度为 10 g/L, 甜玉米芯多糖纳米乳 1.2 mL, 考察壳聚糖溶液与阿拉伯胶水溶液的体积比分别为 4 : 1、2 : 1、1 : 1、1 : 2、1 : 4 对涂膜拉伸强度的影响; 固定阿拉伯胶水溶液质量浓度为 150 g/L、壳聚糖溶液与阿拉伯胶水溶液体积比为 1 : 2、甜玉米芯多糖纳米乳为 1 mL、壳聚糖溶液质量浓度为 10 g/L, 考察增稠剂甘油用量分别为 0.6、1.2、1.8、2.4、3.0 mL 对涂膜拉伸强度的影响; 固定阿拉伯胶水溶液的质量浓度为 150 g/L、壳聚糖溶液与阿拉伯胶水溶液的体积比为 1 : 2、增稠剂甘油 2 mL、壳聚糖溶液质量浓度为 10 g/L, 考察甜玉米芯多糖纳米乳添加量分别为 0.6、1.2、1.8、2.4、3.0 mL 对涂膜拉伸强度的影响。

1.2.3 响应面实验设计

以上述单因素的实验结果为基础, 通过显著性

分析选出 4 个对涂膜性能影响最大的因素分别为壳聚糖溶液质量浓度、增塑剂阿拉伯胶水溶液质量浓度、壳聚糖溶液与阿拉伯胶水溶液体积比、甜玉米芯多糖纳米乳添加量, 响应值为涂膜拉伸强度, 响应面实验的因素与水平如表 1 所示。

表 1 响应面实验的因素与水平
Table 1 Response surface test factors and levels

因素	编码	水平		
		-1	0	1
壳聚糖溶液质量浓度/(g/L)	A	5	10	20
阿拉伯胶水溶液质量浓度/(g/L)	B	100	150	200
V(壳聚糖溶液) : V(阿拉伯胶水溶液)	C	1 : 1	1 : 2	1 : 4
甜玉米芯多糖纳米乳添加量/mL	D	0.6	1.2	1.8

1.2.4 甜玉米芯多糖纳米乳涂膜的性能测定

1.2.4.1 涂膜液的 pH 测定

将涂膜液置于室温下, 用 pH 计测定涂膜液的 pH, 重复实验 3 次。

1.2.4.2 涂膜液的粒径、PDI 和 Zeta 电位测定

取 1 mL 涂膜液用超纯水稀释 50 倍, 在室温下使用激光粒度仪测定复合涂膜的平均粒径、PDI 和 Zeta 电位。

1.2.4.3 涂膜的红外光谱测定

用 KBr 压片法在傅里叶变换红外光谱仪上测定壳聚糖、阿拉伯胶、甜玉米芯多糖、甜玉米芯多糖纳米乳涂膜的红外光谱。波数范围为 4000~500 cm⁻¹, 分辨率为 4 cm⁻¹。

1.2.4.4 涂膜的水蒸气透过率测定

在 50 mL 容量瓶中注入一定量水, 用涂膜将瓶口密封并称量, 每 2 d 称重 1 次。水蒸气透过率 (W) 按下式计算:

$$W/\% = \frac{(m_i - m_{i-1})}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

式中: m_i 为第 i 次所测得体系质量, g; m_{i-1} 为第 $i-1$ 次测得体系质量, g。

1.2.4.5 涂膜拉伸强度测定

将涂膜裁成 2.00 cm×6.00 cm×0.10 cm 的长条, 用透析袋夹子夹住涂膜两端, 夹距为 8.00 cm。一端固定在垂直的标尺上, 另一端勾住已知质量的食物袋不断向该食物袋加水, 以差减法测得涂膜断裂时食物袋总质量, 即断裂时的拉力 (F) 大小, 并按下式计算膜的拉伸强度 (T), 同时记录膜断裂时长度。

$$T = \frac{F}{S} \times 1000 \quad (2)$$

式中: T 为试样的拉伸强度, kPa; F 为试样断裂时的拉力, N; S 为试样的截面积, mm²。

1.2.5 甜玉米芯多糖纳米乳涂膜对水果保鲜实验

按 1.2.1.3 节步骤制得涂膜液。然后,用次氯酸钠水溶液(质量分数为 0.02%)分别洗涤干禧果、金钱橘、葡萄 2 min,然后用蒸馏水冲洗并在室温下风干 1 h。干燥后,将每种水果随机等分为 2 组,每组 30 个,1 组完全浸泡在涂膜液中 4 min,另 1 组仅用蒸馏水洗涤用作对照,将样品放在聚乙烯薄膜上,并在(25±1) °C 下风干。将风干后样品装到 500 cm³ 的聚丙烯保鲜盒中,并用 10 μm 厚的聚乙烯薄膜封口,以保持相对湿度约为 90%,并在薄膜上开了 5 个直径为 8 mm 的孔,于 4 °C 恒温保鲜柜下贮藏。在贮藏第 0、4、8 和 12 d 时,对不同处理的样品进行综合品质和营养品质指标的测定。

1.2.6 水果综合品质指标的测定

1.2.6.1 腐败率的测定

分别在贮藏第 0、4、8 和 12 d 测定果实的腐败率。根据可见的病变和受伤部位的软化情况考虑水果是否腐败。所有处理组的水果腐败率按下式计算:

$$\text{腐败率}/\% = \frac{\text{腐败果数}}{\text{水果总数}} \times 100 \quad (3)$$

1.2.6.2 失重率的测定

用分析天平称量样品的质量,失重率为贮藏后果实失去质量占新鲜果实质量的百分数。

1.2.6.3 颜色的测定

采用分光测色仪进行测定,使用黑色、白色标准版校准色差。将清洗干净并干燥的水果置于光源处进行 3 次平行测量,记录仪器显示的数值(L^* 、 a^* 、 b^*)。其中, L^* 为亮度,刻度从 0~100(黑色到白色), ΔL^* 值为所测样品与原果汁染色样品间的亮度差, ΔL^* 值越大说明亮度越高; a^* 代表红绿值的饱和度, Δa^* 值为所测物体与标准白板间的 a^* 值差,+ Δa^* 方向红度加强,- Δa^* 方向绿度加强,零代表灰色; b^* 代表黄蓝值的饱和度, Δb^* 值为所测物体与标准白板间的 b^* 值差,+ Δb^* 方向黄度增加,- Δb^* 方向蓝度增加,零代表灰色;分别针对 L^* 、 a^* 、 b^* 及色差进行染色效果的色差分析,其中色差(ΔE_{ab}^*)计算公式为:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

1.2.7 水果营养品质的测定

1.2.7.1 多酚含量的测定

分别精确吸取质量浓度为 100 mg/L 的没食子酸标准溶液 1、2、3、4、5、6、7、8 mL 加入 25 mL 比色管中,加入 2 mL 福林-酚试剂,5 mL 质量分数为 20% 碳酸钠水溶液,用无水乙醇稀释至刻度后,于 40 °C 水浴加热 30 min,在 765 nm 处测定溶液的

吸光度值。以没食子酸质量浓度为横坐标(ρ)、吸光度(A)为纵坐标绘制没食子酸标准曲线。用不加样品的溶液调零,其余操作步骤同上。

将 2 g 水果研磨成汁,用蒸馏水稀释 10 倍后,准确量取 4 mL 水果稀释液加入 25 mL 比色管中,加入 2 mL 福林-酚试剂,5 mL 质量分数为 20% 的碳酸钠水溶液,用无水乙醇稀释至刻度后,40 °C 水浴加热 30 min,于 765 nm 处测定溶液的吸光度值,并根据标准曲线方程得到总多酚质量浓度,按公式(5)计算总多酚含量(mg/100 g)。

$$\text{总多酚含量} = \frac{\rho \times n \times V}{m} \times 100 \quad (5)$$

式中: ρ 为待测液中总多酚质量浓度,g/L; n 为稀释倍数; V 为水果稀释液体积,mL; m 为水果质量,g。

1.2.7.2 可溶性固形物含量的测定

将 2 g 水果研磨成汁,室温下用阿贝折光仪测量果实贮藏第 0、4、8 和 12 d 时的总可溶性固形物(TSS)含量。

1.2.7.3 可滴定酸含量的测定

将 2 g 水果研磨成汁,取 2 mL 果汁加入纯水定容至 50 mL,加入 0.20 g 活性炭,旋涡混合 10 min,用滤纸过滤。取 20 mL 上清液,加入 2 滴质量浓度为 1 g/L 酚酞后,用 0.01 mol/L NaOH 标准溶液滴定至微红色,30 s 不褪色,记录 NaOH 用量。根据 NaOH 消耗量按公式(6)计算出可滴定酸含量。

$$\text{可滴定酸含量}/\% = \frac{V \times C \times V_1 \times f}{V_s \times m} \times 100 \quad (6)$$

式中: V 为样品提取液总体积,mL; V_s 为滴定时所取滤液体积,mL; V_1 为 NaOH 滴定液体积,mL; C 为 NaOH 滴定液浓度,mol/L; m 为水果质量,g; f 为折算系数,g/mmol(干禧果 f 值取 0.067,金钱橘 f 值取 0.064,葡萄 f 值取 0.075)。

1.2.8 水果外观品质和感官测定

将贮藏前期(0 d)和贮藏结束(12 d)时的各组水果样品放置于带光源的光箱内,用数码相机拍摄其表现照片。感官测定中,在贮藏结束后,任意选取水果样品按色泽、软硬度、风味及果实外观进行分级打分(共 9 分,划分为 3 个级别:不可接受为 1~3 分,一般接受为 4~6 分,乐意接受为 7~9 分)。

1.3 数据处理

所有实验进行 3 次平行处理,结果均以平均值±标准差表示,采用 Design-Expert 8.0 完成响应面实验数据处理,采用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 甜玉米芯多糖纳米乳涂膜的制备工艺优化

2.1.1 单因素实验结果分析

图 2 为 1.2.2 节条件下单因素实验结果。从图 2 可以看出,当壳聚糖溶液质量浓度为 10 g/L 时,涂膜的拉伸强度达到最大值,随后随着壳聚糖溶液质量浓度的增加,涂膜的拉伸强度逐渐减小(图 2a)。当阿拉伯胶水溶液质量浓度为 150 g/L 时,涂膜的拉伸强度最好,这是因为阿拉伯胶水溶液浓度过小时会导致涂膜的增塑性较差,而浓度过大会导致涂膜的脆性较大而不易拉伸(图 2b)。当壳聚糖溶液与阿拉伯胶水溶液的体积比为 1:2 时,涂膜的拉伸强度最好,可能因为壳聚糖溶液较多会使涂膜黏性较大,拉伸强度较差(图 2c)。当甘油添加量为 1.8 mL 时,涂膜拉伸强度较好,适量的甘油具有较好的增塑性,可以改善膜的拉伸性能(图 2d)。当甜玉米芯多糖纳米乳添加量为 1.2 mL 时,涂膜的拉伸效果最好(图 2e)。

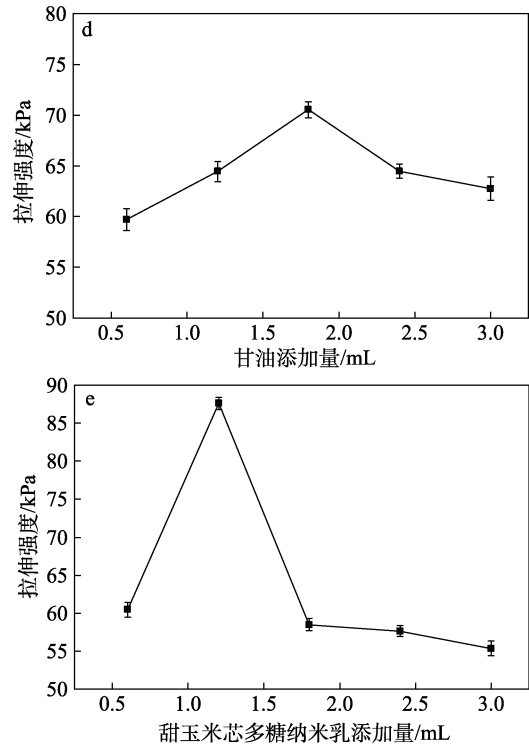
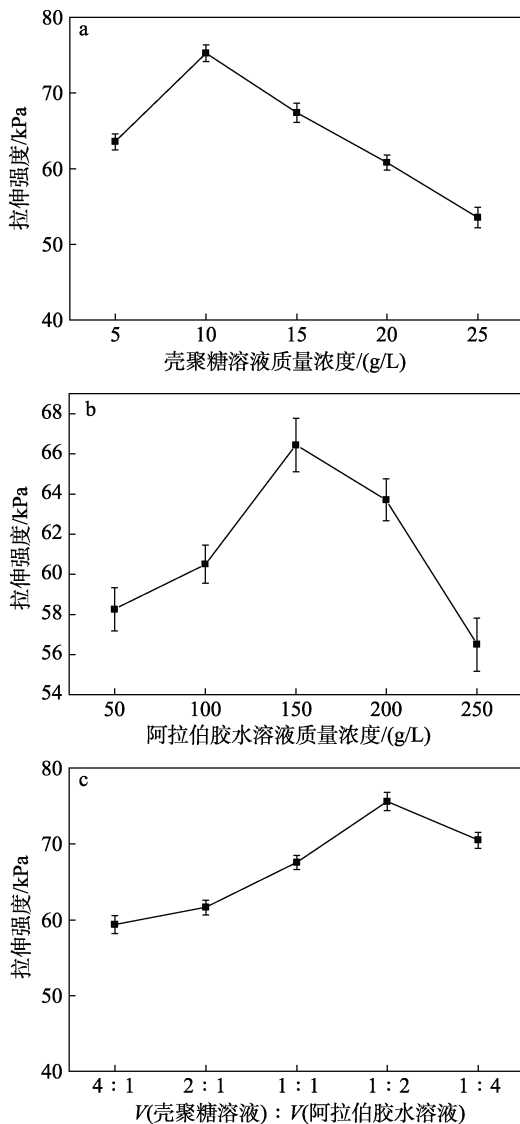


图 2 单因素实验结果

Fig. 2 Single factor experimental results

通过单因素实验得到的最佳条件为:壳聚糖溶液质量浓度为 10 g/L,阿拉伯胶水溶液质量浓度为 150 g/L,壳聚糖溶液与阿拉伯胶水溶液的体积比为 1:2,甘油添加量为 1.8 mL,甜玉米芯多糖纳米乳添加量为 1.2 mL。

2.1.2 响应面实验结果分析

根据 1.2.3 节进行响应面实验,实验结果见表 2,方差分析见表 3。将得到的拉伸强度用 Design-Expert 8.0 软件进行拟合,可得多元回归方程为:

$$Y=91.91+1.97A+0.63B+4.08C-1.07D-0.64AB+0.93AC+0.74AD+0.78BC+2.07BD-1.18CD-5.51A^2-6.29B^2-3.99C^2-3.80D^2$$

由表 3 可知,模型 $p=0.0190 < 0.05$, 方程达到了显著水平;失拟项 $p=0.1548 > 0.05$, 失拟不显著; $R^2=0.9611$, 表明该模型的真实值与预测值之间具有较高的相关性。4 个因素对涂膜拉伸强度的影响分析结果表明,一次项 C 对拉伸强度有极显著影响, A^2 和 B^2 对拉伸强度影响极显著,交互项 AB 、 BD 以及 C^2 、 D^2 对拉伸强度影响显著。用该模型进行合理预测,结果表明,4 个因素对拉伸强度的影响顺序由大到小依次为 C (壳聚糖溶液与阿拉伯胶水溶液的体积比) $> A$ (壳聚糖溶液质量浓度) $> D$ (甜玉米芯多糖纳米乳的添加量) $> B$ (阿拉伯胶水溶液质量浓度)。

表 2 响应面实验设计与结果

Table 2 Response surface test design and results

序号	A 壳聚糖溶液质量浓度	B 阿拉伯胶水溶液质量浓度	C V(壳聚糖溶液): V(阿拉伯胶水溶液)	D 甜玉米芯多糖纳米乳添加量	拉伸强度/kPa
1	0	-1	0	-1	89.91
2	1	0	0	-1	85.72
3	0	0	0	0	94.71
4	0	-1	1	0	82.92
5	0	0	0	0	89.21
6	1	0	-1	0	82.37
7	0	0	-1	1	78.51
8	0	0	1	-1	89.57
9	0	-1	0	1	76.32
10	1	1	0	0	78.39
11	-1	0	0	-1	78.05
12	-1	1	0	0	80.24
13	-1	0	-1	0	81.01
14	1	-1	0	0	78.73
15	1	0	1	0	88.61
16	0	0	-1	-1	74.13
17	0	1	-1	0	78.38
18	0	0	0	0	90.69
19	0	1	0	-1	86.10
20	1	0	0	1	88.24
21	0	-1	-1	0	77.45
22	0	0	0	0	90.22
23	-1	0	1	0	83.54
24	0	1	1	0	86.98
25	0	0	0	0	90.72
26	-1	-1	0	0	78.04
27	-1	0	0	1	77.59
28	0	1	0	1	80.80
29	0	0	1	1	89.22

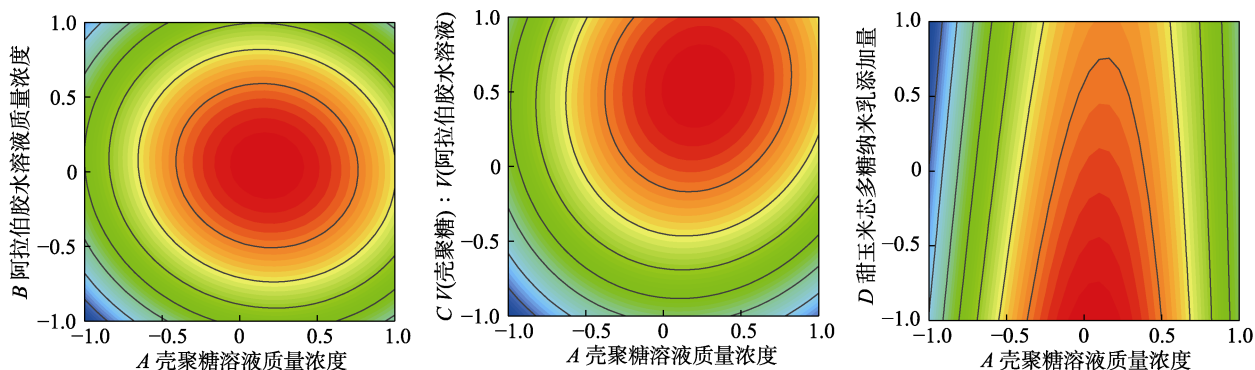
表 3 方差分析

Table 3 Variance analysis

来源	系数估值	标准误差	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型			728.90	14	52.06	3.19	0.0190	*
常数项	91.91	1.81						
A	1.97	1.17	46.38	1	46.38	2.84	0.1142	
B	0.63	1.17	4.72	1	4.72	0.29	0.5995	
C	4.08	1.17	200.09	1	200.09	12.25	0.0035	**
D	-1.07	1.17	13.65	1	13.65	0.84	0.3762	
AB	-0.64	2.02	1.62	1	1.62	0.10	0.0472	*
AC	0.93	2.02	3.44	1	3.44	0.21	0.6532	
AD	0.74	2.02	2.21	1	2.21	0.13	0.7188	
BC	0.78	2.02	2.44	1	2.44	0.15	0.7051	
BD	2.07	2.02	17.17	1	17.17	1.05	0.0227	*
CD	-1.18	2.02	5.61	1	5.61	0.34	0.5673	
A ²	-5.51	1.59	196.78	1	196.78	12.04	0.0038	**
B ²	-6.29	1.59	256.55	1	256.55	15.70	0.0014	**
C ²	-3.99	1.59	103.17	1	103.17	6.31	0.0248	*
D ²	-3.80	1.59	93.77	1	93.77	5.74	0.0311	*
残差			228.75	14	16.34			
失拟项			201.39	10	20.14	2.94	0.1548	不显著
纯误差			27.36	4	6.84			
总和			957.65	28				

注：“*”表示差异显著， $p < 0.05$ ；“**”表示差异极显著， $p < 0.01$ 。

3D 响应面和等高线图显示出了不同变量之间的相互影响作用。其中，AB、AC、AD、BC、BD、CD 的交互作用对拉伸强度的影响如图 3 所示。从图 3 可以看出，等高线图均呈现出较为明显的椭圆形，且椭圆的中心都在图中，说明涂膜的拉伸强度在选定的范围内有最优结果。预测出最优的成膜工艺条件为：壳聚糖溶液与阿拉伯胶水溶液的体积比为 1 : 2、壳聚糖溶液质量浓度为 10 g/L、甜玉米芯多糖纳米乳添加量为 1.2 mL、阿拉伯胶水溶液的质量浓度为 150 g/L，在此工艺下涂膜拉伸强度最大，理论值为 91.91 kPa。



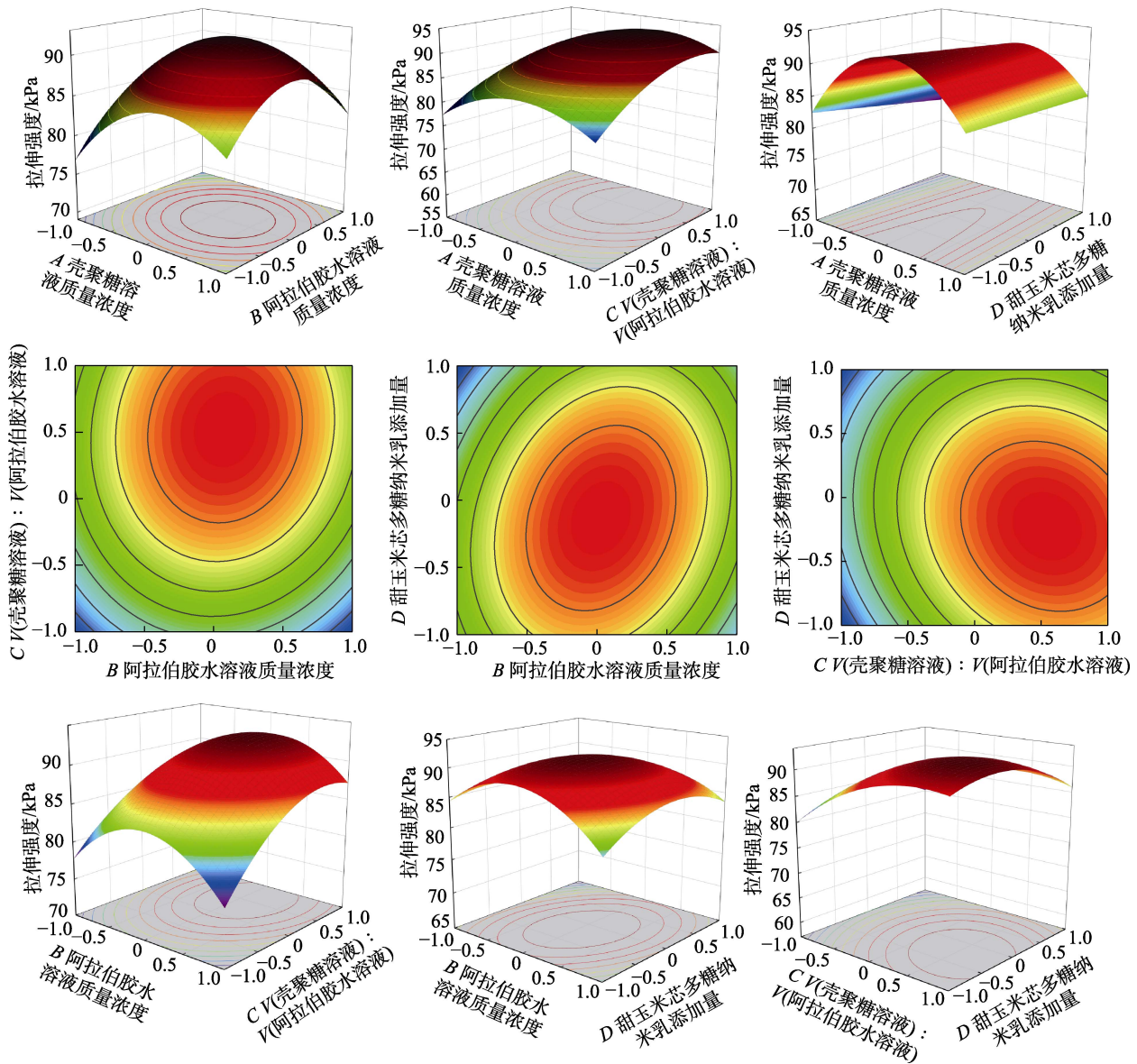


图 3 两因素间交互作用对涂膜拉伸强度影响的等高线图和响应面图

Fig. 3 Contour diagrams and response surface diagrams of the effect of interaction between two factors on tensile strength of coating films

将最佳的预测工艺条件修正后得到最佳制备条件为壳聚糖溶液与阿拉伯胶水溶液的体积比为 1 : 2、壳聚糖溶液质量浓度为 10 g/L、甜玉米芯多糖纳米乳添加量为 1.2 mL、阿拉伯胶水溶液质量浓度为 150 g/L、甘油添加量为 1.8 mL，在此条件下制备的涂膜拉伸强度为 (92.37±2.07) kPa，与预测值相比差 0.50%。采用响应面优化后的涂膜制备工艺可行，具有可操作性。

2.2 甜玉米芯多糖纳米乳涂膜性能分析

2.2.1 涂膜液的理化特性

涂膜液的 pH、Zeta 电位、粒径、PDI 对整个体系的稳定性都有一定的影响。甜玉米芯多糖纳米乳涂膜的 pH、Zeta 电位、粒径和 PDI 数据如表 4 所示。从表 4 可以看出，涂膜的 pH 为 2.7±0.5，研究表明，

当壳聚糖与阿拉伯胶复合体系的 pH 为 3.50~5.00 时，所得的复合体系最稳定^[28-29]。所测的 pH 较低是因为所制备的壳聚糖溶液中含有的乙酸降低了溶液的 pH。Zeta 电位为 (-14.73±0.91) mV，这是因为壳聚糖分子的氨基具有正电荷，而阿拉伯胶分子中含有的羧基具有负的 Zeta 电位，电位的降低是因为壳聚糖与阿拉伯胶分子之间的相反电荷发生相互作用引起的。涂膜的粒径为 (41.00±0.56) nm，一般来说，粒径越小形成的体系稳定性越好，并且涂抹于水果表面时会有更好的阻隔效果。粒径越小，涂膜的单位表面体积越大，从而增大了和外界微生物的接触面积，增强了抗菌效果。涂膜的 PDI 为 0.451±0.003，说明涂膜液分布均匀，是均一的混合体系。

表 4 涂膜液的 pH、Zeta 电位、粒径和 PDI
Table 4 pH, Zeta potential, particle size and PDI of nanoemulsion coating

样品	pH	Zeta 电位/mV	粒径/nm	PDI
甜玉米芯多糖 纳米乳涂膜	2.7±0.5	-14.73±0.91	41.00±0.56	0.451±0.003

2.2.2 涂膜的红外光谱分析

原料及涂膜的红外光谱见图 4。从图 4 可以看出, 制备的甜玉米芯多糖纳米乳涂膜与甜玉米芯多糖有相似的官能团和化学键, 整体的趋势变化不明显; 3425 和 2933 cm^{-1} 处分别是 O—H 和 C—H 的特征吸收峰; 可以明显观察到涂膜在 3425 cm^{-1} 处的峰强度明显增加, 说明涂膜中羟基的数量增多; 1636 和 1442 cm^{-1} 处分别是 C=O 键和 C—O 键的特征吸收峰; 1153 cm^{-1} 处是 β -型糖苷键的特征吸收峰^[30], 说明涂膜很大程度保留了原糖的结构。

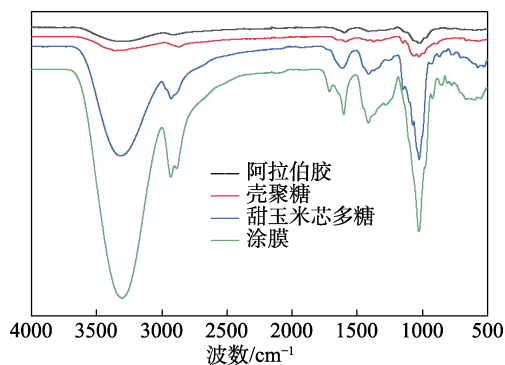


图 4 涂膜的 FTIR 谱图
Fig. 4 FTIR spectra of coating

2.2.3 涂膜的水蒸气透过率分析

将最佳工艺制备的涂膜进行水蒸气透过率测定, 结果如图 5 所示。

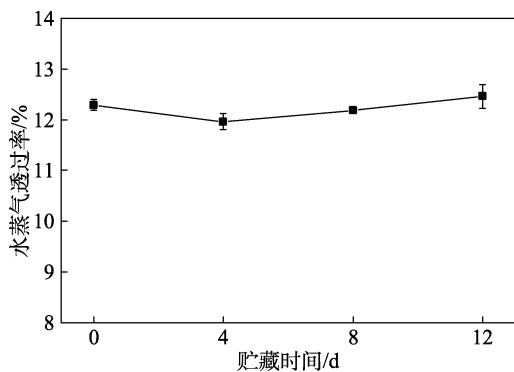


图 5 贮藏时间对涂膜水蒸气透过率的影响
Fig. 5 Effect of storage time on water vapor permeability of coating

图 5 结果显示, 所制备涂膜的水蒸气透过率较为稳定, 不会随静置时间的变化而产生较大变化,

这与涂膜中形成的交联网状结构孔隙的大小有关^[31]。说明涂膜的水蒸气透过率性能较稳定, 受外界环境影响较小。

2.3 甜玉米芯多糖纳米乳涂膜对水果的保鲜效果

2.3.1 涂膜对水果腐败率的影响

贮藏时间对水果腐败率的影响见表 5。从表 5 可以看出, 千禧果、金钱橘、葡萄 3 种水果的腐败率都随着贮藏时间的增加而逐渐增加, 在第 0~4 d 时涂膜组与空白组的腐败率差异并不明显, 但在第 4~12 d, 未涂膜组的水果的腐败率明显高于涂膜组的水果。这是因为, 涂膜基质在水果表层形成了一个保护层, 可以有效隔离外界空气和微生物对水果的侵袭, 并且涂膜中存在甜玉米芯多糖, 天然的抗菌物质可以进一步改善水果的腐败状况^[32]。

表 5 贮藏时间对水果腐败率的影响
Table 5 Effect of storage time on fruit spoilage rate

	腐败率/%			
	第 0 d	第 4 d	第 8 d	第 12 d
千禧果涂膜组	0	3	7	10
千禧果未涂膜组	0	7	13	20
金钱橘涂膜组	0	6	11	13
金钱橘未涂膜组	0	10	13	20
葡萄涂膜组	0	10	17	23
葡萄未涂膜组	0	13	20	31

2.3.2 涂膜对水果失重率的影响

贮藏时间对水果失重率的影响见表 6。从表 6 可以看出, 所有水果在贮藏过程中的失重率都逐渐升高, 主要原因是内部的水分不断向外界迁移。与未涂膜组的水果相比, 涂膜组水果的失重率相对较小, 这是因为, 涂膜形成了控制水蒸气进出的一层屏障, 从而延迟了水果水分的损失。

表 6 贮藏时间对水果失重率的影响
Table 6 Effect of storage time on fruit weight loss

	失重率/%			
	第 0 d	第 4 d	第 8 d	第 12 d
千禧果涂膜组	0	3.90±0.99	6.00±0.91	7.70±1.19
千禧果未涂膜组	0	4.50±0.53	7.20±0.82	9.40±0.73
金钱橘涂膜组	0	2.70±0.81	4.70±0.54	5.90±0.34
金钱橘未涂膜组	0	2.90±0.63	5.30±0.77	6.90±0.52
葡萄涂膜组	0	2.10±0.80	4.20±0.61	5.50±0.75
葡萄未涂膜组	0	2.40±0.72	4.90±0.89	6.90±0.38

2.3.3 涂膜对水果颜色的影响

水果颜色是评价水果品质的重要指标, 通过分

光测色仪分别测出水果的 L^* 、 a^* 、 b^* 的变化, 通过公式 (4) 计算出不同水果的 ΔE_{ab}^* , 结果如表 7 所示。从表 7 可以看出, 涂膜组的水果在整个贮藏过程中 ΔE_{ab}^* 值变化幅度较小, 说明水果整体的颜色较最初无明显差别, 而未涂膜组的水果 ΔE_{ab}^* 值显著增加, 说明水果颜色变化较大, 这是因为涂膜组水果表面涂层的透氧率较低, 抑制了水果发生褐变等颜色的变化, 能够较好地保持水果的品质^[33]。

表 7 贮藏时间对水果颜色色差的影响

Table 7 Effect of storage time on color difference of fruit

	ΔE_{ab}^*			
	第 0 d	第 4 d	第 8 d	第 12 d
千禧果涂膜组	0	0.94±0.08	1.75±0.31	2.35±0.19
千禧果未涂膜组	0	1.65±0.08	2.77±0.32	3.61±0.43
金钱橘涂膜组	0	0.78±0.01	2.49±0.14	2.97±0.34
金钱橘未涂膜组	0	0.51±0.05	6.96±0.54	13.68±0.34
葡萄涂膜组	0	0.94±0.06	1.52±0.11	2.11±0.25
葡萄未涂膜组	0	0.98±0.03	2.56±0.15	3.60±0.38

2.3.4 涂膜对水果中多酚含量的影响

将测出的样品吸光度代入标准方程: $y=0.0984x+0.2634$ ($R^2=0.9980$) 中, 得到样品中多酚质量浓度, 并计算出多酚含量。图 6 为不同组水果中多酚含量的变化。从图 6 可以看出, 在贮藏过程中, 水果中的多酚含量在第 4 d 略微增高, 在第 4~12 d 减少, 但可看出, 涂膜组的水果中多酚含量较未涂膜组含量高。MURMU 等^[34]发现, 水果中多酚含量的下降可能是因为多酚作为褐变反应中多酚氧化酶的底物而被消耗了。涂膜中含有的抗氧化成分可以降低多酚氧化酶的活性, 从而减少了多酚的消耗。

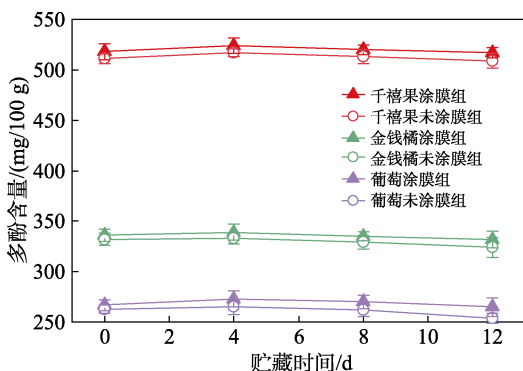


图 6 贮藏时间对水果中多酚含量的影响

Fig. 6 Effect of storage time on polyphenol content in fruits

2.3.5 涂膜对水果中 TSS 含量的影响

图 7 为贮藏时间对水果中 TSS 含量的影响。从图 7 可以看出, 水果在储藏过程中 TSS 含量均有所

增加, 而涂膜组的水果增长趋势不太明显。张福平^[35]认为, 水果在储藏初期淀粉、蛋白质等营养物质分解转化成糖类可溶性物质, 促使 TSS 含量的上升, 第 12 d 未涂膜组的千禧果、金钱橘、葡萄的 TSS 含量与新鲜水果相比分别增长了 2.50%、2.09%、2.53%, 而涂膜组的 TSS 含量与新鲜水果相比分别增长了 1.12%、1.09%、1.33%, 说明涂膜处理可以减少贮藏过程中水果中营养物质的损耗, 减少 TSS 含量的上升。

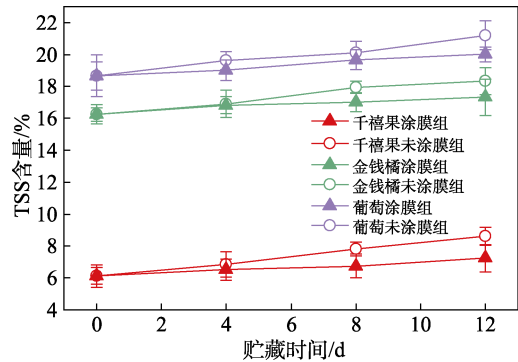


图 7 贮藏时间对水果中 TSS 含量的影响

Fig. 7 Effect of storage time on TSS content in fruits

2.3.6 涂膜对水果中可滴定酸含量的影响

水果中的可滴定酸含量是影响水果品质的一个重要指标, 反映了水果中的营养物质被分解消耗的速率。图 8 是水果中可滴定酸含量的变化曲线。从图 8 可明显看出, 未涂膜组的水果中可滴定酸含量下降速率最快, 可能是由于水果的呼吸作用而使得营养成分被消耗。涂膜组中可滴定酸含量下降较慢, 是因为涂膜处理有效抑制了水果的呼吸作用, 使得营养物质损耗较少^[36]。

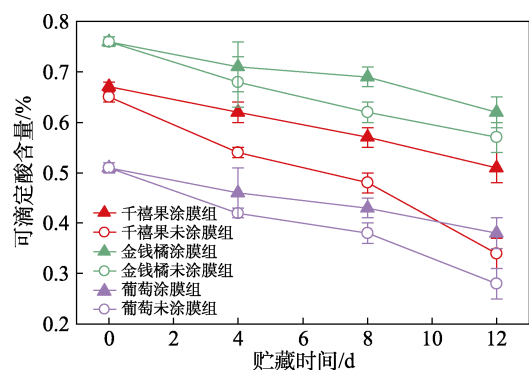


图 8 贮藏时间对水果中可滴定酸含量的影响

Fig. 8 Effect of storage time on titratable acid content in fruits

2.4 涂膜保鲜效果主成分分析 (PCA)

2.4.1 各指标均一化处理 and 主成分提取

为了综合评价涂膜液对千禧果、金钱橘、葡萄 3 种不同水果的保鲜效果, 将以上的 6 个指标进行

PCA 分析。首先, 对 6 个指标值进行均一化处理, $X = (\text{原始值} - \text{平均值}) / \text{标准偏差}$, 这样消除了不同指标间不同单位及量纲的影响。均一化处理后的数据如表 8 所示。将 6 个指标划分为若干主成分, 表 9 为主成分特征值和累积方差贡献率。从表 9 可以选择出特征值 ≥ 1 , 且方差贡献率较大的两个成分, 主成分 1 (PC1) 的特征值为 4.851, 方差贡献率为 80.857%, 主成分 2 (PC2) 的特征值为 1.690, 方差贡献率为 11.497%, 这两个成分代表了 6 个指标 92.354% 的信息, 能较好地反映各项指标值的总体变化趋势。

表 8 各指标均一化后数据
Table 8 Data of each index after homogenization

分组	时 间/d	腐败 率(1)	失重 率(2)	色差 (3)	多酚 含量(4)	TSS 含量(5)	可滴 定酸 含量(6)
千禧果 涂膜组	0	-1.14	-1.33	-1.72	-0.57	-1.15	1.13
	4	-0.45	-0.15	-0.66	1.37	-0.30	0.43
	8	0.45	0.48	0.06	0.08	0.19	-0.29
	12	1.14	0.99	0.60	-0.89	1.23	-1.14
千禧果 未涂膜组	0	-1.17	-1.30	-1.24	-0.44	-1.13	1.14
	4	-0.35	-0.19	-0.32	1.32	-0.46	0.31
	8	0.35	0.48	0.50	0.15	0.42	-0.15
	12	1.17	1.02	1.06	-1.02	1.16	-1.23
金钱橘 涂膜组	0	-1.35	-1.22	-2.66	0.17	-1.34	1.12
	4	-0.09	-0.35	-0.99	1.21	-0.05	0.26
	8	0.45	0.52	-0.02	-0.17	0.34	-0.09
	12	0.85	1.06	1.01	-1.21	1.04	-1.29
金钱橘 未涂膜组	0	-1.29	-1.18	-2.03	0.62	-1.16	1.25
	4	-0.09	-0.38	-1.29	0.87	-0.47	0.28
	8	0.27	0.45	-0.09	-0.12	0.61	-0.46
	12	1.11	1.12	0.70	-1.36	1.02	-1.07
葡萄 涂膜组	0	-1.26	-1.29	-1.76	-0.50	-1.09	1.19
	4	-0.25	-0.23	-1.29	1.21	-0.55	0.28
	8	0.46	0.48	0.45	0.36	0.55	-0.28
	12	1.06	1.03	0.84	-1.07	1.09	-1.19
葡萄 未涂膜组	0	-1.20	-1.24	-0.41	0.41	-1.17	1.18
	4	-0.25	-0.30	-1.39	0.83	-0.28	0.24
	8	0.25	0.47	2.74	0.21	0.21	-0.18
	12	1.20	1.07	7.05	-1.45	1.23	-1.23

表 9 主成分特征值和累积方差贡献率

Table 9 Principal component eigenvalues and cumulative variance contribution rate

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	4.851	80.857	80.857
2	1.690	11.497	92.354
3	0.412	6.871	99.225
4	0.016	0.275	99.499
5	0.016	0.269	99.768
6	0.014	0.232	100.000

2.4.2 基于 PCA 品质指标变化

经过主成分的分析与提取, PC1 和 PC2 的累积方差贡献率为 92.354%, 这显示了主要的变异来自于 PC1 和 PC2。根据其余的指标在这两个成分上所得的分数可以绘制一个二维的散点图, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 失重率、腐败率、TSS 含量、色差都在 PC1 的 [0~4] 区间, 说明这 4 个指标和 PC1 呈现正相关。失重率、腐败率、TSS 含量的载荷相近, 表明这 3 个指标彼此有两两协同的作用; 多酚含量在 PC2 的 [0~2] 区间, 说明该指标和 PC2 呈正相关, 此结果与尹青春等^[37]制备的莲雾涂膜类似。

从图 9 也可以看出, 3 种不同水果映射到其中的指标分数, 在第 0 d 时, 3 种水果的得分大都聚集在 PC2 的 [-2~0] 区间; 在第 8 d 和第 12 d 时, 未涂膜组的水果与涂膜组在外观品质上有明显差别, 并且未涂膜组水果有较大的 PC1 值, 说明其品质出现了显著的变化, 尤其是葡萄, 在第 12 d 时葡萄的未涂膜组与涂膜组相差较大, 在图中的右下象限并且和第 0 d 距离很远。PCA 结果能很好地说明涂膜对 3 种水果都有一定保鲜效果, 特别是对葡萄保鲜效果更为突出。

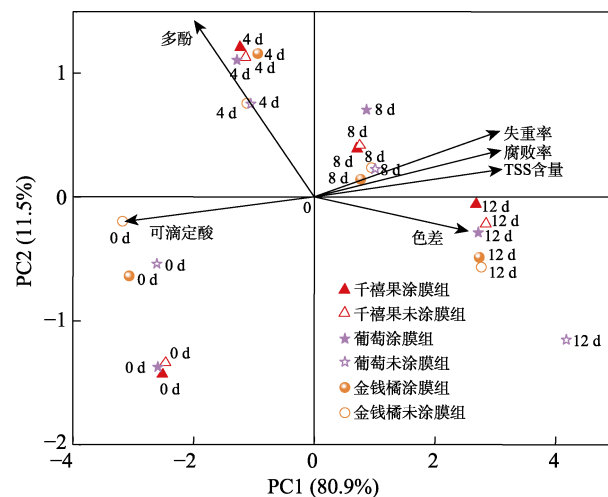


图 9 主成分分析图

Fig. 9 Principal component analysis diagram

2.5 水果的表观品质和感官测定

贮藏过程中水果照片以及感官评价如图 10 和表 10 所示。通过观察可以发现, 涂膜组的水果在色泽上更加亮丽, 这可能是涂膜改变了水果的折光系数^[38], 未涂膜组水果颜色较为暗淡无光, 在贮藏第 12 d 出现失水皱缩、发霉、变质的现象, 而涂膜组依旧保存良好, 并且整个涂膜组的水果的综合感官评价的分数要高于未涂膜组的水果^[39]。

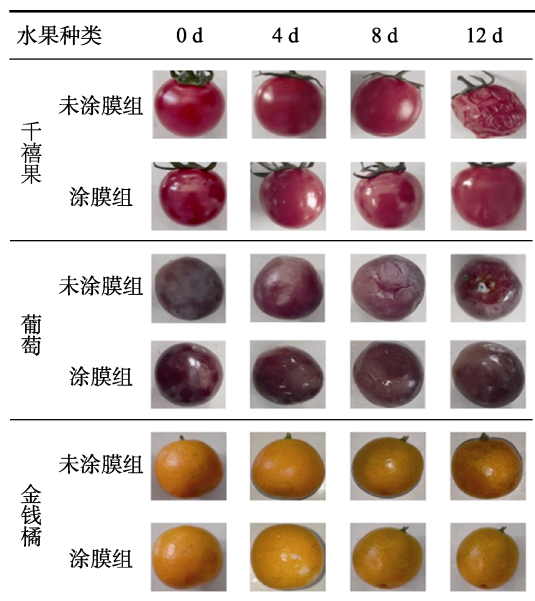


图 10 涂膜对贮藏过程中水果外观的影响

Fig. 10 Effect of coating on fruit appearance during storage

表 10 涂膜对贮藏水果感官评价影响

Table 10 Effect of coating on sensory evaluation of stored fruits

水果	千禧果		金钱橘		葡萄	
	未涂膜组	涂膜组	未涂膜组	涂膜组	未涂膜组	涂膜组
色泽	5.3	7.6	5.4	7.5	5.1	7.7
软硬度	1.8	6.0	2.2	6.6	1.9	6.5
风味	2.3	6.3	1.8	6.7	2.1	6.9
整体外观	5.1	7.8	3.4	7.2	4.6	7.7

3 结论

以涂膜的拉伸强度为响应值, 通过响应面实验优化涂膜制备工艺, 得到的最佳制备条件为: 壳聚糖溶液与阿拉伯胶水溶液的体积比为 1 : 2、壳聚糖溶液质量浓度为 10 g/L、甜玉米芯多糖纳米乳的添加量为 1.2 mL、阿拉伯胶水溶液质量浓度为 150 g/L 时, 制备的涂膜拉伸强度最大为(92.37±2.07) kPa, 且涂膜稳定性、水蒸气透过能力良好, 是理想的涂膜基质。将此涂膜用于千禧果、葡萄、金钱橘 3 种水果的保鲜, 经过 12 d 贮藏后, 以腐败率、失重率、色差、多酚、可滴定酸含量和 TSS 含量为评价指标, 通过 PCA 分析发现, 腐败率和失重率占累积方差贡献率为 92.354%, 而涂膜组这两个指标均优于未涂膜组, 这可能由于涂膜中甜玉米芯多糖具有较好的抑菌效果, 防止水果被微生物腐蚀, 也可能由于涂膜为水果提供了一个较好的内部环境, 使水果在运输储存过程中表现出良好的营养品质和感官品质, 本研究可为水果采后保鲜和品质综合评价提供参考。

参考文献:

- [1] CHENG M (程萌), ZHANG R F (张荣飞), LU W Q (逯文倩), *et al.* Preparation and properties of carvacrol/sodium alginate biocomposite film[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2019, 36(9): 1896-1902, 1955.
- [2] YAN J (严谨), CHEN L L (陈凌利), HE S C (何思辰), *et al.* Research progress on the application of edible coating preservation technology in chilled meat[J]. *Technology of Food Industry (食品工业科技)*, 2022, 44(8): 1-10.
- [3] ZHANG X R (张晓冉), XU K (许凯). Research progress of edible coating preservation technology in perishable food[J]. *Food Industry (食品工业)*, 2022, 43(9): 244-248.
- [4] FAN Y Z (范叶珍), LU R X (卢若兮), SONG W (宋武), *et al.* Study on preservation effect of pullulan coating on cherry tomato[J]. *Food and Fermentation Industries (食品与发酵工业)*, 2023, 49(6): 1-8.
- [5] LIANG P (梁攀), LI Y Y (李悦妍), HUANG S Y (黄少云), *et al.* Research progress on storage technology of citrus fruits[J]. *Package Engineering (包装工程)*, 2021, 42(13): 57-66.
- [6] LI J X (李金星). Study on the preparation of modified chitosan composite film and fruit preservation[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology (西南科技大学), 2021.
- [7] HU W Z (胡文忠), XIU Z L (修志龙), JIANG A L (姜爱丽), *et al.* Application of edible active coating in fresh-cut fruits and vegetables preservation[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection (食品安全质量检测学报)*, 2015, (7): 2427-2433.
- [8] WANG X (王昕), LI J Q (李建桥), REN L Q (任露泉). Application and development of edible coating preservation of fruits and vegetables[J]. *Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2004, (2): 284-287.
- [9] QUIRÓS-SAUCEDA A E, AYALA-ZAVALA J F, OLIVAS G I, *et al.* Edible coatings as encapsulating matrices for bioactive compounds: A review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(9): 1674-1685.
- [10] CAO Y G (曹云刚), ZHANG H D (张瀚丹), ZHANG X (张鑫), *et al.* Antibacterial mechanism of ε-polylysine and its application in meat preservation[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2022, 39(1): 1-6, 64.
- [11] WEN Q (文泉). Development of cowhide gelatin-polysaccharide coating material and improvement of water resistance[D]. Suzhou: Southern Yangtze University (江南大学), 2022.
- [12] BULIGEN J L B K (布丽根·加冷别克), MA A X (马爱霞), REN J Y (任建业), *et al.* Effects of jujube polysaccharide coating combined with ice-temperature storage on postharvest quality of apricot fruits[J]. *Food and Fermentation Industries (食品与发酵工业)*, 2022, 48(8): 37-42.
- [13] YU D W, YU Z J, ZHAO W Y, *et al.* Advances in the application of chitosan as a sustainable bioactive material in food preservation[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 62(14): 112-125.
- [14] CHENG X Y (成晓祎), WANG H (王欢), JIANG L Z (江连洲). Research progress of protein and polysaccharide based edible films[J]. *Soybean Technology (大豆科技)*, 2021, (6): 41-47.
- [15] CHEN Z H (陈智慧), CHEN J Q (陈健晴), LIU X X (刘金香), *et al.* Research progress on application of polysaccharides, proteins and their composite coatings in postharvest berries preservation[J]. *Preservation and Processing (保鲜与加工)*, 2022, 22(3): 97-103.
- [16] ZHANG Y, WU Y T, ZHENG W, *et al.* The antibacterial activity and antibacterial mechanism of a polysaccharide from *Cordyceps cicadae*[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 38(2): 273-279.
- [17] XIAO L, KIRAN T, ZHANG Y Y, *et al.* Effects of different chemical modifications on the antibacterial activities of polysaccharides sequentially extracted from peony seed dreg[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 116(3): 664-675.
- [18] MA Y L, ZHU D Y, KIRAN T, *et al.* Antioxidant and antibacterial evaluation of polysaccharides sequentially extracted from onion (*Allium cepa* L.)[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 111(5): 92-101.
- [19] WANG X (王鑫), WANG Z L (王峙力), XIE J N (谢静南), *et al.* Study on the inhibitory effect of sweet corn cob polysaccharide on α-amylase[J]. *Food Industry Science and Technology (食品工业科技)*, 2021, 42(10): 48-54.

- [20] WANG Z L (王峙力), WANG X (王鑫), HAN Y (韩焯), *et al.* Preparation of selenium polysaccharide from sweet corn cob and its inhibitory effect on amylase[J]. *Package Engineering (包装工程)*, 2021, 42(21): 33-41.
- [21] MA Y Q, WANG X, GAO S. Hypoglycemic activity of polysaccharides from sweet corn cob on streptozotocin-induced diabetic rats[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(1): 208-213.
- [22] WANG B Y, CAI T G, LIU Q, *et al.* Preparation and evaluation of spirulina polysaccharide nanoemulsions[J]. *International Journal of Molecular Medicine*, 2018, 42(3): 1273-1282.
- [23] LI T P, HAN X D, BAO R W, *et al.* Preparation and properties of water-in-oil shiitake mushroom polysaccharide nanoemulsion[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 140: 343-349.
- [24] MA Y Q (马永强), ZHANG K (张凯), WANG X (王鑫), *et al.* Hypoglycemic effect of sweet corn cob polysaccharide on diabetic rats[J]. *Food Science (食品科学)*, 2020, 41(13): 169-173.
- [25] WANG X (王鑫), LUO Y (罗钰), XIU W Y (修伟业), *et al.* Preparation and evaluation of sweet corn Cob polysaccharide nanoemulsion[J]. *Technology of Food Industry (食品工业科技)*, 2021, 43(10): 1-14.
- [26] YANG Z K (杨志坤). Preparation of edible nanoemulsion composite coating and its preservation effect on blueberry[D]. Suzhou: Jiangsu University (江苏大学), 2020.
- [27] XU T, GAO C, YANG Y, *et al.* Retention and release properties of cinnamon essential oil in antimicrobial films based on chitosan and gum arabic[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 84: 84-92.
- [28] SUNDARARAJAN B, MOOLA A K, VIVEK K, *et al.* Formulation of nanoemulsion from leaves essential oil of *Ocimum basilicum* L. and its antibacterial, antioxidant and larvicidal activities (*Culex quinquefasciatus*)[J]. *Microbial Pathogenesis*, 2018, 125: 475-485.
- [29] ESPINOSA ANDREWS H, BÁEZ GONZÁLEZ J G, CRUZ SOSA F, *et al.* Gum arabic-chitosan complex coacervation[J]. *Biomacromolecules*, 2007, 8(4): 1313-1318.
- [30] WANG X, WANG Z L, ZHANG K, *et al.* Effects of sweet corn cob polysaccharide on pancreatic protein expression in type 2 diabetic rats[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 88: 104908.
- [31] AI J W, LIU G D, SU Y L, *et al.* Research progress on postharvest treatment, processing technology and comprehensive utilization of kumquat[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(23): 204-209.
- [32] QI X N (祁小妮). Preparation of tibetan medicine rhodiola polysaccharide based antibacterial edible film[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2019, 36(10): 2034-2039.
- [33] LI J (李佳), JIANG A L (姜爱丽), HU W Z (胡文忠). Study on respiration metabolism and color change of postharvest blueberry[J]. *Modern Horticulture (现代园艺)*, 2012, (19): 3-4.
- [34] MURMU S B, MISHRA H N. The effect of edible coating based on arabic gum, sodium caseinate and essential oil of cinnamon and lemon grass on guava[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 820-828.
- [35] ZHANG F P (张福平). Study on physiological changes of wax apple during postharvest storage[J]. *Food Research and Development (食品研究与开发)*, 2006, (11): 151-153.
- [36] TAVASSOLIKAFRANI E, GAMAGE M, DUMEEL F, *et al.* Edible films and coatings for shelf life extension of mango: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 62(9): 1-29.
- [37] YIN Q C (尹青春), YANG H S (杨德珊), PAN Y B (潘永波), *et al.* PCA comprehensive evaluation of fresh-keeping effect of compound coating agent on wax apple[J]. *Food Science (食品科学)*, 2022, 43(23): 1-9.
- [38] ZHANG J L (张晶琳). Construction of ginger essential oil slow release system and its application in fruit and vegetable preservation[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology (浙江科技学院), 2020.

(上接第 1469 页)

- [9] GUAN Y, WANG D M, SONG G L, *et al.* Novel soluble polyimides derived from 2,2'-bis[4-(5-amino-2-pyridinoxy)phenyl]hexafluoropropane: Preparation, characterization, and optical, dielectric properties[J]. *Polymer*, 2014, 55(16): 3634-3641.
- [10] WANG S L, MA S Q, HE H R, *et al.* Aromatic polyimides containing pyridine and spirocyclic units: Preparation, thermal and gas separation properties[J]. *Polymer*, 2019, 168: 199-208.
- [11] FEKRI S, MANSOORI Y. Novel organosoluble and thermally stable polyetherimides based on a new dianhydride monomer 2,6-bis-(isobenzofuran-1,3-dione-5-yl)pyridine (BIDP)[J]. *Journal of Macromolecular Science Part A: Pure and Applied Chemistry*, 2018, 55(2): 116-123.
- [12] CHEN Y C, SU Y Y, HSIAO F Z. The synthesis and characterization of fluorinated polyimides derived from 2'-methyl-1,4-bis(4-amino-2-trifluoromethylphenoxy)benzene and various aromatic dianhydrides [J]. *Journal of Macromolecular Science Part A: Pure and Applied Chemistry*, 2020, 57(8): 579-588.
- [13] ZHAO J J, GONG C L, ZHANG S J, *et al.* Synthesis of a new pyridine-containing diamine and related polyimide[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2010, 21(3): 277-278.
- [14] RIGANA M F, THIRUKUMARAN P, SHANTHI K, *et al.* Synthesis and characterization of hyperbranched polyether imides based on 1,3,5-tris[4-(4'-aminophenoxy)phenoxy]benzene[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(40): 33249-33258.
- [15] LI B (李彬), XIA Y (夏瑶), AN H L (安洪利), *et al.* Research progress in the design, synthesis and application properties of fluorine-containing polyimides[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2021, 38(7): 1314-1324.
- [16] WANG X L, LI Y F, ZHANG S J, *et al.* Synthesis and characterization of novel polyimides derived from pyridine-bridged aromatic dianhydride and various diamines[J]. *European Polymer Journal*, 2006, 42(6): 1229-1239.
- [17] WU X L, CAI J, CHENG Y R. Synthesis and characterization of high fluorine-containing polyimides with low-dielectric constant[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(16): 1-9.
- [18] CHUNG I S, KIM S Y. Soluble polyimides from unsymmetrical diamine with trifluoromethyl pendent group[J]. *Macromolecules*, 2000, 33(9): 3190-3193.
- [19] HUANG J (黄杰), LIU X L (刘晓烈), CHENG J (程杰), *et al.* Research on improvement of the processing performance of polyimide by isopropylidene and ether bond[J]. *New Chemical Materials (化工新型材料)*, 2015, 43(6): 238-240.
- [20] WU X M, SHU C, HE X Q, *et al.* Optically transparent and thermal-stable polyimide films derived from a semi-aliphatic diamine: Synthesis and properties[J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2020, 221(5): 1900506.
- [21] SHAO Y, LI Y F, ZHAO X, *et al.* Synthesis and properties of fluorinated polyimides from a new unsymmetrical diamine: 1,4-(2'-trifluoromethyl-4',4"-diaminodiphenoxy)benzene[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2006, 44(23): 6836-6846.
- [22] LIU Y Y, WANG Y K, WU D Y. Synthetic strategies for highly transparent and colorless polyimide film[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(28): e52604.
- [23] TABATABAEI-YAZDI Z, MEHDIPOUR-ATAEI S. Preparation, characterization, and properties of novel category of processable thermally stable poly(ether ether imide)s[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2014, 292(9): 2145-2156.
- [24] DHARA M G, BANERJEE S. Fluorinated high-performance polymers: Poly(arylene ether)s and aromatic polyimides containing trifluoromethyl groups[J]. *Progress in Polymer Science*, 2010, 35(8): 1022-1077.
- [25] GHAEMY M, ALIZADEH R, BEHMADI H. Synthesis of soluble and thermally stable polyimide from new diamine bearing *N*-[4-(9*H*-carbazol-9-yl)phenyl]formamide pendent group[J]. *European Polymer Journal*, 2009, 45(11): 3108-3115.