

海藻酸钠-赤藓红复合膜制备及其抑制马铃薯绿变性能

额日赫木, 史碧丹, 王 婧, 史 珂, 杨 帆, 马 丽

(山西师范大学 食品科学学院, 山西 太原 030000)

摘要: 为了抑制马铃薯块茎绿变, 以赤藓红 (ERY) 和海藻酸钠 (SA) 为原料、丙三醇 (Gly) 为增塑剂, 采用共混法制备了 SA-ERY 复合膜, 并通过单因素实验优化了反应条件。通过 SEM、TGA、UV-Vis 和力学性能测试, 考察了反应条件对 SA-ERY 复合膜物性、机械性能和光学特性以及对水蒸气、氧气和二氧化碳透过率的影响; 通过马铃薯块茎的光照处理实验, 探究了 SA-ERY 复合膜对马铃薯块茎绿变的抑制效果。结果表明, SA、Gly 和 ERY 加入量 (以所加蒸馏水总质量计, 下同) 分别为 2.00%、0.60% 和 0.10% 时, 制备的 2SA-0.1ERY/0.6Gly 复合膜展现出最佳的机械性能; ERY 与 SA 分子间主要通过氢键和静电相互作用结合, 当 ERY 加入量为 0.40% 时, 复合膜的结晶度和热稳定性得到显著提升。SA-ERY 复合膜在波长 450~550 nm 范围内呈现 U 型吸收曲线, 表现出对蓝光的选择性阻隔特性。贮藏 3 d 时, 经 2SA-0.1ERY/0.6Gly 复合膜处理的马铃薯块茎叶绿素含量较 0 d 显著增加 ($P<0.05$), 但与 SA 膜和对照组相比, 分别降低了 25.57% 和 31.24%, 证实其作用机制为通过阻隔蓝光抑制绿变。

关键词: 马铃薯绿变; 海藻酸钠-赤藓红复合膜; 机械性能; 光阻隔性能; 叶绿素含量; 食品化学品

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2025) 09-2038-11

Preparation of sodium alginate-erythrosine composite film and its inhibition on potato greening

ERIHEMU, SHI Bidan, WANG Jing, SHI Ke, YANG Fan, MA Li

(College of Food Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, Shanxi, China)

Abstract: In order to suppress potato tuber greening, sodium alginate-erythrosine (SA-ERY) composite films were prepared by blending method using erythrosine (ERY) and sodium alginate (SA) as raw materials, and glycerol (Gly) as plasticizer, with the reaction conditions optimized through single-factor experiments. The effects of reaction conditions on the physical properties, mechanical performance, optical characteristics of SA-ERY composite films, as well as their transmission rates to water vapor, oxygen and carbon dioxide were analyzed by SEM, TGA, UV-Vis, and mechanical performance tests. The inhibitory performance of SA-ERY composite film on potato tuber greening was evaluated through light exposure experiment. The results showed that when the addition amounts (based on the total mass of distilled water added, the same below) of SA, Gly and ERY were 2.00%, 0.60%, and 0.10%, respectively, the 2SA-0.1ERY/0.6Gly composite film exhibited the optimal mechanical properties. ERY and SA molecules primarily interacted through hydrogen bonding and electrostatic interactions. When the addition amount of ERY reached 0.40%, the crystallinity and thermal stability of the composite film significantly improved. The SA-ERY composite film displayed a U-shaped absorption curve in the range of 450~550 nm wavelength, demonstrating selective blue-light-blocking properties. After 3 d of storage, the chlorophyll content in potato tubers treated with the 2SA-0.1ERY/0.6Gly composite film increased significantly compared with that at 0 d ($P<0.05$), but was 25.57% and 31.24% lower than that treated with SA film and

control group, respectively, which confirmed that the greening inhibition mechanism was primarily attributed to blue light blocking.

Key words: potato greening; sodium alginate-erythrosine composite films; mechanical properties; light-blocking properties; chlorophyll content; food chemicals

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 作为全球消费量最大的块茎类农作物之一, 其块茎富含碳水化合物、蛋白质、维生素和矿物质等多种营养成分^[1]。然而, 在运输和储存过程中, 马铃薯块茎易发生变绿现象, 这不仅严重影响其产品质量, 还会造成巨大的经济损失, 严重制约了马铃薯产业的可持续发展。研究表明, 马铃薯块茎变绿现象与其淀粉体的转化密切相关。块茎中含有大量储存淀粉的淀粉体, 在光照条件下, 外周细胞层的淀粉体会发育成叶绿体。这些叶绿体通过光系统及其相关天线蛋白的发育进行光合作用, 进而合成光合色素叶绿素 a 和叶绿素 b^[2]。值得注意的是, 在叶绿素合成积累的同时, 光照还会诱导有害糖生物碱的合成。人体如果大量摄入此类糖生物碱, 健康将受到严重威胁^[3-4]。因此, 有效控制马铃薯块茎变绿现象对于减少产业经济损失和降低人类健康风险具有重要意义。

国内外学者已从多个角度探究了马铃薯块茎绿变的影响因素及其防控措施, 主要包括温度、光照条件、预处理、气调和包装等^[5]。在温度调控方面, EIE 等^[6]的研究表明, 贮藏温度显著影响马铃薯块茎的绿变程度: 5 °C 下贮藏 14 d 块茎未发生变绿, 而 20 °C 下贮藏的块茎叶绿素含量显著增加并出现明显的绿变。在化学处理方面, DONG 等^[7]研究发现, 空气中乙醇含量为 600 $\mu\text{L/L}$ 的熏蒸及其与氮气的联合处理可显著降低马铃薯块茎在贮藏期间的绿变程度。气调处理也是有效的绿变防控手段, BANKS^[8]研究指出, 采用体积分数 5% 的氧气处理比体积分数 15% 的二氧化碳和 21% 的氧气处理更能有效地抑制块茎绿变。此外, 包装材料的选择也至关重要, NYANKANGA 等^[9]研究表明, 采用高密度聚乙烯包装贮藏 14 d 的马铃薯块茎绿变率显著低于未包装的块茎, 且不同品种间的绿变率差异显著, 未包装块茎的绿变率最高可达 100%。尽管上述方法对抑制马铃薯块茎绿变均表现出一定的效果, 但仍存在应用成本高、安全性不足、操作复杂等问题, 这些局限性严重制约了其在绿变防控领域的实际应用和推广。因此, 开发经济、安全、高效的绿变防控技术仍是当前研究的重点方向。

光照是引发马铃薯块茎绿变的主要原因之一, 特别是光照的持续时间和强度会显著影响块茎的绿变速率。此外, 波长 200~800 nm 的光对块茎绿变也

有显著影响^[5]。PETERMANN 等^[10]证实, 475 nm 蓝光和 675 nm 红光都能诱导块茎叶绿素的生物合成。BANG 等^[1]研究发现, 聚丙烯/聚己二酸丁二酯/黑色素复合膜对紫外线具有较强的阻隔作用, 而且在 6 d 贮藏期内, 涂膜处理显著抑制了马铃薯块茎叶绿素的生成, 延缓了绿变的发生。由此可见, 不同波段的光对叶绿素的生物合成有不同的影响, 这也证实了马铃薯块茎对不同波长的光具有不同的敏感性。因此, 马铃薯在储运过程中可通过减少块茎对特定光的吸收来防止其发生绿变。

赤藓红 (ERY) 是一种人工合成的水溶性着色剂, 具有生物安全性良好、着色效果好、价格低廉等特点, 已被美国食品药品监督管理局 (FDA) 批准用于食品的着色。ERY 作为一种黄原胶基团化合物的光敏剂, 在波长 500~550 nm 可见光范围内有较好的吸收性^[11-12]。海藻酸钠 (SA) 是一种天然多糖, 具有成本低、成膜能力好、保水性能强、安全稳定、生物相容性高等特点, 是一种优良的成膜基质材料, 广泛用于食品的涂膜保鲜处理^[13-17]。目前, 关于 ERY 和 SA 共混制备复合膜用于抑制马铃薯块茎绿变的研究鲜见报道。

本文拟以 SA 和 ERY 为原料, 丙三醇 (Gly) 为增塑剂, 采用共混法制备 SA-ERY 复合膜, 并通过单因素实验优化制备工艺。基于 SEM、TGA、UV-Vis 和力学测试, 考察制备条件对 SA-ERY 复合膜物性、机械性能和光学特性的影响, 以及对水蒸气、氧气和二氧化碳透过性能的影响, 通过马铃薯块茎的光照处理实验, 探究 SA-ERY 复合膜对马铃薯块茎绿变的抑制效果与作用。以期为马铃薯绿变防控提供参考。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

SA, 化学纯, 天津市永大化学试剂有限公司; Gly, 分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司; ERY, 食品级, 上海鑫泰实业有限公司; 无水氯化钙, 分析纯, 廊坊纳科新材料技术有限公司; 氢氧化钾, 分析纯, 汕头市西陇化工厂有限公司; 碳酸钙, 分析纯, 天津市光复科技发展有限公司; 乙醇 (质量分数 95%), 分析纯, 天津市天力化学试剂有限公司; 氯化钠, 分析纯, 东光县金达化工有限公

司;实验用水为蒸馏水,自制;2024 年种植的马铃薯(晋薯 7 号),购自晋中惠隆农产品贸易市场。

L5S 型紫外-可见分光光度计(UV-Vis),上海仪电分析仪器有限公司;TA.XT plus 型物性测试仪,厦门超技仪器设备有限公司;Awt-chy01 型数显千分测厚规,浙江胜达工具有限公司;NH300 型高品质电脑色差仪,广东三恩时智能科技有限公司;JSM-7500F 型扫描电子显微镜(SEM),日本 JEOL;VERTEX 70 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),德国 Bruker 公司;TGA/DSC 型热重分析仪(TGA),瑞士 Mettler Toledo 公司;Ultima IV X 射线粉末衍射仪(XRD),日本 Rigaku 公司。

1.2 方法

参考文献[18]方法并稍作修改,通过共混制备 SA-ERY 复合膜。

第 1 阶段:将 2.00 g SA 和 0.04 g 氯化钙溶于 100 mL 蒸馏水中,于 60 °C 搅拌 20 min。再加入 0.60 g Gly 增塑剂,继续搅拌 20 min,得到的 SA 基质溶液,其中,SA 和 Gly 加入量(以所加蒸馏水总质量计,下同)分别为 2.00%和 0.60%。

第 2 阶段:在 SA 基质溶液中加入 0.10 g ERY,于 60 °C 搅拌 30 min,得到 SA-ERY 复合溶液,其中,ERY 加入量(以所加蒸馏水总质量计,下同)为 0.10%。将所得复合溶液密封后,室温静置 1 h,以消除气泡。量取 25 mL 复合溶液,倒入 10 cm×10 cm 的培养皿中,室温干燥 12 h,制得 SA-ERY 复合膜记为 2SA-0.1ERY/0.6Gly。图 1 为 SA-ERY 复合膜的制备流程示意图。

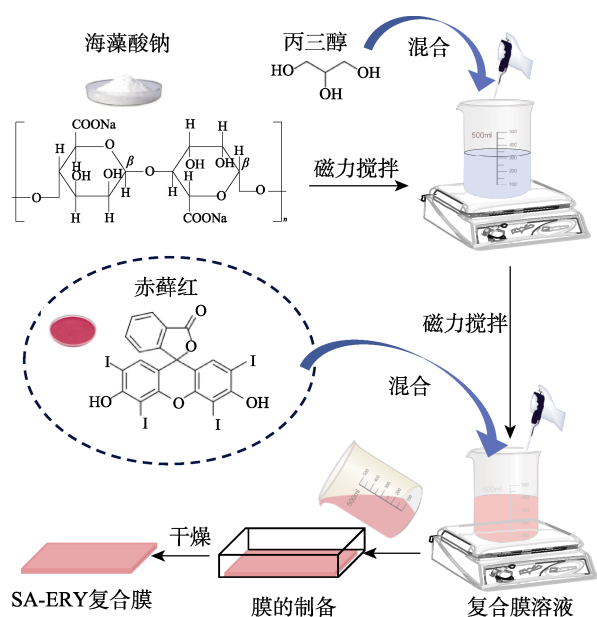


图 1 SA-ERY 复合膜的制备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation of SA-ERY composite film

按照 2SA-0.1ERY/0.6Gly 的制备方法和步骤,固定 Gly 和 ERY 加入量分别为 0.80%和 0.30%,调整 SA 加入量分别为 1.50%、1.75%、2.00%、2.25%和 2.50%,制备的 SA-ERY 复合膜分别记为 1.5SA-0.3ERY/0.8Gly、1.75SA-0.3ERY/0.8Gly、2SA-0.3ERY/0.8Gly、2.25SA-0.3ERY/0.8Gly 和 2.5SA-0.3ERY/0.8Gly。

按照 2SA-0.1ERY/0.6Gly 的制备方法和步骤,固定 SA 和 ERY 加入量分别为 2.00%和 0.30%,调整 Gly 加入量分别为 0.40%、0.60%、0.80%、1.00%和 1.20%,制备的 SA-ERY 复合膜分别记为 2SA-0.3ERY/0.4Gly、2SA-0.3ERY/0.6Gly、2SA-0.3ERY/0.8Gly、2SA-0.3ERY/1.0Gly 和 2SA-0.3ERY/1.2Gly。

按照 2SA-0.1ERY/0.6Gly 的制备方法和步骤,固定 SA 和 Gly 加入量分别为 2.00%和 0.60%,调整 ERY 加入量分别为 0.10%、0.20%、0.30%、0.40%和 0.50%,制备的 SA-ERY 复合膜分别记为 2SA-0.1ERY/0.6Gly、2SA-0.2ERY/0.6Gly、2SA-0.3ERY/0.6Gly、2SA-0.4ERY/0.6Gly 和 2SA-0.5ERY/0.6Gly。

按照 2SA-0.1ERY/0.6Gly 的制备方法和步骤,过程中不加入 ERY,制备的薄膜记为 SA 膜。

1.3 结构表征与性能测试

膜厚度测试:参考文献[19]方法并稍作改进。使用数显千分测厚规对复合膜进行厚度测定。样品采用五点取样法取样,记录厚度数据并计算算数平均值。

水分含量(MC):参考文献[20]的方法进行测定。将复合膜样品裁成 20 mm×20 mm 大小并称重记为 M_0 (g),再将样品放置在 100 °C 的烘箱内干燥 24 h,称重,记为 M_1 (g),按式(1)计算复合膜的水分含量(MC)。

$$MC/\% = (M_0 - M_1) / M_0 \times 100 \quad (1)$$

机械性能测试:参考文献[21]方法,采用物性测试仪测定复合膜的机械性能,包括抗拉伸强度和断裂伸长率。将复合膜裁切为 10 mm×80 mm 的标准条状试样,夹具初始间距 40 mm,拉伸速率 0.2 mm/s,触发力 0.05 N,测试环境温度为(25±1) °C。根据式(2)和(3)分别计算复合膜的抗拉伸强度(MPa)和断裂伸长率(%)。

$$\text{抗拉伸强度} = F_{\max} / (A \times B) \quad (2)$$

$$\text{断裂伸长率}/\% = \Delta L / L_0 \times 100 \quad (3)$$

式中: $F_{\max}$ 为样品断裂时所承受的最大力,N; A 为样品厚度,mm; B 为样品宽度,mm; ΔL 为样品断裂时的长度与初始长度的差值,mm; L_0 为样品的初始长度,mm。

水蒸气透过率测试:参考文献[22]方法并稍作修改。将 3 g 无水氯化钙装入试管(内径 15 mm,

高 100 mm), 用待测膜密封管口, 记录封口试管的初始质量; 将封口试管置于盛有 300 mL 饱和氯化钾溶液的 6 L 密闭容器中, 于 25 °C 恒温放置 3 d, 取出封口试管记录其质量。根据式 (4) 计算膜的水蒸气透过率 [WVTR, kg/(d·m²)]。

$$\text{透过率} = (m_1 - m_0) / (t \times S) \quad (4)$$

式中: m_0 为封口试管的初始质量, kg; m_1 为封口试管的最终质量, kg; t 为平衡时间, d; S 为试管口的面积, m²。

气体阻隔性能测试: 参照文献[23]方法测定氧气或二氧化碳透过率。分别将 3 g 脱氧剂或无水氢氧化钾装入试管中, 用待测膜密封管口, 记录封口试管的初始质量。将试管置于 25 °C、相对湿度 75% 的恒温恒湿培养箱中平衡 1 d, 再次记录试管质量。根据式 (4) 计算氧气透过率 (%) 或二氧化碳透过率 [kg/(d·m²)]。

SEM 测试: 样品喷金, 低位二次电子 (LEI) 模式, 工作电流 20 μA, 电子加速电压 15.0 kV, 每个样品至少选取 5 个不同视场进行拍摄以确保数据可靠性^[24]。

透光率测试: 采用 UV-Vis 测定复合膜的透光性能。将待测膜样品精确裁切为 1 cm×4 cm 的长方形试样, 置于样品室中, 在波长 200~800 nm 范围内进行全波段扫描 (扫描间隔 1 nm), 以 SA 膜作为参比, 测定各波长下 SA-ERY 复合膜的透光率 (%) ^[24]。

TGA 测试: 氮气气氛, 流速 20 mL/min, 升温速率 10 °C/min, 温度范围 20~600 °C^[23]。

XRD 测试: 靶材 Cu, 管电压 40 kV, 管电流 40 mA, K_{α} 射线波长 0.1541 nm, 扫描速率 2 (°)/min, 扫描范围 5°~60°^[25]。

FTIR 测试: KBr 压片法, 波数范围 4000~400 cm⁻¹, 分辨率 4 cm⁻¹, 扫描次数 32 次^[26]。

1.4 马铃薯块茎的光照处理实验

选取大小均匀的晋薯 7 号马铃薯块茎 (每个约 150 g, 取 90 个), 洗净后用质量浓度为 20 mg/L 的氯化钠水溶液浸泡 1 min, 取出后擦干块茎表面的水分, 备用。按图 2 对马铃薯块茎进行光照处理。

将一片 SA-ERY 复合膜紧密贴合于特制玻璃箱 (25 cm×20 cm×15 cm) 顶部, 覆盖 1/2 面积 (250 cm²), 对照组玻璃箱顶部不作任何覆盖处理。随后, 将马铃薯块茎放入玻璃箱内。将玻璃箱置于光照培养箱中, 在光照强度 7000 lux、温度 25 °C 和相对湿度 35% 条件下进行 8 h 光照处理。光照系统由控制面板、箱体 (500 mm×450 mm×400 mm) 及恒温恒湿控制系统组成, 工作频率为 50 Hz。光照处理后, 将马铃薯块茎于 4 °C 下避光贮藏 3 d^[27]。分别于贮藏 0 和 3 d 测定块茎的 a^* 值 (红绿色度)

和叶绿素含量。

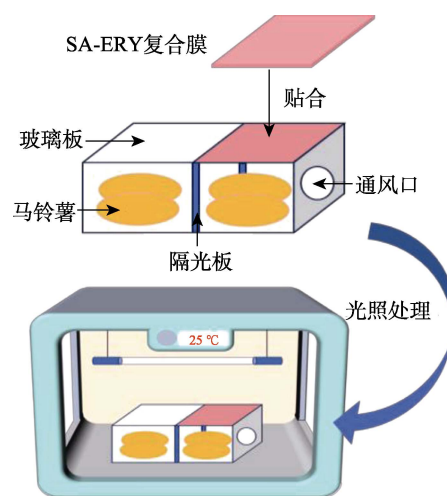


图2 马铃薯块茎的光照处理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light treatment of whole potato tubers

使用色差仪测定块茎顶芽部、中部及基部 3 个部位的 a^* 值。总叶绿素含量的测定参照文献[28]方法并稍作改进。取马铃薯块茎皮层组织约 5 mm 厚的表皮样品 2 g, 加入 6 mL 体积分数为 95% 的乙醇 (下同), 避光浸提 24 h 得到提取液。随后, 在 4 °C、10000 r/min 条件下离心 10 min, 收集上清液并用乙醇定容至 10 mL。用 UV-Vis 分别测定上清液在 645 和 663 nm 处的吸光度, 以乙醇作为空白对照并进行基线调零。根据式 (5) 计算总叶绿素含量 (mg/100 g)。

叶绿素含量 = $(20.21A_{645} + 8.02A_{663}) \times V \times 100 / (1000m)$ (5)
式中: A_{663} 、 A_{645} 分别为样品在 663、645 nm 处的吸光度; V 为提取液总体积, mL; m 为样品质量, g。

2 结果与讨论

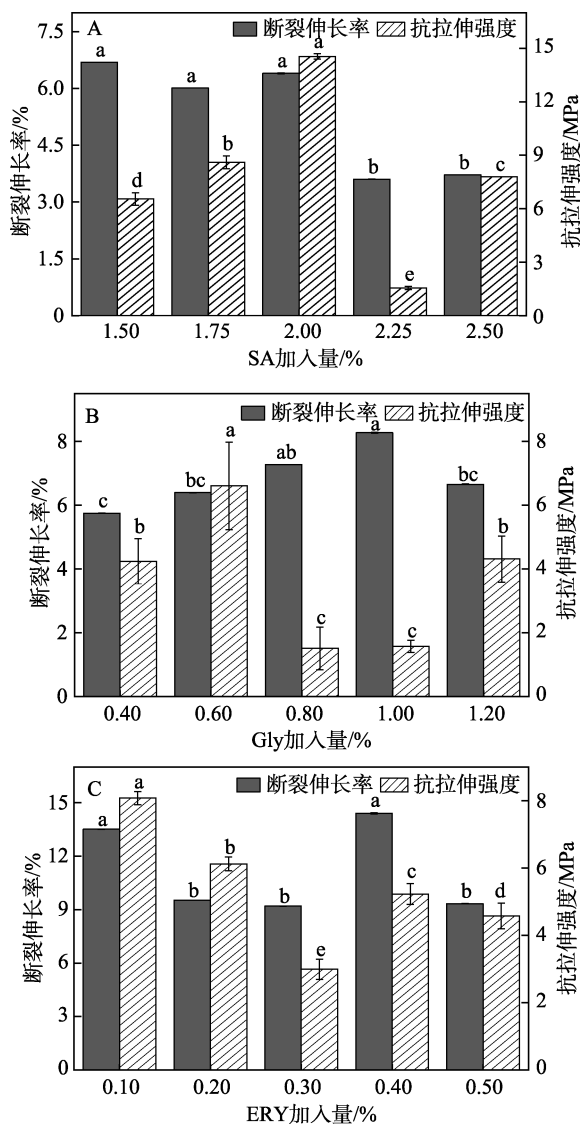
2.1 SA-ERY 复合膜制备工艺优化

图 3 为 SA、Gly 和 ERY 加入量对 SA-ERY 复合膜的机械性能的影响。

从图 3A 可以看出, 当 SA 加入量在 1.50%~2.00% 范围内变化时, SA-ERY 复合膜的断裂伸长率无显著变化 ($P > 0.05$), 表明此时 SA-ERY 复合膜具有相对较好的柔韧性和延展性。当 SA 加入量 $> 2.00\%$ 后, 断裂伸长率显著降低 ($P < 0.05$)。当 SA 加入量在 1.50%~2.00% 范围内变化时, SA-ERY 复合膜的抗拉强度逐渐增加, 当 SA 加入量为 2.00% 时, 2SA-0.3ERY/0.8Gly 的抗拉伸强度显著高于其他 SA-ERY 复合膜 ($P < 0.05$), 继续增加 SA 加入量, 膜的抗拉伸强度显著降低, 表明 SA 加入量过高不利于获得优良机械性能的 SA-ERY 复合膜。这是因为, 膜的机械性能与其微观结构密切相关, 抗拉伸强度主要取决于分子链的机械强度和结晶度, 而断裂伸长率则与分子链的柔韧性直接

相关^[25]。SA 作为线性高分子聚合物,其古罗糖醛酸的羧基(—COOH)在 Ca^{2+} 存在下,通过离子交换反应形成稳定的交联网络结构^[29],因此,适当 SA 加入量(2.00%)可同时提升 SA-ERY 复合膜的抗拉伸强度和断裂伸长率。

从图 3B 可以看出,随着 Gly 加入量的增加,SA-ERY 复合膜的断裂伸长率呈现先升后降的趋势,当 Gly 加入量为 1.00% 时,2SA-0.3ERY/1Gly 的断裂伸长率最大,为 8.27%,表现出良好的韧性。而 Gly 加入量为 0.60% 时,2SA-0.3ERY/0.6Gly 的抗拉伸强度显著高于其他复合膜 ($P < 0.05$),为 6.60 MPa。这是因为, Gly 作为增塑剂,通过插入聚合物分子链间减弱分子间作用力,在提高膜断裂伸长率的同时会降低抗拉伸强度^[30]。



柱状图上不同小写字母代表数据间差异显著 ($P < 0.05$), 下同
图 3 SA (A)、Gly (B) 和 ERY (C) 加入量对 SA-ERY 复合膜机械性能的影响

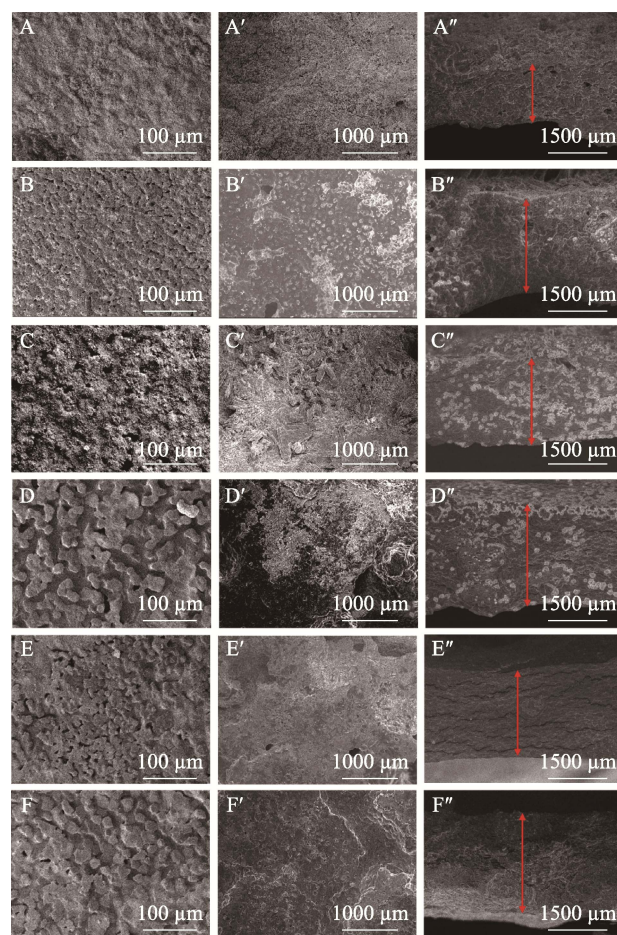
Fig. 3 Effects of addition amount of SA (A), Gly (B) and ERY (C) on mechanical properties of SA-ERY composite films

从图 3C 可以看出,当 ERY 加入量为 0.10% 和 0.40% 时,2SA-0.1ERY/0.6Gly 和 2SA-0.4ERY/0.6Gly 的断裂伸长率显著高于其他 SA-ERY 复合膜 ($P < 0.05$),表现出较好的柔性,但抗拉伸强度随 ERY 加入量的增加大致呈降低趋势,当 ERY 加入量为 0.10% 时,复合膜的抗拉伸强度最大,为 8.08 MPa。这是因为,ERY 分子含 —C=O 、 —OH 等极性基团,既能与水分子相互作用,又能通过氢键与 SA 分子结合,这种协同作用在其加入量为 0.10% 时可显著改善 SA-ERY 复合膜的机械性能,同时提升断裂伸长率和抗拉伸强度。

综上所述,制备 SA-ERY 复合膜的最佳工艺条件为 SA、Gly 和 ERY 加入量分别为 2.00%、0.60% 和 0.10%,后续性能测试都按此条件制备复合膜。

2.2 SA-ERY 复合膜物性分析

图 4 为 SA 膜和 SA-ERY 复合膜的 SEM 图。



A、A'、A''—SA 膜; B、B'、B''—2SA-0.1ERY/0.6Gly; C、C'、C''—2SA-0.2ERY/0.6Gly; D、D'、D''—2SA-0.3ERY/0.6Gly; E、E'、E''—2SA-0.4ERY/0.6Gly; F、F'、F''—2SA-0.5ERY/0.6Gly
图 4 SA 和 SA-ERY 复合膜在不同放大倍数下的 SEM 图
Fig. 4 SEM images of SA and SA-ERY composite films at different magnifications

从图 4 可以看出,SA 膜和 SA-ERY 复合膜表面均有较大的团聚体和颗粒,表面略显粗糙。ERY 加

入量 (0.30%~0.50%) 较高会引起分子排列不均匀, 导致 SA-ERY 复合膜表面粗糙程度增加(图 4D~F), 而 ERY 加入量 (0.10%) 低的 SA-ERY 复合膜粗糙程度较低, 表面更加平坦(图 4B), 呈现平整光滑的均匀致密结构。ERY 加入量为 0.20% 的 SA-ERY 复合膜呈现中等粗糙度, 其表面颗粒分布介于 B 组和 D 组之间(图 4C), 结果表明 SA-ERY 复合膜已引发轻微聚集, 但尚未形成显著凹凸结构。这是因为, 少量 ERY 能较好地分散在 SA 基体中, 并与分子链有效相互作用。随着 ERY 加入量的增加, 其在 SA 体系中溶解饱和, 过量 ERY 导致颗粒显著增多并发生团聚, 最终形成表面凹凸不平的不规则形貌结构^[31]。表面平滑致密的复合膜因其分子链规整排列和强分子间作用力, 表现出优异的机械性能。相反地, 表面存在的颗粒和孔隙会形成力学薄弱区域, 在外力作用下导致应力集中于颗粒-基体界面及孔隙边缘, 从而引发裂纹萌生与扩展, 最终造成 SA-ERY 复合膜抗拉伸强度和断裂伸长率的显著下降^[32]。此外, SA 膜的横截面(图 4A") 可见明显孔洞和层状裂隙, 表明其内部结构疏松缺陷。而与 SA 膜相比, SA-ERY 复合膜的横截面粗糙度降低, 表明其结构更加均匀和紧凑, 各组分之间表现出良好的相容性^[33]。当 ERY 加入量较低 (0.10%~0.30%) 时, 其在 SA 分子网络中的分散性较差, 易发生相分离并形成局部聚集颗粒。这种不均匀分布现象导致 SEM 图中横截面出现明显的裸露白点区域(图 4B"~D"), 反映出 ERY-SA 复合膜在低 ERY 加入量下的微观相分离特征。然而, ERY 加入量 (0.40%~0.50%) 较高在 SA 分子网络中形成紧密填充结构, 导致分子堆积密度显著增加。这种高密度堆积体系在干燥过程中会产生较大的体积收缩应力, 从而加剧材料内部缺陷的形成, 最终促进宏观裂纹的产生。

图 5 为 SA-ERY 复合膜的厚度与水分含量测定结果。

从图 5A 可以看出, SA 膜与 SA-ERY 复合膜的厚度为 0.049~0.085 mm。除 2SA-0.3ERY/0.6Gly 外, 其余 SA-ERY 复合膜厚度均显著大于 SA 膜 ($P < 0.05$)。其中, ERY 加入量为 0.40% 的 2SA-0.4ERY/0.6Gly 厚度最大, 为 0.085 mm。厚度 < 0.3 mm 的可食性薄膜能有效阻隔环境因素影响^[34], 因此, SA-ERY 复合膜适用于抑制马铃薯块茎贮藏期的绿变现象。

从图 5B 可以看出, ERY 加入量为 0.10%~0.40% 显著降低了复合膜的水分含量 ($P < 0.05$), 而 ERY 加入量为 0.50% 可降低复合膜的水分含量, 但不显著 ($P > 0.05$), 证实了 ERY 与 SA 分子在适宜加入量

范围内具有良好的相容性。这种相容性源于 SA 分子中—COOH 和吡喃糖 O 原子与 Ca^{2+} 形成的五元螯合结构^[35], 以及 ERY 分子中—C=O 和—OH 与 Ca^{2+} 的结合作用。值得注意的是, ERY 与 SA 的生物相容性呈现含量依赖性, 这是调控复合膜微观结构和水分含量的关键因素之一。

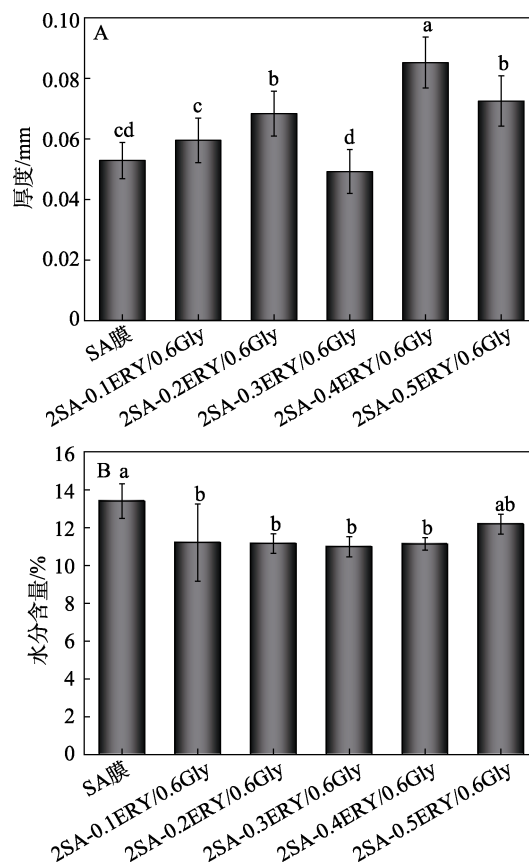


图 5 ERY 加入量对 SA-ERY 复合膜厚度 (A) 和水分含量 (B) 的影响

Fig. 5 Effect of addition amount of ERY on thickness (A) and moisture content (B) of SA-ERY composite films

2.3 SA-ERY 复合膜的水蒸气和气体阻隔性能分析

图 6 为 SA-ERY 复合膜的水蒸气、氧气、二氧化碳透过率测定结果。

水蒸气透过率是评价膜性能的重要指标之一, 可以反映复合膜对水蒸气的阻隔性能, 水蒸气透过率越低, 说明膜对水蒸气阻隔性能越好。从图 6A 可以看出, SA-ERY 复合膜的水蒸气透过率均低于 SA 膜, 其中, 2SA-0.1ERY/0.6Gly、2SA-0.3ERY/0.6Gly 和 2SA-0.5ERY/0.6Gly 与 SA 膜差异显著 ($P < 0.05$)。这种阻湿性能的提升源于 ERY 分子中的—OH 与 Ca^{2+} 的配位作用, 以及其与 SA 分子中—OH/—COOH 间的氢键网络形式有关^[36], 这些分子间作用力通过限制聚合物链段运动而有效抑制了水分子的迁移扩散。

从图 6B 和 C 可以看出, SA-ERY 复合膜在气体阻隔性能方面, 其氧气透过率随 ERY 加入量的增加

呈现先升高后降低的趋势(图 6B), 除 2SA-0.1ERY/0.6Gly 外均显著高于 SA 膜 ($P < 0.05$), 这种含量依赖性变化可能与 ERY 和 SA 交联程度有关; 而 SA-ERY 复合膜二氧化碳透过率在各膜间(图 6C)未表现出显著差异 ($P > 0.05$), 说明 ERY 加入量对 CO_2 阻隔性能影响有限。

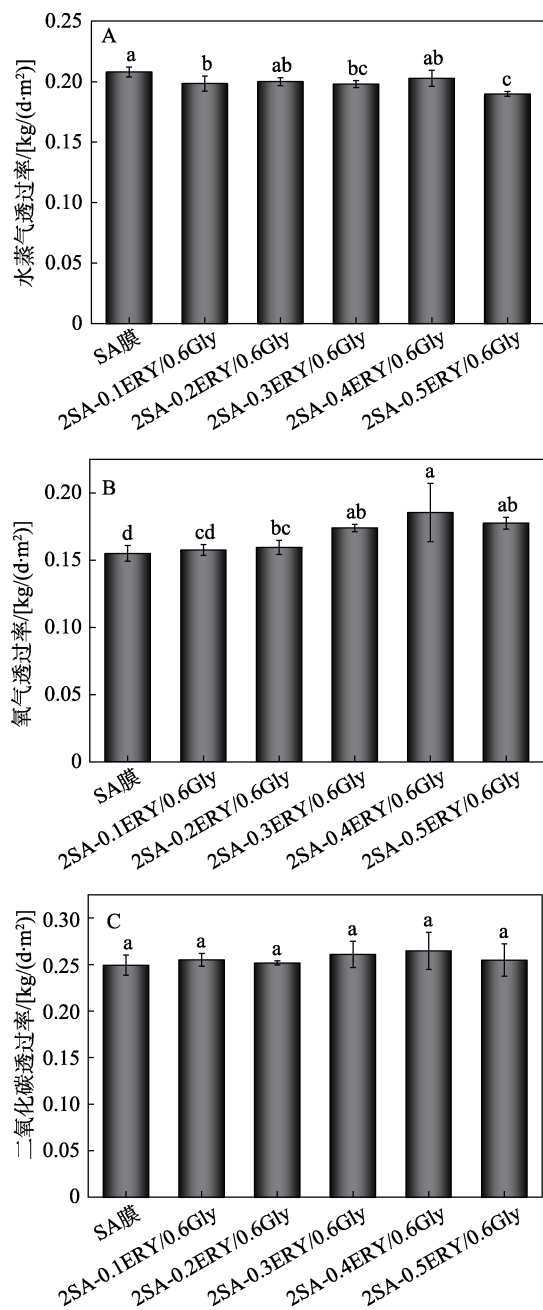


图 6 ERY 加入量对 SA-ERY 复合膜水蒸气 (A)、氧气 (B)、二氧化碳 (C) 透过率的影响

Fig. 6 Effects of addition amount of ERY on transmission rates of water vapor (A), oxygen (B) and carbon dioxide (C) of SA-ERY composite films

2.4 SA-ERY 复合膜的热性能分析

图 7 为 SA-ERY 复合膜的 TG 和 DTG 曲线。

热重分析可反映高分子材料的热稳定性, 评价材

料在加热过程中的分解温度和质量损失情况。从图 7 可以看出, 在 20~600 °C 范围内, SA 膜与 SA-ERY 复合膜具有相似的热分解模式。样品呈现出 3 个阶段的热分解: 第一阶段的失重在 30~150 °C 之间, 主要归因于 SA 膜和 SA-ERY 复合膜中结合水的蒸发^[37]; 第二阶段的失重发生在 150~300 °C 范围内, 所有膜的质量损失均显著增加, 这主要与 SA、ERY 和 Gly 骨架成分的降解有关^[38]。其中, SA 膜和 2SA-0.1ERY/0.6Gly 在此阶段显示出最高的失重率 (40.1%), 而其余复合膜的失重率均显著低于 SA 膜 (图 7A), 表明 ERY 的引入有效提升了材料的热稳定性。值得注意的是, 2SA-0.4ERY/0.6Gly 在 600 °C 时的残炭量达到 60.8%, 为所有样品中的最高值。DTG 曲线分析进一步显示, 随着 ERY 加入量从 0.1% 增加到 0.5%, SA-ERY 复合膜在 200~300 °C 关键温度区间的热分解行为发生显著变化 (图 7B), 具体表现为 DTG 峰的位置、强度和形状均出现明显改变, 这直接证实了 ERY 的加入量会显著影响复合膜组分间的相互作用。

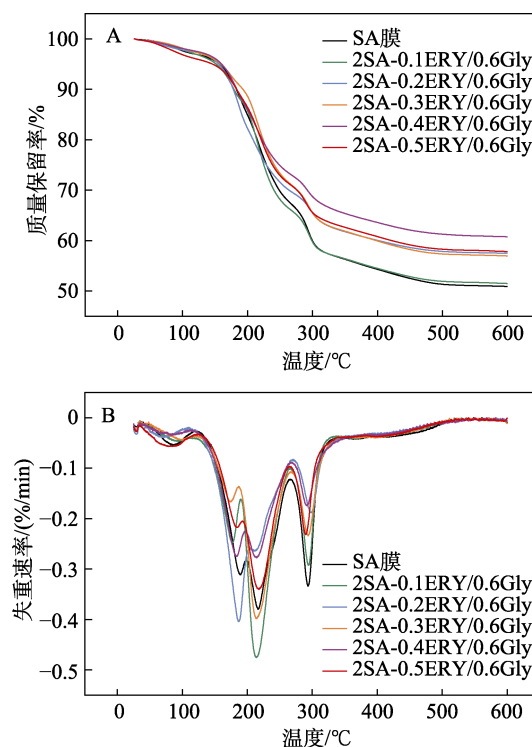


图 7 SA 膜和 SA-ERY 复合膜的 TG (A) 和 DTG (B) 曲线
Fig. 7 TG (A) and DTG (B) curves of SA film and SA-ERY composite films

从图 7 还可以看出, SA-ERY 复合膜的热稳定性与其机械性能存在相关性。当 ERY 加入量为 0.40% 时, 分子间相互作用的增强不仅显著提高了复合膜的热稳定性, 同时有力改善了其机械性能 (图 3C); 然而, 当 ERY 加入量偏离最佳值 (0.40%) 时, 这种分子间相互作用的平衡遭到破坏, 导致膜

的热稳定性和机械性能均出现劣化。结果表明, 复合膜组分子间的氢键网络和整体结构发生了显著改变。证实了优化 ERY 加入量对于提升 SA-ERY 复合膜综合性能的关键作用。

2.5 SA-ERY 复合膜的光学性能分析

图 8 为 SA-ERY 复合膜的 UV-Vis 吸收光谱。

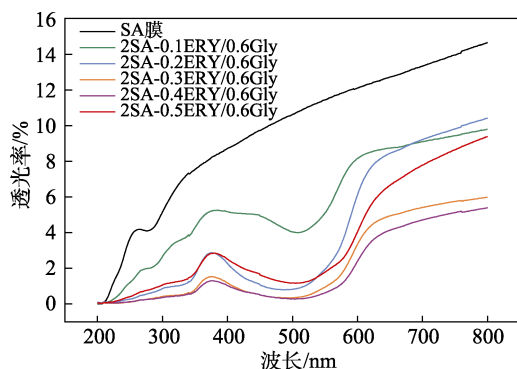


图 8 SA 膜和 SA-ERY 复合膜的 UV-Vis 吸收光谱

Fig. 8 UV-Vis absorption spectra of SA film and SA-ERY composite films

从图 8 可以看出, 在 200~800 nm 的紫外-可见光范围内, SA-ERY 复合膜的透光率要低于 SA 膜。另外, 随着 ERY 加入量的增加, SA-ERY 复合膜在波长 450~550 nm 范围内的 UV-Vis 吸收光谱呈 U 型, 表明复合膜对蓝光具有较好的吸收性和阻隔性能^[39]。SA-ERY 复合膜对蓝光的吸收效果与 ERY 加入量密切相关, 但二者并非简单的线性关系。这一现象可能与不同浓度下 ERY 与 SA 分子间的相互作用差异有关, 反映了二者分子相容性的变化。总体来看, ERY 加入量为 0.4% 的 2SA-0.4ERY/0.6Gly 的透光率最低, 对蓝光或红光的阻隔效果最好。

2.6 SA-ERY 复合膜的 XRD 分析

图 9 为 SA 膜和 SA-ERY 复合膜的 XRD 谱图。

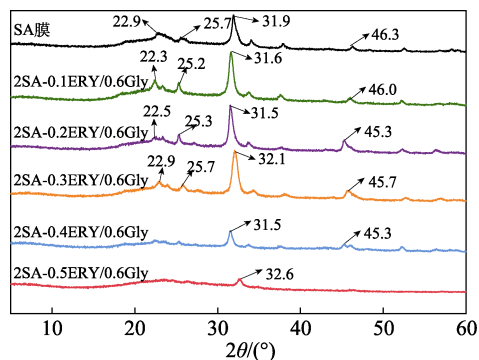


图 9 SA 膜和 SA-ERY 复合膜的 XRD 谱图

Fig. 9 XRD patterns of SA film and SA-ERY composite films

从图 9 可以看出, SA 膜的 XRD 谱图在 $2\theta=22.9^\circ$ 、 25.7° 、 31.9° 和 46.3° 处均显示出明显的结晶衍射峰。其中, $2\theta=22.9^\circ$ 处的衍射峰对应于多糖类

物质的特征晶面^[40]。随着 ERY 加入量的增加, 该特征峰的强度呈现先增强后减弱的趋势, 表明适量加入 ERY 能够促进晶体结构的稳定, 而过量 ERY 会破坏原有的晶体结构。值得注意的是, $2\theta=25.7^\circ$ 、 31.9° 和 46.3° 处结晶峰的出现表明 SA 分子链可能形成了稳定的晶体排列。当 ERY 加入量从 0.10% 增加到 0.30% 时, 这些结晶峰的强度逐渐增强, 表明 ERY 分子与 SA 链之间可能通过氢键或静电作用等分子间相互作用, 促使 SA 分子链发生局部有序排列, 形成更为规整的结晶区域^[41]。这种结晶度的提升通常会伴随材料机械性能 (硬度和强度) 和热稳定性的改善^[42]。然而, 当 ERY 加入量 $>0.40\%$ 后, 衍射峰强度显著减弱甚至消失, 这是因为, 过量的 ERY 会干扰 SA 分子的有序排列, 导致结晶区域被破坏。

2.7 SA-ERY 复合膜的 FTIR 分析

图 10 为 SA、ERY 和 SA-ERY 复合膜的 FTIR 谱图。

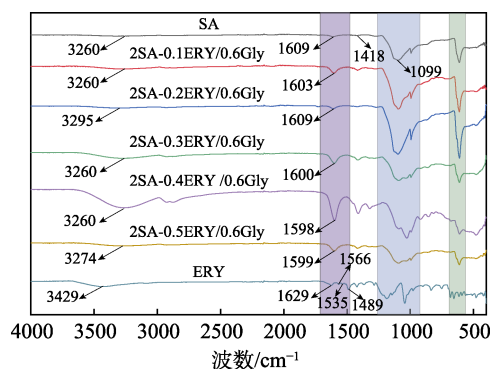


图 10 SA、ERY 和 SA-ERY 复合膜的 FTIR 谱图

Fig. 10 FTIR spectra of SA film and SA-ERY composite films

从图 10 可以看出, SA 膜的 FTIR 谱图主要呈现以下特征: 3260 cm^{-1} 处宽吸收带对应于 O—H 和 N—H 的拉伸振动; 1099 cm^{-1} 处峰归属于 SA 分子中糖苷键 (C—O—C) 的伸缩振动^[43]; 1609 和 1418 cm^{-1} 处峰则分别对应羧酸盐基团 (—COO—) 的不对称和对称伸缩振动^[44]。这些特征峰是 SA 的典型 FTIR 谱图指纹, 也证实其在复合膜中的存在。ERY 的 FTIR 谱图中, 1629 、 1566 、 1535 和 1489 cm^{-1} 处为 ERY 的吸收峰, 这归属于其芳香环骨架 C=C 的伸缩振动^[45]。这些特征峰可作为 ERY 在复合膜中的识别依据。在 SA-ERY 复合膜的 FTIR 谱图中, 可以观察到 SA 和 ERY 的特征吸收峰相互叠加的现象。 1600 cm^{-1} 处峰可能同时包含 SA 羧酸盐基团的振动和 ERY 芳香环的振动, 这种峰位重叠表明, SA 与 ERY 之间存在分子间相互作用^[46], 如氢键或静电作用, 这有助于增强复合膜的稳定性。FTIR 结果显示, 复合膜中未出现新的特征吸收峰, 表明 SA 与

ERY 之间未形成共价键,二者的结合主要依靠氢键和静电相互作用等非共价作用力。其中,氢键的形成能够显著增强分子间作用力,从而提高复合膜的机械强度和韧性^[47];同时,静电相互作用可调控分子链排列,影响复合膜的溶胀特性。这些分子间相互作用的协同效应共同优化了 SA-ERY 复合膜的综合性能。

2.8 SA-ERY 复合膜对马铃薯块茎绿变的抑制作用分析

图 11 为 SA-ERY 复合膜 (2SA-0.1ERY/0.6Gly) 处理对马铃薯块茎 a^* 值和叶绿素含量的影响。

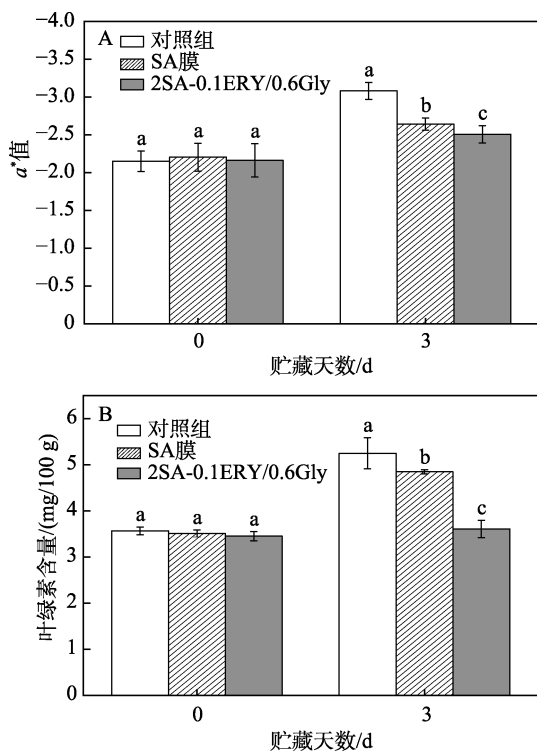


图 11 SA-ERY 复合膜处理对马铃薯块茎 a^* 值 (A) 和叶绿素含量 (B) 的影响

Fig. 11 Effects of SA-ERY composite film treatment on a^* value (A) and chlorophyll content (B) of whole potato tubers

a^* 值作为反映红色 (+) 和绿色 (-) 变化的指标,可有效表征马铃薯块茎的绿变程度。从图 11A 可以看出,贮藏 3 d 时,马铃薯块茎 a^* 值较 0 d 均显著降低 ($P < 0.05$),但 SA-ERY 复合膜组显著高于 SA 膜和对照组样品 ($P < 0.05$)。从图 11B 可以看出,贮藏 3 d 时,马铃薯块茎叶绿素含量较 0 d 均显著增加 ($P < 0.05$),但 SA-ERY 复合膜组的叶绿素含量 (3.61 mg/100 g) 显著低于 SA 膜 (4.85 mg/100 g) 和对照组 (5.25 mg/100 g) ($P < 0.05$),分别降低了 25.57% 和 31.24%,表明 SA-ERY 复合膜能有效抑制马铃薯块茎绿变。这是因为,光照条件是调控马铃

薯块茎绿变的关键环境因子,其作用机制涉及从分子到细胞器的多级响应过程。当块茎组织暴露于光照条件下,光信号通过激活植物光受体系统,诱导淀粉体向叶绿淀粉体转化,导致叶绿素的积累和绿变现象的发生^[48]。蓝光 (450~470 nm) 和红光 (660~680 nm) 通过激活植物光受体系统,显著上调叶绿素生物合成途径中原叶绿素酸酯氧化还原酶 (POR)、镁螯合酶 H 亚基基因 (CHLH) 等关键酶基因的表达式^[2]。值得注意的是,蓝光诱导叶绿素合成的效率可达红光的 3 倍^[3]。

综上所述,SA-ERY 复合膜通过其独特的光谱选择性吸收特性发挥抗绿变作用:ERY 分子在 500~550 nm 波段具有特征吸收峰,与 SA 复合后,在 450~550 nm 形成明显的 U 型吸收带 (图 8),显著增强了体系对蓝光的吸收能力。这种选择性光吸收特性有效阻断了光信号转导途径,使马铃薯块茎叶绿素合成受到显著抑制,从而实现对马铃薯绿变现象的有效控制。然而,正如前所述,SA 膜与 SA-ERY 复合膜在微观结构上存在显著差异 (图 4),这种结构差异可能通过影响 O_2/CO_2 等气体的吸附-解吸平衡而调控块茎组织的呼吸代谢,进而影响马铃薯贮藏过程中的品质变化。

3 结论

(1) 通过单因素实验优化,得到 SA-ERY 复合膜最佳制备工艺为 SA、Gly 和 ERY 加入量分别为 2.00%、0.60% 和 0.10%。

(2) ERY 加入量影响 SA-ERY 复合膜的表面特性,较低加入量 (0.10%~0.30%) 会导致 SA-ERY 复合膜的微观相分离,高加入量 (0.30%~0.50%) 会导致分子堆积密度显著增加,促进宏观裂缝的产生。

(3) ERY 加入量会增加 SA-ERY 复合膜的厚度,降低其水分含量。ERY 分子中的 —OH 与 Ca^{2+} 的配位作用,以及其与 SA 分子中 —OH/—COOH 间的氢键网络可以限制聚合物链段运动,有效抑制水分子的迁移扩散。ERY 加入量会显著影响 SA-ERY 复合膜的氧气阻隔性能,但对其二氧化碳阻隔性能影响不显著。

(4) SA-ERY 复合膜的热稳定性与其机械性能存在相关性。当 ERY 加入量为 0.40% 时,分子间相互作用的增强不仅显著提高了 SA-ERY 复合膜 (2SA-0.4ERY/0.6Gly) 的热稳定性,同时有力改善了其机械性能。

(5) SA-ERY 复合膜 (2SA-0.4ERY/0.6Gly) 对蓝光吸收显著增强。较低加入量 (0.10%~0.30%) ERY 会通过分子间作用导致 ERY-SA 复合膜 SA 结

晶度增加。

(6) 贮藏 3 d 时, 2SA-0.1ERY/0.6Gly 复合膜使马铃薯块茎叶绿素含量较 0 d 显著增加, 但 SA-ERY 复合膜组的叶绿素含量显著低于 SA 膜组和对照组, 分别降低了 25.57% 和 31.24%, 证实其通过阻隔蓝光有效抑制绿变的作用机制。

本文制备的 SA-ERY 复合膜, 相较于传统 SA 膜, 在机械性能、光学特性和保鲜效果方面均获得显著提升, 但气体阻隔性能仍有待改进。后续研究中, 要分析不同复合膜的孔径分布特征, 建立微孔参数与马铃薯块茎贮藏品质指标的定量关系模型, 以系统阐明膜结构调控采后生理的分子机制。

参考文献:

- [1] BANG Y J, SHANKAR S, RHIM J W. Preparation of polypropylene/poly(butylene adipate-coterephthalate) composite films incorporated with melanin for prevention of greening of potatoes[J]. Packaging Technology and Science, 2020, 33(5): 1-9.
- [2] OKAMOTO H, DUCREUX L J M, ALLWOOD J W, *et al.* Light regulation of chlorophyll and glycoalkaloid biosynthesis during tuber greening of potato *S. tuberosum*[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 753.
- [3] TANIOS S, EYLES A, TEGG R, *et al.* Potato tuber greening: A review of predisposing factors, management and future challenges[J]. American Journal of Potato Research, 2018, 95: 248-257.
- [4] TANIOS S, EYLES A, CORKREY R, *et al.* Quantifying risk factors associated with light induced potato tuber greening in retail stores[J]. PLoS One, 2020, 15(9): e0235522.
- [5] DHALSAMANT K, SINGH C B, LANKAPALLI R. A review on greening and glycoalkaloids in potato tubers: Potential solutions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(43): 13819-13831.
- [6] EIE T, LARSEN H. The effect of packaging light barrier on greening and solanine formation in *Sava* cultivar potatoes (*Solanum tuberosum* L.) stored at 5 and 15 °C under fluorescent light[C]//18th IAPRI World Packaging Conference (第 18 届国际包装研究机构协会世界包装大会), 2012: 149-155.
- [7] DONG T T, MENG W Q, SHI J Y, *et al.* Ethanol fumigation combined with and without nitrogen gas delays potato greening and inhibits glycoalkaloids generation under light[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 134: 31-37.
- [8] BANKS N H. Coating and modified atmosphere effects on potato tuber greening[J]. Journal of Agricultural Science, 2009, 105(1): 59-62.
- [9] NYANKANGA R O, MURIGI W W, SHIBAIRO S I. Effect of packaging material on shelf life and quality of ware potato tubers stored at ambient tropical temperatures[J]. Potato Research, 2018, 61(3): 283-296.
- [10] PETERMANN J B, MORRIS S C. The spectral responses of chlorophyll and glycoalkaloid synthesis in potato tubers(*Solanum tuberosum*)[J]. Plant Science, 1985, 39: 105-110.
- [11] KRAVCHENKO O, SUTHERLAND T C, HEYNE B. Photobleaching of erythrosine B in aqueous environment investigation beyond pH[J]. Photochemistry and Photobiology, 2021, 97(2): 240-247.
- [12] TOKUBO L M, ROSALEN P L, DE CÁSSIA O S J, *et al.* Antimicrobial effect of photodynamic therapy using erythrosine/Methylene Blue combination on *Streptococcus mutans* biofilm[J]. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 2018, 23: 94-98.
- [13] IBRAHIM S M, SALMAWI K M E. Preparation and properties of carboxymethyl cellulose(CMC)/sodium alginate(SA) blends induced by gamma irradiation[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2012, 21(2): 520-527.
- [14] WANG S Y, VINCENT T, FAUR C, *et al.* A comparison of palladium sorption using polyethylenimine impregnated alginate-based and carrageenan-based algal beads[J]. Applied Sciences, 2018, 8(3): 264.
- [15] ZHANG J J, HUANG X W, SHI J Y, *et al.* A visual bi-layer indicator based on roselle anthocyanins with high hydrophobic property for monitoring griskin freshness[J]. Food Chemistry, 2021, 355: 129573.
- [16] MEDINA-JARAMILLO C, QUINTERO-PIMIENTO C, DIAZ-DIAZ D, *et al.* Improvement of andean blueberries postharvest preservation using carvacrol/alginate-edible coatings[J]. Polymers, 2020, 12(10): 2352.
- [17] CHEN J X, WU A K, MENG K, *et al.* Effect of thymol/sodium alginate coating on the storage quality of clapp favonite pear fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41: 229-233.
- [18] SENTURK P T T, LINDNER M, ROTHKOPF I, *et al.* The development of a uniform alginate-based coating for cantaloupe and strawberries and the characterization of water barrier properties[J]. Foods, 2019, 8(6): 203.
- [19] LI Y, HU Z X, HUO R B, *et al.* Preparation of an indicator film based on pectin, sodium alginate, and xanthan gum containing blueberry anthocyanin extract and its application in blueberry freshness monitoring[J]. Heliyon, 2023, 9(3): e14421.
- [20] SANUJA S, AGALYA A, UMATHY M J. Synthesis and characterization of zinc oxide-neem oil-chitosan bionanocomposite for food packaging application[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 74: 76-84.
- [21] TANG J J, HUANG C, LIU W J, *et al.* Preparation and characterization of a konjac glucomannan-based bio-nanocomposite film and its application in cherry tomato preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110689.
- [22] YONG H M, WANG X C, ZHANG X, *et al.* Effects of anthocyanin-rich purple and black eggplant extracts on the physical, antioxidant and pH-sensitive properties of chitosan film[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 93-104.
- [23] CHEN S J, ZENG Q Y, TAN X Y, *et al.* Photodynamic antibacterial chitosan/nitrogen-doped carbon dots composite packaging film for food preservation applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 314: 120938.
- [24] ERIHEMU, LYU H, ZHANG C C, *et al.* Formulation development and characterization of sodium alginate cross-linked films incorporated with polydopamine as light-blocking materials: Application on greening inhibition of whole potato tuber[J]. Food Chemistry, 2025, 478: 143747.
- [25] XU L L, ZHANG B, QIN Y H, *et al.* Preparation and characterization of antifungal coating films composed of sodium alginate and cyclolipopeptides produced by *Bacillus subtilis*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 143: 602-609.
- [26] ZHOU W, HE Y X, LIU F, *et al.* Carboxymethyl chitosan-pullulan edible films enriched with galangal essential oil: Characterization and application in mango preservation[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 256: 117579.
- [27] AVALOS-LLANO K R, MARSELLÉS-FONTANET A R, MARTÍN-BELLOSO O, *et al.* Impact of pulsed light treatments on antioxidant characteristics and quality attributes of fresh-cut apples[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 33: 206-215.
- [28] WASSIE M, ZHANG W H, ZHANG Q, *et al.* Effect of heat stress on growth and physiological traits of alfalfa(*Medicago sativa* L.) and a comprehensive evaluation for heat tolerance[J]. Agronomy, 2019, 9(10): 597.
- [29] CHEN H (陈红), XU J (徐静), KANG X M (康晓梅), *et al.*

- Research progress on sodium alginate and its composite materials in biomedicine[J]. *World Sci-Tech R & D (世界科技研究与发展)*, 2010, 32(4): 536-539.
- [30] RUSLI A, METUSALACH M, THAHIR M M. Characterization of carrageenan edible films plasticized with glycerol[J]. *Journal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 2017, 20(2): 219-229.
- [31] CHAUHAN S S, JASRA R V, SHARMA A L. Structural, optical, and pH-stimulus response properties of cresol red immobilized nanocomposite silica films derived by a sol-gel process employing different synthetic routes[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(49): 18863-18872.
- [32] ROOSTAZADEH R, BEHZAD T, KARIMI K. Isolation and characterization of lignin-rich particles as byproducts of bioethanol production from wheat straw to reinforce starch composite films[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 186: 115175.
- [33] ZHU S, UKWATTA R H, CAI X, *et al.* The physiochemical and photodynamic inactivation properties of corn starch/erythrosine B composite film and its application on pork preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 225: 112-122.
- [34] DUONG N T C, UTHAIRATANAKIJ A, LAOHAKUNJIT N, *et al.* Cross-linked alginate edible coatings incorporated with hexyl acetate: Film characteristics and its application on fresh-cut rose apple[J]. *Food Bioscience*, 2023, 52: 102410.
- [35] SOTERA E M, RODRIGUEZ A, GAMBOA-SANTOS J, *et al.* Review characterization of edible films formulated with sodium alginate and low-methoxyl pectin in osmotic dehydration applications[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2021, 56: 4995-5006.
- [36] BALL V. Polydopamine nanomaterials: Recent advances in synthesis methods and applications[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2018, 6: 177.
- [37] PRIYADARSHI R, KIM H J, RHIM J W. Effect of sulfur nanoparticles on properties of alginate-based films for active food packaging applications[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106155.
- [38] HE J M, ZHANG W L, GOKSEN G, *et al.* Functionalized sodium alginate composite films based on double-encapsulated essential oil of wampee nanoparticles: A green preservation material[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 24: 101842.
- [39] GONÇALVES M L L, SANTOS E M, RENNO A C M, *et al.* Erythrosine as a photosensitizer for antimicrobial photodynamic therapy with blue light-emitting diodes-An *in vitro* study[J]. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2021, 35: 102445.
- [40] DIANA M I, SELVASEKARAPANDIAN S, SELVIN P C, *et al.* A physicochemical elucidation of sodium perchlorate incorporated alginate biopolymer: Toward all-solid-state sodium-ion battery[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57: 8211-8224.
- [41] KANG L X, LIANG Q F, CHEN H X, *et al.* Insights into ultrasonic treatment on the properties of pullulan/oat protein/nisin composite film: Mechanical, structural and physicochemical properties[J]. *Food Chemistry*, 2023, 402: 134237.
- [42] MO X Y (莫新迎), GUAN G L (管桂林), WU H (吴昊), *et al.* Preparation and properties of zinc oxide nanoparticles-alginate/chitosan bilayer composite film[J]. *Science and Technology of Food Industry (食品工业科技)*, 2021, 42(9): 214-220.
- [43] NAUTIYAL S, YOKESH M M, ARAVIND S, *et al.* Development and inflammation suppressing effects of prednisolone encapsulated alginate/agarose co-polymeric hydrogel system[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2025, 33(5): 1-14.
- [44] WERONIKA J, MICHAŁ N, KERSTIN L, *et al.* Modulation of physicochemical properties and antimicrobial activity of sodium alginate films through the use of chestnut extract and plasticizers[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 11530.
- [45] ZHANG W B (张文博), LI L (李莉), WANG J N (王佳宁), *et al.* Preparation and anti-counterfeiting application of phosphorescent carbon dots based on pickled skin[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2024, 41(4): 796-803.
- [46] DEY M K, DEVIREDDY R V. Rheological characterization and printability of sodium alginate-gelatin hydrogel for 3D cultures and bioprinting[J]. *Biomimetics*, 2025, 10(1): 28.
- [47] OLGA B, IRINA P, NATALIA G, *et al.* Physicochemical properties and compatibility of sodium alginate and fucoidan solutions[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 243: 125309.
- [48] DOURADO C, PINTO C, BARBA F J, *et al.* Innovative non-thermal technologies affecting potato tuber and fried potato quality[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 88: 274-289.

(上接第 1923 页)

- [14] CUI H, YAN X, MONASTERIO M, *et al.* Effects of various surfactants on the dispersion of MWCNTs-OH in aqueous solution [J]. *Nanomaterials*, 2017, 7(9): 262.
- [15] ZHANG M, LI Q, KAZACHENKO A, *et al.* Crystallization and water cast film formability of birchwood xylans[J]. *Cellulose*, 2023, 30(7): 4623-4638.
- [16] ZHUO J, BOBOKALONOV J, USMANOVA S, *et al.* Effects of peracetic acid delignification on hemicellulose extraction by dimethyl sulfoxide[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222: 119731.
- [17] PENG F, PENG P, XU F, *et al.* Fractional purification and bioconversion of hemicelluloses[J]. *Biotechnology Advances*, 2012, 30(4): 879-903.
- [18] WU X, ZHANG M, SONG T, *et al.* Highly durable and flexible paper electrode with dual fiber Matrix structure for high performance supercapacitors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(11): 13096-13106.
- [19] DIAZ-ARENAS G L, QUOC H H, SINGH R V, *et al.* Unlocking the potential of xylooligosaccharides: Nanofiltration for fractionation of hardwood hydrolysates[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 344: 127151.
- [20] REN X, WU H, XIAO Y, *et al.* Investigating the influence of diverse functionalized carbon nanotubes as conductive fibers on paper-based sulfur cathodes in lithium-sulfur batteries[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2024, 14(6): 484.
- [21] SUN X, CAI M, CHEN L, *et al.* Electrodes of carbonized MWCNT-cellulose paper for supercapacitor[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2017, 19(7): 1-10.
- [22] HAN J Q (韩景泉), LU K Y (陆凯悦), YUE Y Y (岳一莹), *et al.* Synthesis and electrochemical performance of flexible cellulose nanofiber-carbon nanotube/natural rubber composite elastomers as supercapacitor electrodes[J]. *New Carbon Materials (新型碳材料)*, 2018, 33(4): 341-350.
- [23] YANG Z Z (杨中志), WANG A (王傲), MA M Z (马名哲), *et al.* Preparation and electrochemical performance of lignin-based high specific surface area activated carbon[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products (林产化学与工业)*, 2024, 44(3): 37-44.