张左勇, 张元勇, 郑莉, 等. 美拉德糖基化玉米醇溶蛋白涂膜的制备及其在蓝莓保鲜中的应用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 454−466. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100012

ZHANG Zuoyong, ZHANG Yuanyong, ZHENG Li, et al. Preparation of Maillard Glycosylated Zein Coating and Its Application in Blueberry Preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 454−466. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100012

· 贮运保鲜 ·

美拉德糖基化玉米醇溶蛋白涂膜的制备及其在蓝莓保鲜中的应用

张左勇, 张元勇, 郑　莉, 陈耀鹏, 董精晶, 孙书言, 郭　娜, 朱桂兰*

（合肥师范学院 生物与食品工程学院, 安徽省绿色食品乡村振兴协同技术服务中心, 安徽合肥 230061）

摘　要: 为缓解蓝莓采后品质劣变，本研究采用超声辅助美拉德反应对玉米醇溶蛋白（Zein）进行糖基化改性，制备不同反应时间（0~2.5 h）的糖基化膜，经系统理化性能表征后应用于蓝莓涂膜保鲜。结果显示，Zein-葡萄糖糖基化膜具有最高的接枝度，因此葡萄糖被选为最优糖源。随着美拉德反应时间延长，糖基化膜褐变程度加深、接枝度提升，分子结构中引入羟基基团，膜表面呈现多孔粗糙的微观形貌。与此同时，糖基化膜的亲水性显著（P<0.05）增强，机械强度与抗氧化性均呈现先升后降的趋势，在反应 2 h（ZG-MR-2 h）时达到最优水平。此时，ZG-MR-2h 膜的接枝度为 18.26%，溶解性与溶胀性分别为 23.63% 和 49.38%，拉伸强度与断裂伸长率分别为 19.07 MPa 和 29.36%，DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除率分别达到 48.64% 和 50.24%。蓝莓保鲜实验表明，ZG-MR-2h 涂膜能显著（P<0.05）降低果实失重率和腐败率，维持果实较高硬度，减缓可溶性固形物、花青素和 V_C 含量下降，并抑制颜色、硬度、皱缩、腐烂程度、气味、风味、滋味等感官评分的降低，有效减缓果实品质劣变。电子鼻与 GC-MS 联合分析表明，ZG-MR-2 h 涂膜可显著延缓蓝莓中醛类、醇类、酯类和萜烯类特征香气成分的衰减，同时减少酸类、硫化物、氮氧化合物等腐败异味物质的生成。本研究将为基于糖基化蛋白的蓝莓绿色涂膜保鲜技术开发提供理论支持。

关键词: 玉米醇溶蛋白, 葡萄糖, 超声, 美拉德反应, 蓝莓, 涂膜保鲜

中图分类号: TS205.9　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0454−13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100012

本文网刊:

Preparation of Maillard Glycosylated Zein Coating and Its Application in Blueberry Preservation

ZHANG Zuoyong, ZHANG Yuanyong, ZHENG Li, CHEN Yaopeng, DONG Jingjing, SUN Shuyan, GUO Na, ZHU Guilan*

（School of Biology and Food Engineering, Hefei Normal University, Green Food Rural Revitalization Collaborative Technology Service Center of Anhui, Hefei 230061, China）

Abstract: In this study, zein was glycosylated via ultrasound-assisted Maillard reaction to prepare glycosylated films with varying reaction times (0~2.5 h). The physicochemical properties of these films were systematically characterized before their application as coating preservation materials to mitigate the postharvest quality deterioration of blueberries. The results indicated that the zein-glucose glycosylated film exhibited the highest degree of grafting, which established glucose as the preferred sugar source. With the extension of Maillard reaction time, the glycosylated films showed intensified browning

收稿日期: 2025−10−10

基金项目: 安徽省绿色食品乡村振兴协同技术服务中心开放基金项目（2024KYPT24; GXXT-2023-041; GXXT-2022-078）; 安徽省药食同源天然资源开发与利用工程实验室开放基金项目（2025KYPT08）; 合肥师范学院高层次人才科研基金项目（2023rcjj17）; 合肥师范学院校级青年科研项目（2023QN10）; 安徽省大学生创新创业训练计划项目（S202514098113）; 国家级大学生创新创业训练计划项目（202514098048）。

作者简介: 张左勇（1994−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: zzy036@hfnu.edu.cn。

*** 通信作者:** 朱桂兰（1980−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 碳水化合物资源开发与利用, E-mail: zhuguilan13@126.com。

and an increased grafting degree. The incorporation of hydroxyl groups into the zein molecular structure was confirmed, and the surface of glycosylated films displayed a porous and rough microstructure. Meanwhile, the hydrophilicity of glycosylated films was significantly (P<0.05) enhanced. The mechanical strength and antioxidant activity both initially increased and then decreased, reaching the optimal level at a reaction time of 2 h (ZG-MR-2h). At this point, the grafting degree of the ZG-MR-2h film was 18.26%, with solubility and swelling ratios of 23.63% and 49.38%, respectively. The tensile strength and elongation at break reached 19.07 MPa and 29.36%, while the DPPH and $ABTS^+$ free radical scavenging rates were 48.64% and 50.24%, respectively. Blueberry preservation experiments demonstrated that ZG-MR-2h coating could significantly (P<0.05) reduce the weight loss rate and decay rate of fruits, maintain high fruit firmness, retard the decline in contents of soluble solids, anthocyanins, and vitamin C, and inhibit the reduction in sensory scores including color, firmness, wrinkling, decay degree, odor, flavor, and taste, thereby effectively retarding the deterioration of fruit quality. The combined analysis of electronic nose and GC-MS showed that ZG-MR-2h coating could significantly delay the attenuation of characteristic aroma components such as aldehydes, alcohols, esters, and terpenes in blueberries, while reducing the formation of spoilage odor substances such as acids, sulfides, and nitrogen oxides. This study will provide theoretical support for the development of a green coating preservation technology for blueberries based on glycosylated protein.

Key words: zein; glucose; ultrasound; Maillard reaction; blueberries; coating preservation

蓝莓（*Vaccinium* spp.）属于杜鹃花科越橘属，是一种高经济价值的特色小浆果，富含花青素、酚类物质和维生素等营养物质，具有抗氧化、保护视力、增强免疫力、预防心血管疾病等多种生理功能[1]。蓝莓果皮较薄，易受到机械损伤或病原菌侵染，采后贮藏中的呼吸作用会消耗果实内部的营养成分，失水后会导致果实萎蔫、皱缩，风味下降和口感变差，最终腐烂变质，严重削弱了其商品价值[2−3]。目前，传统保鲜方法如低温贮藏、气调保鲜、辐照处理等虽可一定程度延长贮藏期，但存在成本高、操作复杂、保鲜效果有限等问题，难以满足蓝莓保鲜的现实需求[4]。因此，探寻适宜的保鲜技术以保障蓝莓采后贮藏品质、延长其货架期，对推动蓝莓产业高质量发展具有重要意义。

近年来，可食性涂膜保鲜技术已逐步应用于蓝莓采后保鲜，如结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合涂膜[5]、淀粉基姜黄素纳米复合涂膜[6]、壳聚糖-生姜精油纳米乳液明胶涂膜等[7]。这类涂膜多以多糖、蛋白质、脂类等天然可食用物质为原料，借助不同分子间的相互作用，通过包裹、涂布、微胶囊化等方式覆盖在果蔬表面形成保护薄层，实现阻隔水汽、氧气及各类溶质的渗透，进而延缓果蔬品质劣变[8]。玉米醇溶蛋白（Zein）是一种从玉米中提取的蛋白质，具有良好的成膜性、疏水性、阻隔性和生物相容性，常用于食品包装和涂膜保鲜[9]。然而，Zein 基涂膜在蓝莓采后保鲜中的应用还有待进一步挖掘。目前，纯 Zein 存在溶解性低、加工性能较差，成膜后柔韧性弱、脆性高及功能单一等缺点，限制了其在食品包装业中的应用[10]。因此，需要全面改善 Zein 膜的物化性能，从而扩大其在食品涂膜保鲜中的应用。

美拉德反应也称糖基化反应，是发生在还原糖和氨基酸之间的非酶促褐变反应，可以改善蛋白质的性能，提升其溶解性、乳化性等，拓宽应用范围[11]。反应中产生的类黑精等化合物，可以增强涂膜的内聚力和柔韧性，提升力学性能，赋予膜抗氧化、抗菌等功能性[12]。超声波作为高频声波，其空化作用可在涂膜制备中高效促进原料分散混合，打破颗粒团聚，提升涂膜均匀性与稳定性[13]。近些年，该技术已被应用于美拉德糖基化蛋白制备及相关涂膜开发。郭浩等[14]发现，500 W 超声预处理能显著提高玉米醇溶蛋白-菊粉糖基化反应接枝度，改善膜的机械性能。Wang 等[13] 通过超声波辅助制备了大米蛋白水解物/壳聚糖可食用复合薄膜，氢键与共价相互作用显著提升了薄膜相容性与断裂伸长率。超声作用下，体系内空化气泡会从机械或化学层面破坏蛋白质结构，使其空间构象松散，暴露更多美拉德反应活性基团[15]，进而增加蛋白与糖分子的碰撞概率，提高二者接枝程度[16]。目前，利用超声辅助美拉德反应制备糖基化 Zein 涂膜并应用于蓝莓的采后保鲜鲜有报道。

本研究以玉米醇溶蛋白为原料，采用超声辅助美拉德反应制备糖基化玉米醇溶蛋白。通过考察糖的种类对糖基化产物褐变程度、色泽及接枝度的影响，筛选出适宜的反应糖类。在此基础上，进一步制备不同接枝度的糖基化玉米醇溶蛋白涂膜，并对涂膜进行结构及性能表征。最后，将性能突出的涂膜应用于蓝莓保鲜实验，通过测定蓝莓贮藏期间的理化品质及挥发性气味成分变化，评价糖基化涂膜的保鲜效能。本研究以期为蓝莓等易腐果蔬的绿色高效保鲜提供理论依据与实践参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

供试蓝莓　由安徽徽王食品有限公司提供，果实无病虫害、无机械损伤、表面干爽、果粉基本完整、成熟度相对一致；玉米醇溶蛋白（Zein）、1,1-二苯基-2-苦基肼（DPPH）、2,2’-连氮基-双-（3-乙基苯并二氢噻唑啉-6-磺酸）（ABTS）　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；葡萄糖等糖类　上海源叶生物科技有限公司；乙醇等其余试剂为分析纯　上海国药集团化学试剂有限公司。

LC-JA2003 分析天平　上海力辰仪器科技有限

公司; HS5 加热磁力搅拌器　浙江群安科学仪器有限公司; XM-P04H 超声清洗器　昆山小美超声仪器有限公司; HH-2 数显恒温水浴锅　金坛市杰瑞尔电器有限公司; DHG-9070 电热鼓风干燥箱　上海一恒科学仪器有限公司; SC-10 色差仪　广东三恩时科技有限公司; UV1800 紫外分光光度计　日本岛津公司; Nicolet-6700 傅里叶红外光谱仪　美国 Thermo Nicolet 公司; SU8010 扫描电子显微镜　日本日立有限公司; TA-XT plus 质构仪　英国 Stable Micro Systems 公司; 7890B-5977B 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)　美国安捷伦公司; PEN3 型电子鼻　德国 Airsense 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　不同美拉德糖基化玉米醇溶蛋白的制备　将玉米醇溶蛋白-不同糖类以 11∶1(w/w)的质量比混合, 溶于 70%(v/v)乙醇溶液, 底物质量浓度调整为 6%(w/v)。磁力搅拌 30 min 后, 在 96 W 超声功率、70 ℃ 下超声 30 min, 然后在 90 ℃ 水浴锅中美拉德反应 120 min, 获得不同美拉德糖基化玉米醇溶蛋白。以颜色、褐变程度和接枝度为指标, 确定糖基化反应最适的糖类。

1.2.2　颜色的测定　采用色差仪对不同糖基化产物溶液的色泽进行测定, 记录样品的 L^*、a^*、b^*值, 多次测定后取平均值。

1.2.3　褐变程度的测定　使用紫外分光光度计测定不同糖基化产物溶液 420 nm 波长下的吸光度(A_{420}), 表示褐变程度, 以去离子水作为空白对照。

1.2.4　接枝度的测定　接枝度(Degree of glycosylation, DG)的测定采用邻苯二甲醛(OPA)法[17]。称取 40 mg OPA 溶解于 1 mL 甲醇中, 加入 25 mL 0.1 mol/L 硼砂溶液、2.5 mL 20%(w/v)SDS 溶液和 100 μL β-巯基乙醇混合, 并用去离子水定容至 50 mL, 制得 OPA 试剂。

取 200 μL 2 mg/mL 样品溶液(以蛋白质质量浓度计)与 4 mL OPA 试剂于 35 ℃ 水浴 3 min, 于 340 nm 测定其吸光度, 以去离子水作为空白对照。接枝度(DG)计算公式如(1)所示:

$$DG(\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \qquad 式(1)$$

式中: A_0 表示玉米醇溶蛋白在 340 nm 的吸光度; A_1 表示不同糖基化玉米醇溶蛋白在 340 nm 的吸光度。

1.2.5　玉米醇溶蛋白-葡萄糖糖基化膜的制备　将玉米醇溶蛋白-葡萄糖按照 1.2.1 相同条件下进行超声处理。然后在 90 ℃ 水浴锅中分别美拉德反应 1、1.5、2 和 2.5 h, 冷却后使用透析袋(1 kDa)透析 24 h。冷冻干燥后, 使用 70% 乙醇配制成质量浓度为 6% 的溶液。接着, 加入 20%(w/w)甘油(以糖基化产物质量计), 混匀后真空脱气。量取 20 mL 成膜溶液流延到内径为 9 cm 的培养皿中, 60 ℃ 烘干 2 h 后, 置于盛有饱和溴化钠溶液(相对湿度 58%)的干燥器内, 25 ℃ 放置 48 h 后揭膜, 得到不同接枝度的糖基化膜, 分别记为 ZG-MR-1 h、ZG-MR-1.5 h、ZG-MR-2 h 及 ZG-MR-2.5 h。对照 Zein 膜的制备则在相同条件下以 Zein 取代糖基化 Zein。

1.2.6　玉米醇溶蛋白-葡萄糖糖基化膜的表征

1.2.6.1　糖基化膜基本特性的测定　将糖基化膜裁剪成 2 cm×2 cm 大小一致的方片, 对其外观进行观察; 使用数显千分尺测定膜的厚度; 用色差计测定膜的 L^*、a^*、b^*值; 采用 OPA 法测定膜的接枝度。

1.2.6.2　傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)的测定　将膜与溴化钾按 1∶100(w/w)的质量比混匀, 研磨成均匀粉末, 压片后置于红外光谱仪中进行测定, 扫描范围 4000~400 cm^{-1}, 分辨率 4 cm^{-1}, 波数精度 0.01 cm^{-1}。

1.2.6.3　微观形貌的观察　使用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)观察膜表面的微观形貌。将膜剪成约 5 mm^2 的小片, 贴在有导电胶的样品台上进行喷金处理, 在 5 kV 加速电压下观察样品的微观形貌, 放大倍数为 2000×。

1.2.6.4　溶解性和溶胀性的测定　将薄膜裁剪成 2 cm×2 cm 的正方形, 在 105 ℃ 烘箱中干燥至质量恒定(W_1)后, 置于去离子水中 24 h 后, 将不溶物取出后干燥至恒重(W_2), 糖基化膜溶解性按式(2)计算:

$$溶解性(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \qquad 式(2)$$

溶胀性的测定则将糖基化膜在 105 ℃ 烘箱中干燥至恒重(M_1)后, 置于去离子水中浸泡 5 min, 取出后用滤纸吸干表面水分, 准确称量质量 M_2, 糖基化膜溶胀性按式(3)计算:

$$溶胀性(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \qquad 式(3)$$

1.2.6.5　机械性能的测定　使用质构仪测定糖基化膜的拉伸强度(Tensile strength, TS)和断裂伸长率(Elongation at break, EAB), 参照张馨雨等[18]的方法并略作修改。将膜裁剪成 10 mm×60 mm 大小的长条, 置于初始距离为 40 mm 的夹具间, 设置拉伸速度为 30 mm/min。TS 和 EAB 的计算如式(4)和(5)所示:

$$TS(MPa) = \frac{F}{S} \qquad 式(4)$$

式中: F 为拉伸过程中膜承受的最大拉力(N); S 为膜样品的横截面积(m^2)。

$$EAB(\%) = \frac{L}{L_0} \times 100 \qquad 式(5)$$

式中: L 为膜断裂时增加的长度(mm); L_0 为膜的起始长度(mm)。

1.2.6.6　抗氧化性的测定　采用分光光度法测定糖

基化膜对 DPPH 和 $ABTS^+$自由基的清除效果[19]。称取 0.25 g 糖基化膜并溶解于 50 mL 70% 体积分数的乙醇中，离心后取 2 mL 溶液与 2 mL DPPH 乙醇溶液（0.2 mmol/L）混合，避光反应 30 min 后，测定在 517 nm 处吸光度，DPPH 自由基清除活性按公式（6）计算：

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_s - A_b}{A_c}\right) \times 100 \quad \text{式（6）}$$

式中：A_s 为测试样品溶液的吸光度，A_b 为对照品（2 mL 样品溶液+2 mL 无水乙醇）的吸光度，A_c 为空白溶液（以无水乙醇代替样品）的吸光度。

$ABTS^+$自由基通过将 7.4 mmol/L ABTS 和 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液混合，避光放置 12 h，然后用乙醇稀释，直到在 734 nm 处吸光度为 0.700±0.001。然后将 1 mL 糖基化膜乙醇溶液与 4 mL 稀释的 $ABTS^+$溶液避光反应 30 min，测定其在 734 nm 处吸光度。$ABTS^+$自由基清除活性按公式（7）计算：

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_s - A_b}{A_c}\right) \times 100 \quad \text{式（7）}$$

式中：A_s 为测试样品溶液的吸光度，A_b 为对照品（1 mL 样品溶液+4 mL 无水乙醇）的吸光度，A_c 为空白溶液（以无水乙醇代替样品）的吸光度。

1.2.7　蓝莓的涂膜处理　挑选大小均匀，成熟度一致的新鲜蓝莓，平均分成 3 组（未处理组、Zein 涂膜处理组及 ZG-MR-2 h 涂膜处理组），将蓝莓分别浸入不同膜液中 30 s，风干后，放置在 4 ℃ 冰箱中储藏 14 d，每隔 2 d 取样测试。

1.2.8　蓝莓贮藏期间理化品质的测定　使用高清相机记录不同处理的蓝莓果实贮藏过程中的外观与颜色变化；采用称重法测定蓝莓失重率，采用计数法测定蓝莓腐烂率[20]；采用质构仪对蓝莓果实硬度进行测定[21]；使用阿贝折光仪测定可溶性固形物含量；花青素含量的测定使用 pH 示差法[22]；采用 2,6-二氯靛酚滴定法测定 V_C 的含量[23]。

1.2.9　感官评价　参照史洁莹等[1] 与黄彭等[24] 的方法略作修改。感官评价小组由 12 名年龄在 20~30 岁之间的成员组成，男女各半。按照表 1 的感官评价表标准，评价人员分别从 7 个感官维度（颜色、硬度、气味、风味、滋味、腐烂程度和皱缩程度）对贮藏期间蓝莓的感官品质进行评定，每项评分满分为 10 分，结果取所有评价者评分的平均值。

1.2.10　蓝莓贮藏期间风味特性的测定

1.2.10.1　电子鼻的测定　参照薛友林等[25] 的方法并略作修改。取 5 g 蓝莓果实捣碎，置于 20 mL 的顶空瓶中，密封后，在 50 ℃ 水浴锅中平衡 5 min 后使用 PEN3 电子鼻测定。测定条件：传感器清洗 70 s，自动调零 10 s，样品准备 5 s，样品测试 50 s，样品测定间

表 1　蓝莓果实感官品质评价标准

Table 1　Evaluation criteria for sensory quality of blueberry fruits

项目	评分标准	感官评分（分）
颜色	呈现深蓝色或紫色，颜色鲜艳且均匀	9~10
	蓝色或紫色稍深，整体颜色均匀	7~8
	颜色不太均匀，部分区域颜色变深，但仍能看到蓝色或紫色	5~6
	颜色不均匀，大片颜色变深或出现斑点	3~4
	颜色非常不均匀，有大量的颜色变深或斑点	0~2
硬度	触摸时感觉坚硬，表面坚实无变软迹象	9~10
	稍微减少硬度，但整体仍然坚实	7~8
	感觉柔软，但仍有一定硬度	5~6
	明显变软，但还能感觉到一些硬度	3~4
	完全软化，触摸时感觉很松软	0~2
气味	蓝莓香气清新	9~10
	蓝莓香气较淡	7~8
	蓝莓香气减弱，出现轻微异味	5~6
	蓝莓香气基本消失，有异味	3~4
	蓝莓香气完全消失，浓重的异味	0~2
风味	糖酸比例均衡，香气浓郁，风味极佳	9~10
	糖酸比例均衡，香气正常	7~8
	糖酸比不协调，香气弱	5~6
	糖酸比不协调，有酸味	3~4
	风味差，几乎不能食用	0~2
滋味	咀嚼性好，多汁	9~10
	咀嚼性适中	7~8
	咀嚼性差，果汁少	5~6
	咀嚼性差，几乎不能食用	3~4
	腐烂，无法食用	0~2
腐烂程度	无任何腐烂迹象，完全干燥	9~10
	有轻微软化，但没有明显的腐烂	7~8
	出现轻微腐烂斑点	5~6
	表面有明显腐烂区域，局部变软	3~4
	严重腐烂，表面大面积软化或出现霉斑	0~2
皱缩程度	表面平滑无皱缩	9~10
	轻微皱缩，整体形状完整	7~8
	表面有些皱缩，形状基本完整	5~6
	明显皱缩，形状有些变形	3~4
	严重皱缩，形状明显变形	0~2

表 2　电子鼻 10 种气敏传感器阵列的特征描述

Table 2　Characterization of ten kinds of gas sensor arrays of E-nose

序号	传感器	性能描述
1	W1C	对芳香成分敏感
2	W5S	对氮氧化合物敏感
3	W3C	对芳香成分灵敏、氨类敏感
4	W6S	对氢气灵敏
5	W5C	对短链烷烃、芳香化合物、低极性化合物敏感
6	W1S	对烃类敏感，对甲基类敏感
7	W1W	对硫化物灵敏，对部分萜烯类敏感
8	W2S	对醇、酮、醛类敏感，对羰基有响应
9	W2W	对有机硫化物、芳香成分敏感
10	W3S	对长链烷烃、甲烷敏感

隔 1 s, 内部流量与进样流量均设定为 100 mL/min。选取测定过程中第 48~50 s 的数据用于后续分析, 保证实验数据的稳定性和精确度。电子鼻传感器的性能描述如表 2 所示。

1.2.10.2 HS-SPME-GC-MS 的测定 蓝莓挥发性化合物通过顶空固相微萃取(HS-SPME)和气相色谱-质谱分析(GC-MS)联用法测定[25], 选用 100 μm PDMS 萃取头与 HP-INNOWAX 色谱柱(30 m×250 μm×0.25 μm)。将 5 g 蓝莓捣碎后置于 20 mL 气相进样瓶中, 用 PTFE/BYTL 隔膜密封, 在 55 ℃ 水浴下温育 5 min 后, 用 SPME 纤维对挥发性化合物萃取 30 min。吸附完成后, 将 SPME 纤维在 GC-MS 进样口中 250 ℃ 解吸 5 min。程序升温设置为: 初始温度 40 ℃ 保持 2 min, 随后以 2 ℃/min 速率升至 150 ℃ 并维持 1 min, 再以 5 ℃/min 升温至 210 ℃ 保留 5 min; 传输线温度 250 ℃, 载气为 He, 流速 1 mL/min, 采用不分流模式。质谱检测条件为: 连接杆温度 280 ℃, 电离方式为 EI, 离子源温度 200 ℃, 扫描质量范围 35~350 amu。定性分析通过检索 NIST/WILEY 标准谱库, 结合检测样品中各挥发性成分的质谱图与谱库中标准化合物的特征离子峰类型、相对丰度比进行比对匹配, 剔除干扰峰后确认目标成分, 相对含量采用峰面积归一化法进行计算。

1.3 数据处理

实验至少重复三次, 结果用平均值±标准差表示。使用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA), 采用 Tukey 检验进行显著性分析, $P<0.05$ 为显著差异。使用 Unscrambler X 10.4 对数据进行主成分分析(PCA)。

2 结果与分析

2.1 制备糖基化玉米醇溶蛋白最适糖类的确定

Zein-不同糖类糖基化产物的颜色、褐变度与接枝度如表 3 所示。不同糖基化产物色差 L^*、a^*、b^*值表现出一定的差异, 可能是由于糖类的溶解度与糖基化反应程度的不同。其中, Zein-葡萄糖糖基化产物的褐变程度和接枝度最高, 分别达到了 0.861 和 18.18%。研究表明, 美拉德糖基化产物的褐变程度与接枝度呈现出正相关[15]。因此, 较高的褐变度可以从侧面反映出 Zein 更易与葡萄糖发生糖基化反应, 这是由于葡萄糖较高的溶解性和较小的空间位阻, 使其能够高效分散于反应体系中, 突破蛋白聚集屏障, 显著增加其羰基(-CHO)与蛋白氨基(-NH_2)的碰撞概率[9,26]。因此, 本研究中选择葡萄糖作为制备糖基化 Zein 的最适糖类, 后续实验将进一步筛选适宜褐变度和接枝度的产物用于蓝莓涂膜保鲜。

2.2 不同糖基化膜的基本特性

不同美拉德反应时间的玉米醇溶蛋白-葡萄糖糖基化膜如图 1 所示。所有膜的外观平整有光泽, 无明显颗粒和裂纹, 膜的厚度约为 0.10 mm, 颜色逐渐由黄色向橙红色转变。以 Zein 膜为对照, 不同反应时间下糖基化膜的 L^*值(亮度)分别为 15.91、15.54、15.32 及 14.84, A_{420} 值分别为 0.782、0.809、0.866 及 0.892, 表明随着反应时间的增加, 糖基化膜的颜色加深, 褐变程度加剧, 这是由于美拉德反应生成的糠醛及其衍生物之间相互聚合而生成类黑精等深褐色物质[27]。此外, 糖基化膜的接枝度随反应时间增加, 分别达到 16.08%、17.17%、18.26% 及 19.75%, 说明 Zein 分子链逐渐展开, 更多的自由氨基暴露出来, 与糖类反应的接触面增大, 使得接枝度升高[28]。



图 1 不同美拉德反应时间的玉米醇溶蛋白-葡萄糖糖基化膜

Fig.1 Zein-glucose glycosylated films with different Maillard reaction times

2.3 不同糖基化膜的傅里叶变换红外光谱

傅里叶变换红外光谱(FTIR)常用于探究蛋白质糖基化过程中的分子结构变化, 主要表现为蛋白质吸收峰位置的迁移或吸收强度的改变。如图 2 所示, 在 3600~3100 cm^{-1} 范围内的红外吸收峰通常表示羟基(-OH)的伸缩振动[29]。与 Zein 膜相比, 随着糖基化反应时间的延长, 糖基化膜在该特征吸收峰区域的强度逐渐增强。这一现象表明, Zein 分子中引入的葡萄糖的羟基基团数量逐步增多, 直接体现为 Zein 接枝度的提升。蛋白质的主要吸收峰包括 1700~1600 cm^{-1} 处酰胺Ⅰ带(C=O 伸缩振动)、1575~1480 cm^{-1} 处酰胺Ⅱ带(N-H 弯曲和 C-N 伸缩振动)和 1300~1200 cm^{-1} 处酰胺Ⅲ带(C-N 伸缩和 N-H 变形振动)[30]。与 Zein 膜相比, 糖基化膜随着反应

表 3 玉米醇溶蛋白-不同糖类糖基化产物的颜色、褐变度与接枝度

Table 3 Color, browning degree, and grafting degree of zein-different sugar glycosylation products

糖类	葡聚糖	β-环糊精	壳聚糖	麦芽糊精	普鲁兰糖	葡萄糖
L^*(亮度)	15.12±0.05^{d}	14.75±0.04^{e}	15.62±0.03^{b}	14.26±0.03^{f}	15.87±0.05^{a}	15.35±0.04^{c}
a^*(红绿值)	3.88±0.03^{bc}	3.30±0.04^{e}	3.96±0.03^{b}	4.07±0.05^{a}	3.79±0.07^{cd}	3.74±0.03^{d}
b^*(黄蓝值)	10.83±0.05^{d}	10.66±0.04^{e}	11.06±0.06^{c}	12.11±0.06^{a}	9.97±0.03^{f}	11.18±0.03^{b}
褐变度(A_{420})	0.776±0.003^{b}	0.407±0.003^{e}	0.649±0.002^{d}	0.761±0.004^{c}	0.651±0.003^{d}	0.861±0.004^{a}
接枝度DG(%)	13.34±0.06^{e}	10.15±0.07^{f}	14.28±0.05^{d}	15.78±0.07^{c}	16.21±0.05^{b}	18.18±0.09^{a}

注: 同行的小写字母代表同一指标在不同糖类糖基化产物之间差异显著($P<0.05$)。

时间的延长，其酰胺Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ带的特征吸收峰强度呈逐步减弱趋势。该现象可能是随着糖基化反应推进，Zein 接枝度持续提升，促使分子中游离氨基残基的 N-H 基团与 C-N 基团被更多消耗，进而生成 Amadori 重排化合物（C=O）、Schiff 碱（C=N）及吡嗪（C-N）等新物质[15]。此外，随着接枝度逐步上升，1700~1600 cm^{-1} 处的酰胺Ⅰ带吸收峰逐渐减弱，表明 Zein 的 α-螺旋结构可能部分转变为 β-折叠或无规卷曲结构，这是因为糖基化修饰影响了蛋白质分子内和分子间的氢键网络，使得原本有序的二级结构发生重排[31]。FTIR 结果证实 Zein 分子中引入了葡萄糖，其接枝度随糖基化反应时间的增加而逐渐提升。

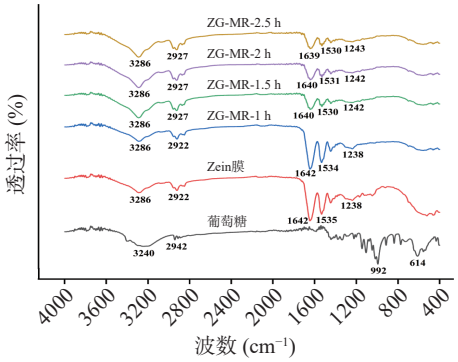


图 2　不同玉米醇溶蛋白-葡萄糖糖基化膜傅里叶变换红外光谱图

Fig.2　Fourier transform infrared spectra of different zein-glucose glycosylated films

2.4　不同糖基化膜的微观结构

通过 SEM 对薄膜的表面微观结构进行表征来反映膜分子间的排列信息，评价薄膜的性能。如图 3 所示，Zein 膜的表面结构较为光滑平整，经美拉德反应后，糖基化膜表面形成了蜂窝状的多孔结构。相关研究指出，多孔结构的形成可能是超声波处理中空化效应产生的机械性断键作用和剪切力对样品表面形貌的作用[32]。此外，随着美拉德反应时间的延长，糖基化膜表面的孔洞数量显著增多，且分布愈发密集，粗糙程度加剧。这与张玉茹等[15]研究的玉米醇溶蛋白与葡聚糖美拉德反应产物有相似的微观结构。粗糙的微观结构意味着膜表面积的大幅增加，有利于提高 Zein 与葡萄糖的接触机会，从而提高糖基化产物的接枝度。卜单等[33]也提出超声使得蛋白结构变得松散，更有利于糖分子的接入，使糖基化程度增大。

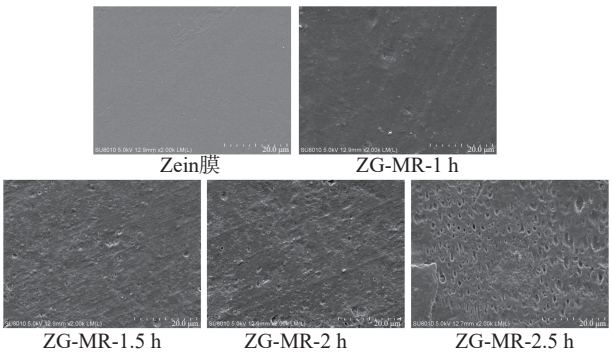


图 3　不同玉米醇溶蛋白-葡萄糖糖基化膜的扫描电镜图

Fig.3　Scanning electron microscopy images of different zein-glucose glycosylated films

2.5　美拉德反应时间对糖基化膜耐水性能的影响

溶解性和溶胀性可以反映出薄膜的耐水性能。如图 4(a)与图 4(b)所示，以 Zein 膜为对照，随着反应时间延长，糖基化膜的溶解性和溶胀性显著（P<0.05）增强，其中在 2 h 时，溶解性由对照 Zein 膜的 10.32% 升至 23.63%，溶胀性则由 43.11% 升至 49.38%。当反应 2.5 h 时，溶解性与溶胀性分别增长为 25.29% 和 52.44%。该结果主要归因于糖基化反应后，玉米醇溶蛋白引入了葡萄糖的亲水性羟基，使分子间作用力减小，分子间距离增大，提高了糖基化膜对周围环境水分的吸附能力[34]。

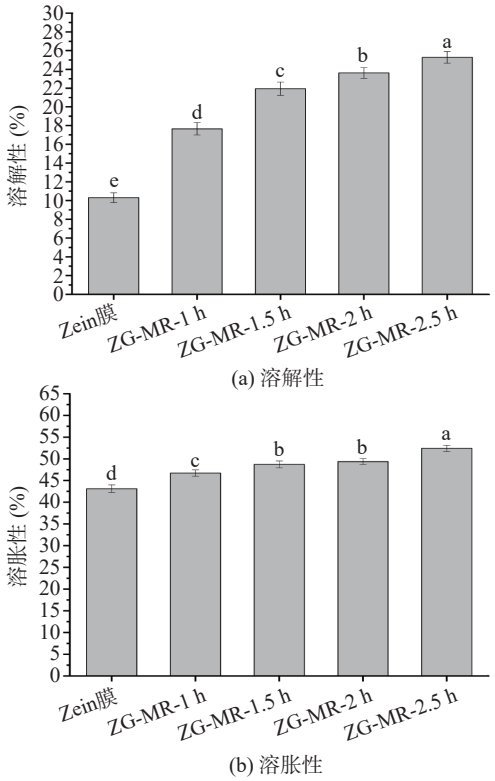


图 4　美拉德反应时间对玉米醇溶蛋白-葡萄糖糖基化膜溶解性(a)与溶胀性(b)的影响

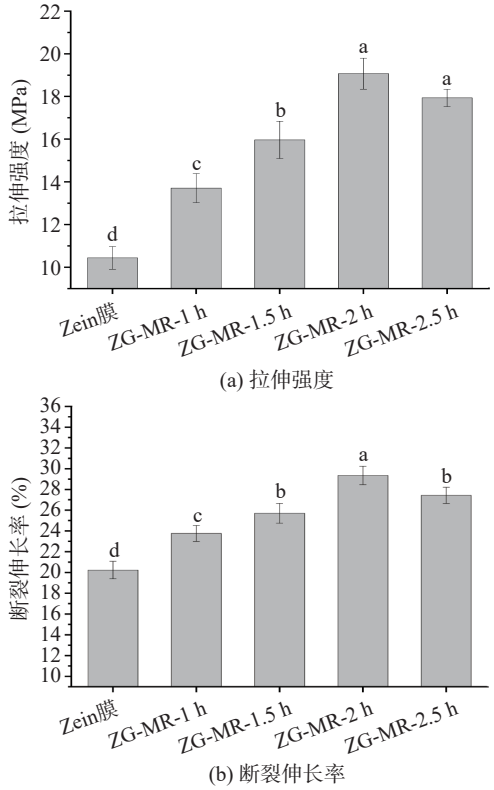
Fig.4　Effect of Maillard reaction time on solubility (a) and swelling properties (b) of zein-glucose glycosylated films

注：不同的小写字母代表不同样品之间差异显著（P<0.05）；图 5、图 6 同。

2.6　美拉德反应时间对糖基化膜机械性能的影响

拉伸强度和断裂伸长率是评价包装膜机械性能的重要指标。如图 5(a)与图 5(b)所示，随着反应时间的增加，薄膜的拉伸强度和断裂伸长率先增加后下降，在 2 h 时呈现最大值，分别达到 19.07 MPa 和 29.36%。此前，关于玉米醇溶蛋白-葡萄糖超声辅助糖基化复合膜的研究证实，随着糖基化反应时间的延长，接枝度的持续提升与膜材料的拉伸强度、断裂伸

长率之间并未始终呈现线性正相关关系[35]。当反应时间较短时，蛋白质氨基和糖类的羰基结合能够加强分子间相互作用，形成稳定的网络结构，从而令薄膜更加坚固柔韧、机械性能提升[36]。同时，糖基化引入的大量羟基基团，在一定程度上具有增塑的作用，使得拉伸强度增强[37]。然而，若反应时间过长，糖基化膜表面会出现大量褶皱，膜的结晶度下降、无定形区扩大，其质地逐渐变脆、柔韧性减弱，进而导致拉伸强度与断裂伸长率进一步下降[38]。因此，超声辅助美拉德反应 2 h 是适宜的糖基化时间，可以有效增强薄膜的柔韧性。



(a) 拉伸强度

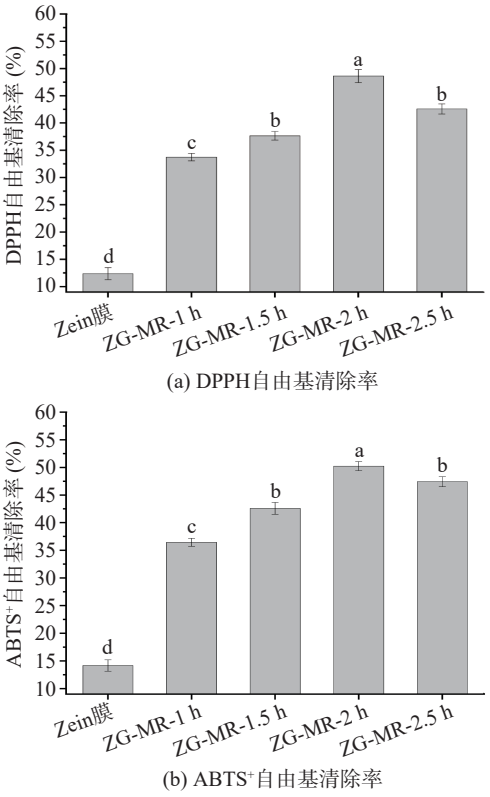
(b) 断裂伸长率

图 5 美拉德反应时间对玉米醇溶蛋白-葡萄糖糖基化膜机械强度的影响

Fig.5 Effect of Maillard reaction time on the mechanical strength of zein-glucose glycosylated films

2.7 美拉德反应时间对糖基化膜抗氧化性的影响

DPPH 和 ABTS⁺自由基清除能力可以反映糖基化膜的抗氧化能力。如图 6(a)与图 6(b)所示，与对照 Zein 膜相比，随着反应时间的增加，糖基化膜的 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除率先逐渐上升，在 2 h 时分别达到最大值 48.64% 和 50.24%，随后清除率开始下降，这与满涛等[10]的实验结果相似。糖基化 Zein 抗氧化性的提高，其主要原因包括：Amadori 重排形成的还原酮及其他中间产物能有效破坏自由基链；Strecker 降解产生的氨基酮、醛类及其他末期糖基化终产物中的羟基、还原性呋喃和吡咯等基团可提供氢原子；末期终产物“类黑精”中含有的酚羟基、氨基等还原性基团，可以提供电子或氢原子来终止氧化链反应；糖的焦糖化反应也有一定抗氧化作用[15,39−40]。然而，当反应时间过长，会使蛋白质分子发生热聚集，同时具有还原力的美拉德产物会有部分分解，导致抗氧化能力下降[41]。



(a) DPPH自由基清除率

(b) ABTS⁺自由基清除率

图 6 美拉德反应时间对玉米醇溶蛋白-葡萄糖糖基化膜抗氧化性的影响

Fig.6 Effect of Maillard reaction times on the antioxidant activity of zein-glucose glycosylated films

综上，ZG-MR-2 h 膜具有适宜的褐变度与接枝度，良好的溶解性与溶胀性，以及最佳的机械性能和抗氧化性，因此选作蓝莓保鲜的涂膜材料。

2.8 糖基化涂膜对蓝莓贮藏期间表观变化的影响

蓝莓的表观变化能够直观地反映出果实品质的变化，是消费者对质量的直接判断。如图 7 所示，贮藏初期(0~4 d)，蓝莓果实保持良好的饱满度与光泽，表面褶皱少，水分流失少，颜色劣变速率缓慢。随着贮藏时间延长至 4~6 d，果实饱满度略有下降，表面光泽减弱、色泽逐渐暗沉，轻微皱缩现象开始显现。贮藏后期(8~14 d)，果实劣变程度加剧，光泽度持续降低，色泽进一步暗沉，果肉失水皱缩特征显著。其中，未处理组蓝莓品质劣变速度最快，贮藏末期已出现发霉腐烂现象。与未处理组相比，涂膜处理组的果实失水皱缩、软化及霉变问题均得到明显改善。ZG-MR-2 h 糖基化涂膜在贮藏前期(0~8 d)可有效延缓蓝莓品质劣变，维持果实的水分含量、饱满度及优良色泽；但 8 d 后其保鲜效果逐渐衰减，果实品质开始呈缓慢下降趋势，但未出现霉变腐烂现象。综上，ZG-MR-2 h 糖基化涂膜仍是维持贮藏期蓝莓表观品质的有效保鲜方案。

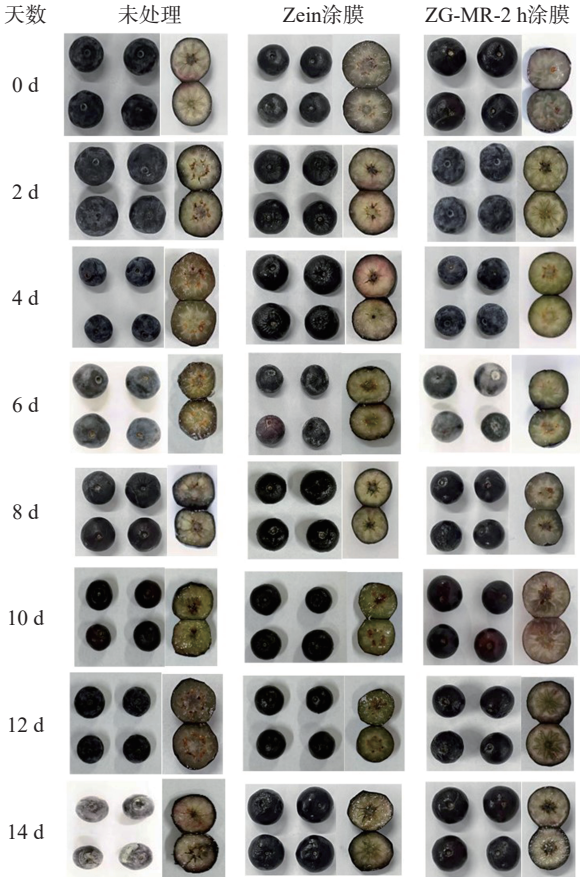


图 7　蓝莓贮藏期间的表观变化

Fig.7　Apparent changes of blueberries during storage

2.9　糖基化膜对蓝莓贮藏期间理化品质的影响

2.9.1　糖基化膜对蓝莓失重率与腐烂率的影响　果实的质量损失率反映果实的水分和营养成分流失程度，影响果实的食用品质与商品价值。如图 8(a)与图 8(b)所示，随着贮藏时间的延长，不同处理的蓝莓的失重率与腐烂率显著(P<0.05)增加，这是由于果实自身的生理活动、水分散失与微生物的侵染。在整个贮藏期间，蓝莓的失重率与腐烂率大小始终表现为未处理>Zein 涂膜>ZG-MR-2 h 涂膜。贮藏 14 d 时，二者在未处理组分别高达 8.02% 和 17.55%，Zein 涂膜组为 6.93% 和 14.42%，而 ZG-MR-2 h 涂膜组仅为 6.09% 和 12.57%。这一结果与 Li 等[42] 关于负载百里香酚的 κ-卡拉胶/玉米醇溶蛋白复合膜对蓝莓保鲜研究的结论相似。一方面，糖基化 Zein 涂膜在蓝莓表面形成了一层保护膜，可以有效抑制蓝莓的呼吸作用与水分蒸发，减少了果实的失重。另一方面，糖基化 Zein 涂膜中生成了一定量的类黑精、还原酮等抗氧化成分，可以降低果实表面被霉菌、酵母菌等微生物侵染的风险，延缓蓝莓的衰老腐败[43]。

2.9.2　糖基化膜对蓝莓硬度的影响　硬度与水果的新鲜程度密切相关，是影响消费者购买行为的关键因素。如图 8(c)所示，随着贮藏时间的增加，蓝莓硬度均呈现显著(P<0.05)下降的趋势。其中，未处理蓝莓的硬度从初始的 3.96 N 下降至 1.32 N，下降幅度达 66.67%，主要是由于水分流失和细胞壁中多糖(果胶、半纤维素和纤维素)降解，导致果实表面软化直至腐败[42]。此外，Zein 涂膜蓝莓在第 14 d 时硬度维持在 1.60 N，比未处理组高 21.21%，说明涂膜处理有效提升了果实硬度。进一步对比，ZG-MR-2 h 涂膜的效果更为突出，涂膜后的蓝莓硬度在第 14 d 时维持在 1.84 N，显著(P<0.05)高于其余两组。该结果可能是由于 ZG-MR-2 h 涂膜阻止了蓝莓代谢中水分流失，同时抑制了多聚半乳糖醛酸酶、果胶甲酯酶、β-葡萄糖苷酶和纤维素酶的活性，减少了细胞壁多糖的降解，从而延缓了蓝莓软化并维持果实饱满度[44]。

2.9.3　糖基化膜对可溶性固形物的影响　可溶性固形物含量主要是一些小分子糖类，可直接反映果实成熟程度和营养物质含量。由图 8(d)可知，随贮藏时间延长，各组蓝莓的可溶性固形物含量均呈先升后降趋势，在第 4 d 达到峰值，其中未处理组、Zein 涂膜组及 ZG-MR-2 h 涂膜组的含量分别为 18.03%、18.33% 和 18.84%，这主要归因于蓝莓中淀粉转化为可溶性糖、细胞壁多糖水解，以及水分流失导致的固形物浓度相对升高；贮藏后期，各组可溶性固形物含量开始显著(P<0.05)下降，至第 14 d 时，未处理组、Zein 涂膜组及 ZG-MR-2 h 涂膜组分别降至 12.94%、13.97% 和 14.93%，这可能与多糖水解酶活性降低、呼吸作用对糖类物质的消耗增加有关[45]。对比发现，ZG-MR-2 h 涂膜处理显著(P<0.05)延缓了蓝莓果实可溶性固形物含量的下降速度，说明其在贮藏过程中对蓝莓的保鲜效果最好。该结果可能是由于 ZG-MR-2 h 涂膜能够有效地包裹蓝莓，抑制果实的呼吸，同时可能对淀粉酶、纤维素酶、果胶酶的活性具有抑制作用，减少可溶性糖的生成，延缓果实的后熟[46]。

2.9.4　糖基化膜对花青素含量的影响　蓝莓花青素具有清除自由基、抗炎、改善视力和预防心血管疾病等作用，也与果实成熟度相关。如图 8(e)所示，在 0~4 d 的贮藏初期，三组蓝莓的花青素含量均呈上升趋势，在第 4 d 时达到峰值。此时，未处理组、Zein 涂膜组和 ZG-MR-2 h 涂膜组中花青素含量分别达到 1.87、1.94 及 1.99 mg/g，这与蓝莓采后成熟有关。进入 4~14 d 贮藏中后期，花青素含量显著(P<0.05)降低，主要由于蓝莓离体后生命活性降低，合成花青素能力下降，且易被自由基破坏损耗[20]。对比发现，ZG-MR-2 h 涂膜处理对蓝莓花青素保护作用最佳，14 d 后保留量仍能达到 1.49 mg/g，可能由于糖基化膜具有抗氧化性和抑菌性，既清除了果实内的自由基，又抑制了微生物对蓝莓表皮的侵害，延缓了花色苷的分解。

2.9.5　糖基化膜对 V_C 含量的影响　维生素 C 可以清除果实内部的自由基，是衡量果实贮藏品质的重要指标。如图 8(f)所示，贮藏期间，不同处理的蓝莓中 V_C 含量显著(P<0.05)降低，下降速度呈先慢后快

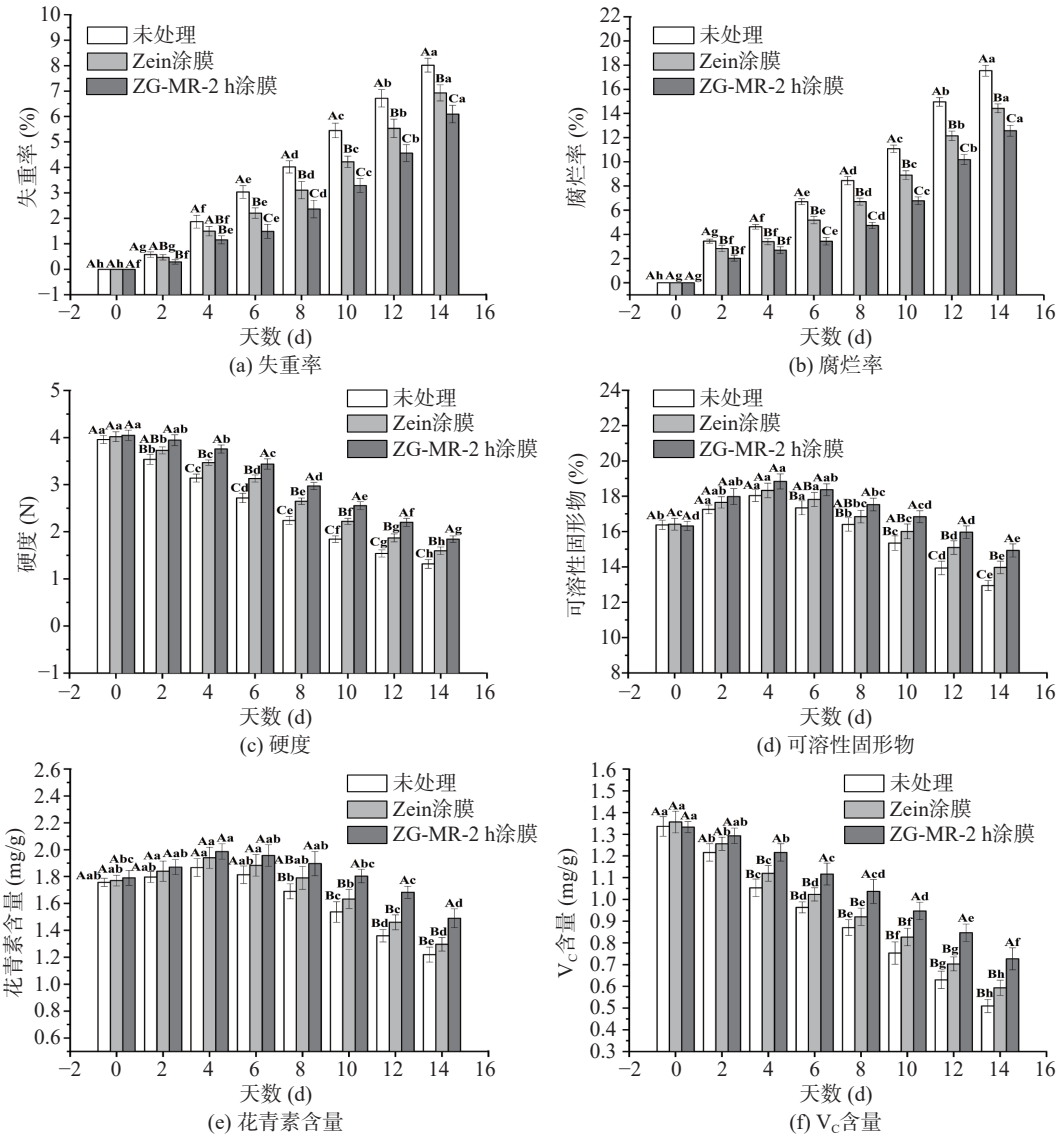


图 8 不同处理的蓝莓贮藏期间理化品质的变化

Fig.8 Changes in physicochemical quality of blueberries with different treatments during storage

注: 不同的大写字母代表同一贮藏时间不同处理样品之间差异显著(P<0.05), 不同的小写字母代表同一处理样品随贮藏时间变化差异显著(P<0.05)。

的趋势。其中, 未处理组蓝莓的 V_C 含量从初始的 1.34 mg/g 急剧下降至第 14 d 贮藏末期的 0.51 mg/g, 保留率仅为 38.06%。与未处理和 Zein 涂膜处理相比, ZG-MR-2 h 涂膜处理能有效抑制 V_C 含量的降低。至第 14 d, Zein 涂膜组的 V_C 含量为 0.59 mg/g, 而 ZG-MR-2 h 处理组的 V_C 含量达到 0.73 mg/g, 保留率为 54.89%, 仍显著(P<0.05)高于其他两组。该结果可能是糖基化膜中具有抗氧化的活性成分, 且涂膜处理后使其果实内部形成低 O_2 环境, 降低 V_C 氧化时所需的氧含量[47]。

2.10 糖基化膜对蓝莓感官特性的影响

将完全腐败发霉的蓝莓剔除, 选取品质逐渐劣变的果实开展感官评价。由附图 1(详见本刊官网 https://www.spgykj.com/文章的网络版)可知, 蓝莓在贮藏期间所有感官指标(颜色、皱缩程度、硬度、腐烂程度、风味、气味、滋味)的感官评分均呈显著(P<0.05)下降趋势, 且劣变速度在第 4 d 后显著加快。贮藏初始阶段, 各组蓝莓呈现深蓝色, 颜色鲜艳均匀, 表面坚实, 平滑无皱缩, 香气清新, 酸甜多汁。随着贮藏时间的延长, 蓝莓表皮色泽暗沉无光, 果实绵软, 且开始局部皱缩腐烂, 产生腐败异味。与未处理和 Zein 涂膜处理相比, ZG-MR-2 h 涂膜处理有效减缓了感官评分的下降, 表现出延缓蓝莓腐败变质和维持感官品质的良好能力。研究结果与海藻酸钠/ε-聚赖氨酸可食膜[46]、明胶/羧甲基纤维素钠涂膜[48]及鱼腥草提取液-壳聚糖抗菌复合膜[49] 对蓝莓贮藏过程中的感官品质影响的变化趋势类似。

2.11 蓝莓气味电子鼻分析

蓝莓因含有丰富的芳香呈味物质, 形成了独特气味, 其与果实的成熟度、贮藏时长及腐败程度均存在紧密关联[50]。在蓝莓贮藏过程中, 挥发性有机化合物会发生显著变化, 可能由于呼吸作用、酶活性变

化、微生物繁殖和化学氧化等因素[25]。如附图 2(详见本刊官网 https://www.spgykj.com/文章的网络版)所示，随着贮藏时间的增加，萜类(W1W)和醛类、酮类、醇类、酯类(W2S)相关的传感器响应逐渐增强，响应值分别在第 8 d 和第 10 d 达到峰值，表明蓝莓逐渐后熟，生青气逐步消失，形成了特征果香味。在贮藏后期，W1W 和 W2S 的信号值开始下降，同时硫化物(W2W)、呋喃类氮氧化合物(W5S)传感器的响应显著升高，标志着腐败异味的产生。与未处理和 Zein 涂膜处理相比，ZG-MR-2 h 涂膜处理显著延缓了蓝莓中醛类、醇类、酯类和萜烯类气体的衰减，使蓝莓的主体特征香气得以保持，同时降低了酸类、硫化物、氮氧化合物等腐败异味物质的生成与积累。其主要原因可能是 ZG-MR-2 h 涂膜形成的物理屏障抑制了酯类和萜类等化合物分解酶的活性，减缓了果香成分的降解和挥发。此外，涂膜中的抗氧化和抗菌成分有助于清除自由基，抑制脂质过氧化反应和微生物的繁殖代谢，从而减少挥发性酸类等异味物质的生成[47,51]。

对三种不同处理蓝莓贮藏过程中的电子鼻结果进行 PCA，每个圆形区域代表一种处理方式下蓝莓果实香气物质的数据采集点。PC1 和 PC2 分别为第一主成分和第二主成分，累积贡献率均达到 90% 以上，表明这两个主成分基本代表样品的主要信息特征。由附图 3(详见本刊官网 https://www.spgykj.com/文章的网络版)(a)至(c)所示，在未处理，Zein 涂膜处理和 ZG-MR-2 h 涂膜处理后，蓝莓经历 14 d 的贮藏，与第 0 d 相比，随着贮藏时间的增加，各样本数据集能相互区分，无重叠，说明贮藏过程中蓝莓挥发性成分差别明显。此外，如附图 3(d)至(k)所示，除了第 0 d 以外，其余样本在同一贮藏天数下，不同处理的蓝莓气味数据集之间能完全区分开，说明不同处理对蓝莓中挥发性物质的含量及组成具有显著影响。综上，PCA 分析结果证实不同处理方式及不同贮藏天数的蓝莓果实气味特征数据可实现有效区分，电子鼻能够通过定量表征蓝莓贮藏过程中的气味变化，从而动态反映涂膜处理对果实品质演变规律的影响。

2.12　蓝莓中挥发性化合物分析

考虑到电子鼻快速检验时，已间隔 2 d 取样，因此蓝莓挥发性化合物检测时选取 0、3、7、10 及 14 d 的样本测定。GC-MS 检测结果显示，蓝莓中共检测出 68 种挥发性成分，主要为醛类(12 种)、醇类(13 种)、酮类(7 种)、酸类(6 种)、酯类(12 种)、萜类(7 种)、其他未分类(11 种)，共同构成了其特征果香(图 9)。研究表明，醛类是蓝莓新鲜风味的标志物，具有典型“青草味”，主要源于不饱和脂肪酸酶促氧化，少量来自氨基酸代谢或萜类降解；醇类为风味核心贡献者，呈柔和“果香”“花香”，主要由醇脱氢酶(Alcohol Dehydrogenase, ADH)催化醛类还原生

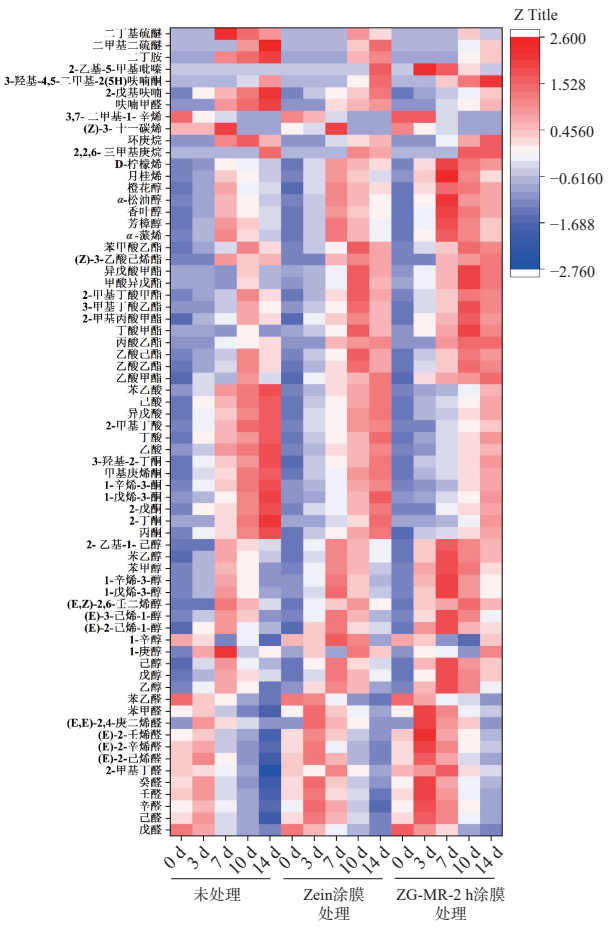


图 9　不同处理的蓝莓贮藏过程中挥发性化合物热图

Fig.9　Heatmap of volatile compounds in blueberries with different treatments during storage

成[52]。酮类与酸类初期含量低，主要来源于糖代谢和微生物代谢，为蓝莓品质劣变标志物，二者含量剧增会导致蓝莓产生酸败味[53]。酯类由醇类与挥发性酸类经酯化反应生成，是蓝莓“果香”“酯香”的重要来源，萜类则是其独特清新风味的核心标志物，具有“柑橘香”“花香”及“清新感”[54]。

如图 9 所示，贮藏初期(0~3 d)，己醛、(E)-2-己烯醛等醛类相对含量呈上升趋势，于第 3 d 达到峰值，推测与脂氧合酶(Lipoxygenase, LOX)与氢过氧化物裂解酶(Hydroperoxide Lyase, HPL)氧化不饱和脂肪酸的活性较高相关[55]。与此同时，己醇、(E)-2-己烯醇、苯乙醇等醇类相对含量快速积累，于第 7 d 达到峰值，推测因 ADH 催化对应的醛类转化而来[56]。因此，蓝莓风味也随之从尖锐“青草味”逐步转向柔和“花香/果香”。贮藏后期(醛类 3~14 d、醇类 7~14 d)，两类物质相对含量均显著下降，“青草味”与“柔和风味”逐渐消失。该变化一方面可能是霉菌、醋酸菌等微生物会将醛类与醇类分解为有机酸[57]；另一方面推测蓝莓细胞衰老死亡，导致 LOX/HPL、ADH 活性失活，进而无法持续合成新的醛类与醇类。

此外，丙酮、3-羟基-2-丁酮等酮类化合物在贮藏初期相对含量较低，随着贮藏时间延长呈显著上升趋势，可能由于酵母菌等微生物发酵糖类生成。与此同

时，贮藏初期酸类几乎未被检出，推测与该阶段蓝莓表皮微生物数量较少，糖类优先用于果实能量代谢，未产生乙醇等挥发性酸前体物质有关。贮藏后期，己酸、丁酸、异丁酸、异戊酸等酸类化合物含量开始增加，导致蓝莓出现明显酸败味，其可能来源于酵母菌、醋酸菌、霉菌等微生物的代谢[53]。

另一方面，酯类在 0~10 d 贮藏期内相对含量呈上升趋势，主要归因于该阶段乙醇、己醇、苯乙醇和乙酸的逐步生成，经酯化反应合成了乙酸乙酯、乙酸己酯等，进而与醇类协同增强蓝莓的“果香/花香”[58]。与之不同的是，萜类在贮藏初期（0~7 d）相对含量逐步累积并达到峰值，可能此阶段蓝莓细胞萜烯合成酶活性高，可通过 MEP 途径合成萜类，此时果实“特征清新香”最浓郁[56]。贮藏后期（10~14 d），酯类的相对含量开始下降，可能一方面醇类物质被微生物氧化为酸类，导致酸类过量积累引发酯化反应逆向进行；另一方面微生物分泌酯酶水解酯类化合物，最终造成“果香/酯香”风味衰减。萜类在 7~14 d 含量也显著下降，可能因为细胞衰老使萜烯合成酶活性下降，且萜类易被氧气/自由基氧化，加之霉菌分泌单萜降解酶分解萜类，最终蓝莓特征香气衰退。

最后，涂膜保鲜的结果如图 9 所示，与未处理组对比，蓝莓涂膜处理后可以延缓醛类（己醛、(E)-2-己烯醛、(E)-2-辛烯醛、(E)-2-壬烯醛、苯甲醛）、醇类（己醇、(E)-2-己烯-1-醇、(E)-3-己烯-1-醇、1-辛烯-3-醇、苯乙醇）、酯类（乙酸乙酯、乙酸己酯、2-甲基丁酸甲酯、3-甲基丁酸乙酯、异戊酸甲酯）及萜类（芳樟醇、香叶醇、α-蒎烯、柠檬烯）等特征香气化合物的降低[21,25]，同时可以抑制酮类（丙酮、3-羟基-2-丁酮、1-辛烯-3-酮等）和酸类（乙酸、己酸、丁酸、异丁酸、异戊酸）等异味化合物的生成[53]。其中，ZG-MR-2 h 涂膜处理效果要优于 Zein 涂膜处理，说明 Zein 糖基化涂膜对蓝莓具有良好的保鲜效果，能够延缓蓝莓的风味劣变。

3 结论

蓝莓营养丰富且经济价值高，但采后易因失水、腐烂导致品质劣变，严重制约其贮运销售。本研究采用超声辅助美拉德反应 2 h（ZG-MR-2 h）制备玉米醇溶蛋白-葡萄糖糖基化涂膜，通过提升糖基化膜的接枝度、亲水性、机械性能及抗氧化活性，在蓝莓保鲜中构建起高效物理屏障与抗氧化协同作用体系。该涂膜处理可显著延缓蓝莓贮藏期间失重率与腐败率的上升，有效维持果实较高硬度；同时能减缓可溶性固形物、花青素及 V_C 等关键营养成分的下降速度，并显著抑制颜色、硬度、皱缩、腐烂程度及气味、风味、滋味等感官指标的劣变。挥发性化合物分析进一步表明，ZG-MR-2 h 涂膜可显著延缓蓝莓中醛类、醇类、酯类及萜烯类特征香气物质的衰减，同时降低酸类、硫化物、氮氧化合物等腐败异味物质的生成与积累。综上，超声辅助美拉德糖基化玉米醇溶蛋白涂膜能有效减缓蓝莓采后品质劣变，为蓝莓绿色保鲜技术的开发与应用提供了重要参考。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 史洁莹, 牟燕萍, 陆周欣, 等. 壳聚糖-植物精油纳米乳液保鲜垫的制备及其在蓝莓保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(15): 354−366. [SHI J Y, MOU Y P, LU Z X, et al. Preparation and application of chitosan-essential oil nanoemulsion preservation pads for blueberry preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(15): 354−366.]

[2] 袁富容, 杨婷, 冉雅文, 等. 基于主成分分析法评价 1-MCP 处理对‘蓝丰’蓝莓果实品质及生理的影响[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(9): 8−18. [YUAN F R, YANG T, RAN Y W, et al. Effects of 1-MCP treatment on 'Bluecrop' blueberry fruits quality and physiology based on principal component analysis[J]. Storage and Process, 2024, 24(9): 8−18.]

[3] 佘杰海, 周文化, 马妍, 等. 蓝莓采后品质劣变与保鲜技术研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 220−226. [SHE J H, ZHOU W H, MA Y, et al. Research progress on postharvest quality deterioration and preservation technology of blueberry[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 220−226.]

[4] CAO S, QIAO L X, WANG X F, et al. Discussion on postharvest quality and strategies of storage and transportation techniques of blueberries: A comprehensive review[J]. Food Quality and Safety, 2025, 09: fyaf038.

[5] 闫兴梅, 董健羽, 郭娜, 等. 结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜在蓝莓涂膜保鲜中的应用研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(2): 106−113. [YAN X M, DONG J Y, GUO N, et al. Application of gellan gum-black rice anthocyanin-titanium dioxide composite film in the coating preservation of blueberry[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(2): 106−113.]

[6] LI X Q, LÜ J L, ZHANG X L, et al. Development of starch-based films reinforced with curcumin-loaded nanocomplexes: Characterization and application in the preservation of blueberries[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 264: 130464.

[7] WANG X H, XUE Z H, SUN Y J, et al. Chitosan-ginger essential oil nanoemulsions loaded gelatin films: A biodegradable material for food preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135791.

[8] WU J X, ZHANG L, FAN K. Recent advances in polysaccharide-based edible coatings for preservation of fruits and vegetables: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(12): 3823−3838.

[9] YANG F, QIU S, ZHANG W, et al. Fabrication and characterization of glycosylated-zein as an effective delivery system for rutin: Formation mechanism, physicochemical properties, and bioaccessibility *in vitro*[J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104056.

[10] 满涛, 熊晓辉, 王亚楠, 等. 玉米蛋白美拉德反应产物膜对冷鲜牛肉的保鲜效果[J]. 现代食品科技, 2023, 39(4): 154−162. [MAN T, XIONG X H, WANG Y N, et al. Effect of zein in Maillard reaction product films on the preservation of chilled fresh beef[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 154−162.]

[11] 董艳娇, 张浩, 赵城彬, 等. 响应面试验优化超声系统中玉米醇溶蛋白-葡聚糖糖基化及其性质分析[J]. 食品科学, 2018,

39(12)：247−253. ［DONG Y J, ZHANG H, ZHAO C B, et al. Response surface optimization of ultrasonic zein-dextran glycosylation and functional properties of products［J］. Food Science, 2018, 39(12)：247−253. ］
［12］ AFFES S, NASRI R, LI S M, et al. Effect of glucose-induced Maillard reaction on physical, structural and antioxidant properties of chitosan derivatives-based films［J］. Carbohydrate Polymers, 2021, 255：117341.
［13］ WANG L L, DING J, FANG Y, et al. Effect of ultrasonic power on properties of edible composite films based on rice protein hydrolysates and chitosan［J］. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 65：105049.
［14］ 郭浩, 张慧君, 陈又铭, 等. 超声辅助糖基化改性玉米醇溶蛋白结构和机械性能的影响［J］. 食品研究与开发, 2020, 41(4)：7−12,44. ［GUO H, ZHANG H J, CHEN Y M, et al. Effects of ultrasound treatment on the mechanical properties and chemical structure of zein by glycosylation modification［J］. Food Research and Development, 2020, 41(4)：7−12,44. ］
［15］ 张玉茹, 朱秀灵, 戴清源, 等. 超声辅助美拉德反应制备玉米醇溶蛋白-葡聚糖接枝物的特性［J/OL］. 食品工业科技, 1−21. DOI：10.13386/j.issn1002-0306.2025030095. ［ZHANG Y R, ZHU X L, DAI Q Y, et al. Characteristics of zein-dextran conjugates prepared by ultrasound-assisted Maillard reaction［J/OL］. Science and Technology of Food Industry, 1−21. DOI：10.13386/j.issn1002-0306.2025030095. ］
［16］ ZHAO C B, YIN H H, YAN J N, et al. Structure and acid-induced gelation properties of soy protein isolate-maltodextrin glycation conjugates with ultrasonic pretreatment［J］. Food Hydrocolloids, 2021, 112：106278.
［17］ 贾伟祎, 李甜甜, 郑思羽, 等. 糖基化改性对鹰嘴豆分离蛋白结构及功能性质的影响［J］. 食品工业科技, 2025, 46(15)：115−125. ［JIA W Y, LI T T, ZHENG S Y, et al. Effect of glycosylation modification on the structure of chickpea protein isolate and functional properties［J］. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(15)：115−125. ］
［18］ 张馨雨, 姚谢洋, 郝晓庆, 等. 聚乙烯醇/玉米醇溶蛋白冷冻凝胶膜的制备与表征［J］. 食品科技, 2024, 49(12)：19−26. ［ZHANG X Y, YAO X Y, HAO X Q, et al. Preparation and characterization of PVA/Zein cryogel films［J］. Food Science and Technology, 2024, 49(12)：19−26. ］
［19］ 李双健, 邸清茹, 龚敏慧, 等. 壳聚糖/玉米醇溶蛋白-花色苷纳米颗粒复合膜的制备及其性能［J］. 中国食品学报, 2024, 24(6)：213−222. ［LI S J, DI Q R, GONG M H, et al. Preparation and characterization of chitosan/zein-anthocyanin nanoparticles composite film［J］. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6)：213−222. ］
［20］ 梁晓云, 赵王晨, 张晨, 等. 壳聚糖/EGCG@MNPs 纳米复合包装对低温和常温贮藏蓝莓保鲜效果的影响［J］. 食品工业科技, 2022, 43(24)：268−279. ［LIANG X Y, ZHAO W C, ZHANG C, et al. Effects of chitosan/EGCG@MNPs nanocomposite packaging on preservation of blueberries stored at low temperature and normal temperature［J］. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24)：268−279. ］
［21］ 周集豪, 罗思悦, 刘帮迪, 等. 复合型保鲜剂对蓝莓贮藏品质及风味的影响［J］. 保鲜与加工, 2025, 25(7)：24−37. ［ZHOU J H, LUO S Y, LIU B D, et al. Effect of compound preservatives on storage quality and flavor of blueberries［J］. Storage and Process, 2025, 25(7)：24−37. ］
［22］ 邹小波, 杨志坤, 石吉勇, 等. 阿拉伯胶/白色玫瑰茄提取物复合涂膜对低温贮藏蓝莓保鲜效果的影响［J］. 食品科学, 2019, 40(7)：204−211. ［ZOU X B, YANG Z K, SHI J Y, et al. Preservation effect of gum arabic edible coating incorporated with whiteroselle extract (*Hibiscus sabdariffa* L.) on cold-stored blueberries［J］. Food Science, 2019, 40(7)：204−211. ］
［23］ 杜珂涵, 张亲心, 黄天姿, 等. 壳聚糖/纳米 ZnO 复合涂膜对蓝莓保鲜效果的研究［J］. 食品科技, 2023, 48(12)：31−40. ［DU K H, ZHANG Q X, HUANG T Z, et al. Effects of chitosan/nano-ZnO composite coating on preservation of blueberry［J］. Food Science and Technology, 2023, 48(12)：31−40. ］
［24］ 黄彭, 丁捷, 李昕谕, 等. 基于主成分分析和聚类分析麝香草酚微胶囊/魔芋葡甘露聚糖/低酰基结冷胶可食性复合涂膜对蓝莓品质的综合评价［J］. 食品与发酵工业, 2024, 50(14)：280−289. ［HUANG P, DING J, LI X Y, et al. Comprehensive evaluation of edible composite coatings with thymol microcapsule/konjac glucomannan/low-acyl gellan gum on blueberry quality based on principal component analysis and cluster analysis［J］. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(14)：280−289. ］
［25］ 薛友林, 董立超, 张鹏, 等. 电子鼻结合 GC-MS 分析不同处理蓝莓货架期间果实的挥发性成分［J］. 食品工业科技, 2020, 41(19)：297−303,320. ［XUE Y L, DONG L C, ZHANG P, et al. Analysis of the volatile components of blueberry fruits with different treatments during shelf life by GC-MS combined with electronic nose［J］. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(19)：297−303,320. ］
［26］ 董潇, 黄国清, 肖军霞. 玉米醇溶蛋白-葡萄糖美拉德反应产物制备姜黄素纳米颗粒［J］. 中国食品学报, 2021, 21(3)：118−127. ［DONG X, HUANG G Q, XIAO J X. Preparation of curcumin nanoparticles by zein-glucose Maillard reaction products［J］. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(3)：118−127. ］
［27］ ZHANG Z Y, CHEN J Y, ZHENG L, et al. The potential meat flavoring derived from Maillard reaction products of rice protein isolate hydrolysate-xylose via the regulation of temperature and cysteine［J］. Food Chemistry：X, 2024, 22：101491.
［28］ 张彤, 戚朝霞, 冯雨禾, 等. 超声辅助花生分离蛋白复合菊粉糖基化反应条件的优化及性质研究［J］. 中国调味品, 2025, 50(2)：67−74,111. ［ZHANG T, QI Z X, FENG Y H, et al. Optimization of ultrasound-assisted glycosylation reaction conditions for peanut protein isolate composite inulin and property study［J］. China Condiment, 2025, 50(2)：67−74,111. ］
［29］ 王丹, 李河, 张志军, 等. 紫苏籽粕蛋白糖基化产物结构及功能特性［J］. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2023, 49(4)：557−565. ［WANG D, LI H, ZHANG Z J, et al. Structural and functional properties of the glycosylated products of perillaseed meal proteins［J］. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2023, 49(4)：557−565. ］
［30］ CHANG Y, JIAO Y, LI D J, et al. Glycosylated zein as a novel nanodelivery vehicle for lutein［J］. Food Chemistry, 2022, 376：131927.
［31］ XI C Y, KANG N X, ZHAO C H, et al. Effect of reaction temperature on the protein structure and the ability to encapsulate *β*-carotene of WPI-dextran conjugates［J］. Journal of Food Science, 2020, 85(6)：1707−1716.
［32］ FAN X, CHANG L, PU H Y, et al. Enhancement of zein-based films for mango preservation using high-intensity ultrasound and castor oil plasticization［J］. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111：107067.
［33］ 卜单, 涂宗财, 刘光宪, 等. 不同还原糖糖基化对超声波预处理 *α*-乳白蛋白结构和抗氧化活性的影响［J］. 食品科学, 2022, 43(24)：1−6. ［BU D, TU Z C, LIU G X, et al. Effect of glycation with different reducing saccharides on conformation and antioxidant activities of ultrasonic pretreated *α*-lactalbumin［J］. Food Science,

2022, 43(24): 1−6.]
[34] 李萍, 张慧君, 郭浩, 等. 糖基化改性玉米醇溶蛋白膜的性能及硬胶囊体外释放分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 302−309. [LI P, ZHANG H J, GUO H, et al. Performance of zein film modified by glycosylation and *in vitro* release analysis of hard-capsule[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 302−309.]
[35] 郭浩, 张慧君, 陈又铭, 等. 葡萄糖糖基化改性玉米醇溶蛋白膜的物化性质及在胶囊壳中的应用[J]. 中国油脂, 2019, 44(12): 76−80,91. [GUO H, ZHANG H J, CHEN Y M, et al. Physico-chemical property of glucose glycosylated zein film and itsapplication in capsule shells[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(12): 76−80,91.]
[36] 孟才云, 孙妍, 肖志刚, 等. 葡萄糖糖基化米糠蛋白-壳聚糖复合膜的制备及表征[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 135−142. [MENG C Y, SUN Y, XIAO Z G, et al. Preparation and characterization of glycosylated rice bran protein-chitosancomposite film[J]. Food Science, 2023, 44(16): 135−142.]
[37] 方春姗, 姜维, 胡艺, 等. 基于美拉德反应的大豆分离蛋白改性膜的制备及应用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(7): 241−249. [FANG C S, JIANG W, HU Y, et al. Preparation and application of soybean protein isolate modified film based on Maillard reaction[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(7): 241−249.]
[38] ZHANG Y P, DENG L L, ZHONG H, et al. Impact of glycation on physical properties of composite gluten/zein nanofibrous films fabricated by blending electrospinning[J]. Food Chemistry, 2022, 366: 130586.
[39] JIA Wei, GUO Aiai, ZHANG Rong, et al. Mechanism of natural antioxidants regulating advanced glycosylation end products of Maillard reaction[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134541.
[40] NOOSHKAM M, VARIDI M, BASHASH M. The Maillard reaction products as food-born antioxidant and antibrowning agents in model and real food systems[J]. Food Chemistry, 2019, 275: 644−660.
[41] 齐宝坤, 赵城彬, 杨树昌, 等. 绿豆分离蛋白-葡聚糖接枝反应及产物抗氧化性研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18(12): 74−80. [QI B K, ZHAO C B, YANG S C, et al. Research on grafting reaction of mung bean protein isolate-dextran and antioxidant activity of conjugates[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(12): 74−80.]
[42] LI H H, WANG S C, CHEN J, et al. Preparation and characterization of thymol-loaded ZIF-8/*κ*-carrangeenan/zein composite film as active food packaging with enhanced functional properties for blueberry preservation[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 356: 123406.
[43] HAUSER C, MUELLER U, SAUER T, et al. Maillard reaction products as antimicrobial components for packaging films[J]. Food Chemistry, 2014, 145(15): 608−613.
[44] SUN H Y, HAO D Q, TIAN Y, et al. Effect of chitosan/thyme oil coating and UV-C on the softening and ripening of postharvest blueberry fruits[J]. Foods, 2022, 11(18): 2795.
[45] LIU M Y, ZOU X, WU X N, et, al. Preparation of chitosan/*Tenebrio molitor* larvae protein/curcumin active packaging film and its application in blueberry preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275: 133675.
[46] 鲍若晗, 刘一帆, 孟岳成. 海藻酸钠/*ε*-聚赖氨酸层层自组装可食膜对蓝莓保鲜效果的研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(6): 271−280. [BAO R H, LIU Y F, MENG Y C. Preservation effect of sodium alginate/*ε*-polylysine layer-by-layerself-assembly edible film on blueberry[J]. China Food Additives, 2023, 34(6): 271−280.]
[47] 吕静祎, 徐冬乐, 丁思杨, 等. 壳聚糖-山竹果皮提取液复合涂膜对蓝莓的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 295−300. [LÜ J Y, XU D L, DING S Y, et al. Effect of chitosan-mangosteen peel composite coating on blueberry preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 295−300.]
[48] 张思琪, 孙佩馨, 姜毅, 等. 明胶/羧甲基纤维素钠涂膜液的改性及其对蓝莓贮藏性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(4): 780−791. [ZHNG S Q, SUN P X, JIANG Y, et al. Modification of gelain/sodium carboxymethyl cellulose coating liquid and its effect on storability of blueberries[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(4): 780−791.]
[49] 霍若冰, 李洋, 徐曈晖, 等. 鱼腥草提取液-壳聚糖抗菌复合膜对低温贮藏蓝莓的保鲜作用[J]. 现代食品科技, 2022, 38(8): 153−162. [HUO R B, LI Y, XU T H, et al. The fresh-keeping effect of antibacterial houttuynia cordata extract-chitosan composite filmon blueberries stored at a low temperature[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(8): 153−162.]
[50] 魏鑫, 郭丹, 王宏光, 等. 不同品种蓝莓果实品质和香气物质差异分析[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(6): 149−156. [WEI X, GUO D, WANG H G, et al. Fruit quality and aroma substances of different blueberry cultivars[J]. Food Research and Development, 2022, 43(6): 149−156.]
[51] NOOSHKAM M, FALAH F, ZAREIE Z, et al. Antioxidant potential and antimicrobial activity of chitosan-inulin conjugates obtained through the Maillard reaction[J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28(6): 1861−1869.
[52] YANG H Y, GUO J, LIN S H, et, al. New insights into the mechanism of quick-freezing reducing blueberry flavor loss: Coupling cellular microstructure maintenance and fatty acid metabolism regulation[J]. Food Research International, 2025, 221: 117581.
[53] 田芸, 孙海燕, 朱旋, 等. 基于气相离子迁移色谱分析不同贮藏时期蓝莓的挥发性化合物变化[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(24): 168−175. [TIAN Y, SUN H Y, ZHU X, et al. Analysis of changes in volatile components of blueberries under different storage periods based on GC-IMS[J]. Food Research and Development, 2024, 45(24): 168−175.]
[54] FERRÃO L F V, SATER H, LYRENE P, et, al. Terpene volatiles mediates the chemical basis of blueberry aroma and consumer acceptability[J]. Food Research International, 2022, 158: 111468.
[55] QIAN Y P L, ZHOU Q, MAGANA A A, et al. Comparative study of volatile composition of major Northern Highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*) varieties[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 110: 104538.
[56] JIN J Y, WANG X G, ZHANG Y, et al. Integration of E-nose, volatilomic profiling, and transcriptomics reveals the mechanisms aroma formation during the ripening process of blueberries [J]. Food Research International, 2025, 221: 117282.
[57] QIAN Y P L, ZHANG D N, AN Y Q, et al. Characterization of aroma-active compounds in northern highbush blueberries "Bluecrop" (*Vaccinium corymbosum* "Bluecrop") and "Elliott" (*Vaccinium corymbosum* "Elliott") by gas chromatography-olfactometry dilution analysis and odor activity value[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(20): 5691−701.
[58] FORNEY C F, JORDAN M A, PENNELL K M, et al. Controlled atmosphere storage impacts fruit quality and flavor chemistry of five cultivars of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 194: 112073.