

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.04.024

张艳平, 王申丽, 任顺成. 聚乙烯醇/纳米银复合薄膜制备及其在生鲜面叶的保鲜应用[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 192-200.

ZHANG Y P, WANG S L, REN S C. Preparation of polyvinyl alcohol /silver nanoparticles film and its application in fresh noodles leaf preservation [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 192-200.

聚乙烯醇/纳米银复合薄膜制备 及其在生鲜面叶的保鲜应用

张艳平, 王申丽✉, 任顺成

(河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 以聚乙烯醇 (PVA) 和蒸馏水为原料, 丙三醇为增塑剂, 采用溶液流延法制备含有不同比例 (0%、1%、2%、4%) 纳米银 (AgNPs) 的 PVA/AgNPs 复合薄膜, 并对薄膜的机械性能、阻隔性和抑菌性进行表征测试, 选择合适的薄膜应用于生鲜面叶保鲜, 研究其对生鲜面叶品质的影响。发现 4% 的 PVA/AgNPs 薄膜具有较好的机械性能、阻隔性和抑菌性, 对金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径达到了 (11.67 ± 0.29) mm。因此选用含量为 4% 的 PVA/AgNPs 薄膜来保鲜生鲜面叶, 测定生鲜面叶在 4 °C 贮藏期间的品质变化。结果表明: 纳米银添加量为 4% 的 PVA/AgNPs 薄膜, 能够明显延缓生鲜面叶中菌落总数的增长, 较好的维持生鲜面叶贮藏过程中的色泽、pH 和酸度, 显著降低生鲜面叶的蒸煮损失, 提高生鲜面叶的品质, 且生鲜面叶中银的迁移量符合国家标准规定。综上所述, PVA/AgNPs 复合薄膜具有良好的抑菌效果, 能够有效维持生鲜面叶的品质, 延长贮藏时间, 为面制品保鲜包装提供了新的思路和方法。

关键词: PVA/AgNPs 薄膜; 抗菌; 面叶保鲜; 品质

中图分类号: TS205.9 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)04-0192-09

网络首发时间: 2024-07-02 09:41:57

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240701.1526.008>

Preparation of Polyvinyl Alcohol /Silver Nanoparticles Film and Its Application in Fresh Noodles Leaf Preservation

ZHANG Yan-ping, WANG Shen-li✉, REN Shun-cheng

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: In this study, polyvinyl alcohol (PVA) and distilled water were used as raw materials, glycerol was used as plasticizer. The PVA/AgNPs composite films with different proportions of silver nanoparticles (0%, 1%, 2% and 4%) were prepared by solution casting method. The mechanical properties, barrier property and antibacterial property of the films were characterized. The suitable film was applied to the fresh-keeping of

收稿日期: 2024-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32202063); 河南工业大学博士基金项目 (2021BS053); 河南省重点研发专项 (22111112000)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (No. 32202063); Doctor Fund Project of Henan University of Technology (No. 2021BS053); National Key Research and Development Project of Henan Province (No. 22111112000)

作者简介: 张艳平, 女, 1993 年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品加工、贮藏与保鲜。E-mail: 1825951754@qq.com

通信作者: 王申丽, 女, 1987 年出生, 博士, 讲师, 研究方向为食品加工、贮藏保鲜、营养与健康。E-mail: shenli.wang@haut.edu.cn

fresh noodles leaf, and its effect on the quality of fresh noodles leaf was studied. The results showed that 4% PVA/AgNPs films had better mechanical properties, barrier properties and antibacterial properties. The diameter of the inhibitory circle against *Staphylococcus aureus* reached 11.67 ± 0.29 mm. PVA/AgNPs film with 4% nano-silver content was selected to preserve fresh noodles leaf and determine the quality changes of fresh noodles leaf during the storage period at 4 °C. The preservation results showed that 4% PVA/AgNPs film could significantly delayed the growth of total colony counts, maintained the color, pH and acidity of the fresh noodles leaf during the storage period. Furthermore, 4% PVA/AgNPs film significantly reduced the cooking loss, improved the quality and the migration of the silver in the fresh noodles leaf, which the national standards. The above study showed that PVA/AgNPs film had the excellent antibacterial effect, and effectively maintained the quality of fresh noodle leaf and prolong the storage time, which can provide a new method for the packaging of noodle products.

Key words: PVA/AgNPs film; antibacterial; noodles leaf preservation; quality

面叶是具有河南特色的食品，主要以生鲜面叶和干面叶为主^[1]。生鲜面叶以其独特的面香味、良好的口感以及丰富的营养等特点而备受欢迎，因此生鲜面叶在市场中具有巨大的潜力。但由于其水分含量较高，营养丰富，极易受到微生物和酶的影响，导致其货架期较短，易腐败变质，严重阻碍了其进一步发展^[2-3]。传统的保鲜方法主要通过改良面粉配比，添加化学防腐剂或采用物理保鲜等方式来实现。但这些方法都存在一定的缺点，比如维持时间较短，增加蒸煮损失，影响生鲜面叶原有的感官和食用品质，同时添加防腐剂容易过量对人体产生毒性危害。

聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 是一种水溶性高分子材料，具有规整的、含有大量羟基的线性分子链结构，在分子内和分子间容易形成大量氢键，是一种强极性材料^[4]。PVA 具有很好的成膜性、水溶性、透光性、生物相容性以及化学稳定性。由 PVA 制成的薄膜，具有很好的韧性和耐磨性，良好的机械性能和阻隔性，安全无毒，价格低廉，且具有很好的生物可降解性。在食品、药品包装等复合材料方面具有独特优势^[5-6]。但是单一的 PVA 薄膜缺乏抗菌效果。

纳米银颗粒 (silver nanoparticles, AgNPs) 是指尺寸在 1~100 nm 的粒子，具有优异的抑菌活性，且不会产生耐药性，被广泛应用于食品包装、生物医药和化妆品等领域。AgNPs 粒径越小，抗菌效果越好^[7-8]，并呈现浓度依赖性^[9]。研究表明

相比于其他金属，银对于微生物毒性较大，但对哺乳动物细胞的毒性较小^[10]。将 AgNPs 添加到高分子聚合材料中不仅可以使薄膜具有良好的抗菌效果，还可以提高薄膜的耐水性^[11]。

Chi 等^[12]制备含有 AgNPs 的聚乳酸 (PLA) 复合薄膜包装芒果，表明该复合薄膜能有效维持芒果的品质，延长采后寿命。Shi 等^[13]制备含有 AgNPs、TiO₂NPs 的聚乙烯基包装材料，它能改善金针菇的外观质量，减少重量损失。Muhammad 等^[14]在活性包装中加入 AgNPs 包装鸡肉，在贮藏过程中可以保持鸡肉的结构、理化性质。目前现有大部分研究的纳米银抗菌薄膜都集中在水果、蔬菜、肉等产品的应用上，极少有在面制品中的应用研究。

本研究将 AgNPs 添加到聚乙烯醇中，制备 PVA/AgNPs 复合薄膜，通过探究不同 AgNPs 的添加量对薄膜的机械性能、阻隔性和抑菌性的影响，选择合适的抗菌复合薄膜应用在面叶保鲜中。通过研究生鲜面叶在贮藏期间的品质变化，为面叶的包装贮藏提供一个新的思路和方法。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

面粉：金沙河集团家用小麦面粉；聚乙烯醇（化学纯）、氢氧化钾、无水氯化钙、还原铁粉、氢氧化钠均为分析纯、琼脂粉（生化试剂）：天津科密欧化学试剂有限公司；LB 肉汤、平板计数琼脂、

马铃薯葡萄糖肉汤均为生化试剂：北京奥博星生物技术有限责任公司；银 Ag 单元素标准溶液：国家有色金属及电子材料分析测试中心。

V-1600-B 紫外可见分光光度计：上海美谱达仪器有限公司；HMJ-D4 型和面机：北京利仁有限公司；压面机：枣阳市宏超食品机械有限公司；WSC-S 型色差仪：上海仪电物理光学仪器有限公司；PHS-3C 型雷磁酸度计：上海仪电科学仪器股份有限公司；TA-XT 2i 型质构仪：英国 Stable Micro Systems 公司；WDW-50 型微机控制电子万能材料试验机：济南永科实验仪器有限公司；Ultimate 3000-ICP RQ 型电感耦合等离子体发射光谱-质谱联用仪（一体机）：赛默飞世尔科技公司。

1.2 PVA/AgNPs 薄膜的制备

采用溶液流延法，称取 10 g PVA 置于烧杯中，然后加入 100 mL 蒸馏水。在 95 °C 的水浴中加热搅拌至 PVA 完全溶解。然后，加入 1 mL 甘油，继续搅拌得到 PVA 溶液。冷却后，在 PVA 溶液中加入适量的浓度为 120 μg/mL 纳米银溶液（体积比为 0%、1%、2%、4%），磁力搅拌确保纳米银粒子没有聚集，混合充分，最后将 PVA 溶液平铺在玻璃板上，室温下静置干燥，得到含有 0%、1%、2%、4% AgNPs 的复合膜。

1.3 PVA/AgNPs 薄膜的性质

1.3.1 PVA/AgNPs 薄膜的微观形态

将制备好的不同 AgNPs 含量的薄膜使用扫描电子显微镜（SEM）观察膜的表面微观结构。

1.3.2 PVA/AgNPs 薄膜的机械性能

将薄膜切成长 10 cm、宽 2 cm 的条状，以 50 mm/min 的拉伸速度进行测试，每组测定 3 次，取平均值。

1.3.3 PVA/AgNPs 薄膜的透光率

将膜裁剪成长 3 cm，宽 1 cm 的长方形，使用紫外分光光度计在 600 nm 处测试薄膜的透光率。

1.3.4 PVA/AgNPs 薄膜的阻隔性

分别称取无水氯化钙、还原铁粉、氢氧化钾于称量瓶中测定薄膜的透湿性、透 O₂ 性和透 CO₂ 性。将 5×5 cm 的薄膜覆盖在瓶口，用橡皮筋固定，记为 m₀；然后放入 25 °C 的恒温恒湿箱 24 h 取出，

称量记为 m₁，不使用薄膜覆盖的敞口称量瓶作为对照。则：

$$\text{薄膜透过性 } Q = \frac{m_1 - m_0}{t \cdot s} \quad \text{式 (1)}$$

公式中：Q 单位为 g/(m·h)；s 为薄膜覆盖面积/m²；m₀ 和 m₁ 为称量前后称量瓶的质量/g；t 为时间/h。

1.3.5 PVA/AgNPs 薄膜的抑菌性

参考李慧等^[15]的方法。采用打孔法测量抑菌圈直径。

1.4 生鲜面叶的制备及保鲜效果测定

将 200 g 面粉和 72 g 水放入搅拌机中，使面团形成均匀的碎屑，在搅拌机中静置醒发 20 min。用压面机延压 10 次压成面片。最后切成长 2 cm，厚 1 cm，宽 2 cm 的菱形面叶。将得到的生鲜面叶包裹在薄膜中，分为三组：分别为 PVA 薄膜组，PVA/AgNPs 薄膜组，以及不使用薄膜的空白组。在 4 °C 的冰箱中保存，并在 0、2、4、6、8、10 天对不同组的生鲜面叶品质进行测定。在制备生鲜面叶之前，用 75% 的酒精擦拭所有实验设备。

1.4.1 菌落总数

菌落总数含量根据 GB 4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》。

1.4.2 色泽

将和好的面团压成与生鲜面叶厚度一样的面片，采用色差计进行检测^[16]。

1.4.3 pH 值和酸度

pH 值的测定参考 Aregbe^[17]的方法，酸度根据 GB5009.239—2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》。

1.4.4 蒸煮特性

蒸煮损失及吸水率按照澎湃等^[18]的方法进行测试。

1.4.5 质构特性

参考 Zhao 等^[19]的方法，并稍作修改。将面叶煮熟捞出，用自来水冷却 10 s，吸去多余水分，然后将面叶放置在质构仪平台上进行测试。

1.4.6 生鲜面叶中的银含量

根据国标 GB5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》。

1.5 数据处理

采用 Excel、SPSS 和 Origin 2022 软件进行数据处理, 所有结果均表示为平均值 \pm 标准误差, 并通过 Duncan 多重检验法检验显著性, 同一指标的不同字母表示结果具有差异性显著 ($P<0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 PVA/AgNPs 薄膜的性质

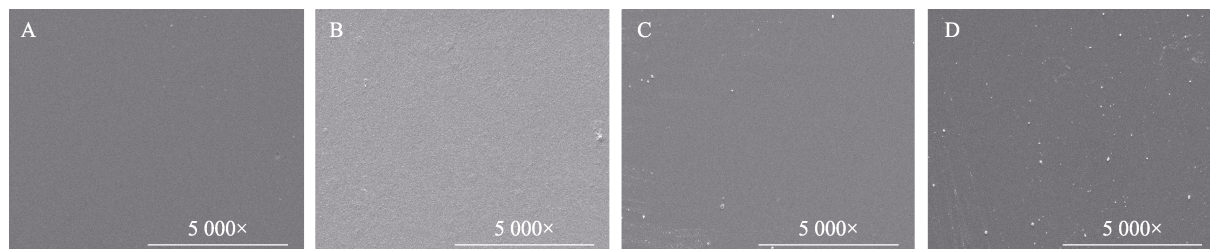
2.1.1 微观结构分析

图 1 为 AgNPs 不同添加量的 PVA/AgNPs 薄膜的表面 SEM 图。图 1-A 为没有添加 AgNPs 的纯 PVA 膜, 可以看出 PVA 膜的表面较为平整光滑, 没有突出的颗粒。随着 AgNPs 添加量的增加,

薄膜的表面出现细小颗粒, AgNPs 含量越高, 颗粒越明显。4% 的添加量的 AgNPs 加入到 PVA 膜中仍能维持薄膜的平整, 没有明显的颗粒团聚和断裂现象。表明 AgNPs 能够较好的分散在 PVA 胶体中, 具有良好的相容性。

2.1.2 机械性能分析

食品包装薄膜的力学性能对分析其抗外力强度和耐久性具有重要意义。薄膜的断裂伸长率 (EB) 和拉伸强度 (TS) 如图 2 所示。随着 AgNPs 含量的增加, EB 显著降低, TS 显著升高。低断裂伸长率和高拉伸强度表示薄膜具有良好的机械性能。因此, AgNPs 的加入可以改善薄膜的机械性能, 这对其包装应用非常有利。

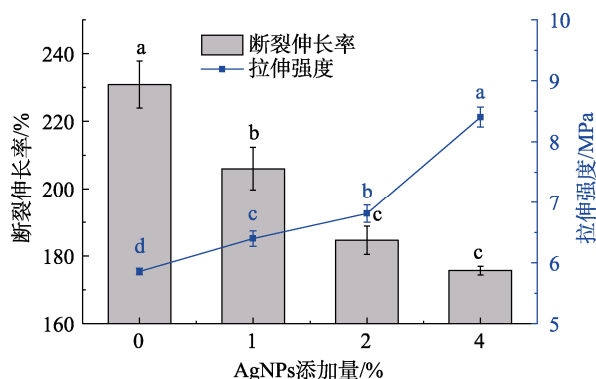


注: A: AgNPs 添加量为 0%; B: AgNPs 添加量为 1%; C: AgNPs 添加量为 2%; D: AgNPs 添加量为 4%。

Note: A: 0% AgNPs; B: 1% AgNPs; C: 2% AgNPs; D: 4% AgNPs.

图 1 PVA/AgNPs 薄膜的形貌

Fig.1 The SEM images of PVA/AgNPs films



注: 图中同一指标不同小写字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$), 下同。

Note: Different lowercase letters in the figure indicate a significant difference in same indicator ($P<0.05$), same as below.

图 2 PVA/AgNPs 薄膜的断裂伸长率和拉伸强度

Fig.2 Elongation at break and tensile strength of PVA/AgNPs films

随着 AgNP 添加量的增加, PVA/AgNPs 薄膜的机械性能增强, 由于 AgNPs 与 PVA 之间具有较高的相容性, 增强 AgNPs 的稳定性, 诱导氢键的形成, 加强体系内的相互作用, 最终提高 PVA/

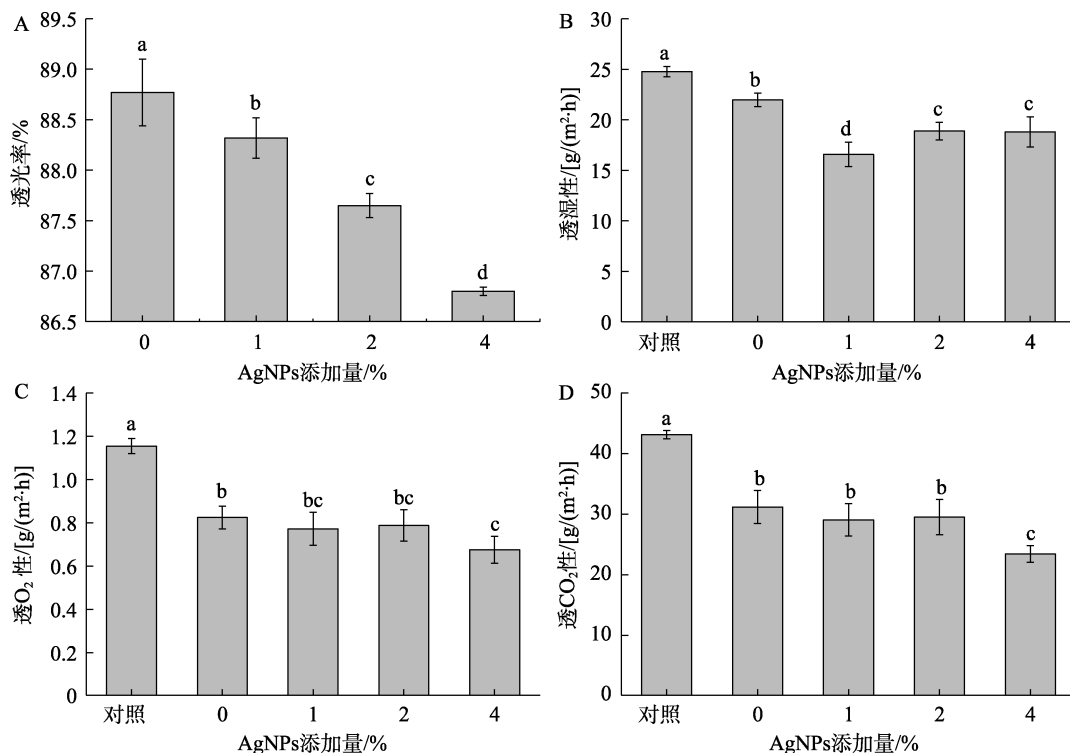
AgNPs 薄膜的拉伸强度^[20]。

2.1.3 透光率及阻隔性分析

薄膜样品在可见光波长 600 nm 处的透光率如图 3-A 所示。随着纳米银粒子的加入, 薄膜的透光率逐渐降低。说明 AgNPs 的加入能够降低薄膜的透光率, 在一定程度上减少光照对食品造成的不良影响。不同添加量的 PVA/AgNPs 薄膜的阻隔性如图 3-BCD 所示。与对照组相比, 薄膜的透湿性、透 O_2 和透 CO_2 性均随着 AgNPs 的增加逐渐降低, 表明纳米银粒子可以增强薄膜的阻隔性, 阻隔空气中的水分, 降低与外部空气的接触, 在一定程度上减少微生物的污染, 降低微生物的侵害^[21]。且添加量为 4% 的 PVA/AgNPs 薄膜的阻隔性能显著高于其他两组。

2.1.4 抑菌性分析

不同含量的 AgNPs 抗菌薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制作用如表 1, 单纯的 PVA 薄



注：A：透光率；B：透湿性；C：透O₂性；D：透CO₂性。

Note: A: light transmittance; B: H₂O permeability; C: O₂ permeability; D: CO₂ permeability.

图 3 PVA/AgNPs 薄膜的透光率和阻隔性

Fig 3. The light transmittance and barrier properties of PVA/AgNPs films

表 1 PVA/AgNPs 薄膜的抑菌圈直径

Table 1 The antibacterial zone diameter of PVA/AgNPs films

材料	抑菌圈直径/mm	
	<i>E.coli</i>	<i>S.aureus</i>
PVA 薄膜	—	—
1% PVA/AgNPs 薄膜	—	9.5±0.5 ^a
2% PVA/AgNPs 薄膜	—	10±0.5 ^a
4% PVA/AgNPs 薄膜	—	11.67±0.29 ^b

注：“—”表示无抑菌圈，不同小写字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$)。

Note: “—” indicates no antibacterial zone, different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$).

膜没有抑菌活性。添加不同含量的 AgNPs 薄膜对大肠杆菌的抑制作用不明显；但对金黄色葡萄球菌具有显著的抑制作用，且添加量为 4% 时的抑菌活性显著高于另外两组。研究表明 AgNPs 薄膜具有抗菌性能，它的抗菌效果主要是由于 AgNPs 的作用。AgNPs 可以从 PVA 胶体中释放破坏细胞膜的完整性，增加细胞膜通透性，导致细胞死亡^[22]。AgNPs 中的 Ag⁺改变蛋白质的结构使其失活^[23]。AgNPs 还可以诱导 ROS 的生成，产生氧化应激反应，引起微生物的氧化损伤，最终造成细菌死亡^[24]。

以上研究结果表明，相比于 1% 和 2% 的添加量，添加量为 4% 的 PVA/AgNPs 薄膜具有更好的阻隔性能和抑菌性能。因此我们选择使用 AgNPs 添加量为 4% 的 PVA/AgNPs 薄膜来包裹生鲜面叶，研究 PVA/AgNPs 薄膜在生鲜面叶中的保鲜应用。

2.2 复合薄膜对生鲜面叶贮藏期间的品质影响

2.2.1 生鲜面叶菌落总数在贮藏期间的变化

微生物的增殖和代谢是大多数食品腐败的主要原因。生鲜面叶在贮藏期间菌落总数的变化如图 4 所示，三组的初始菌落总数基本相同，随着

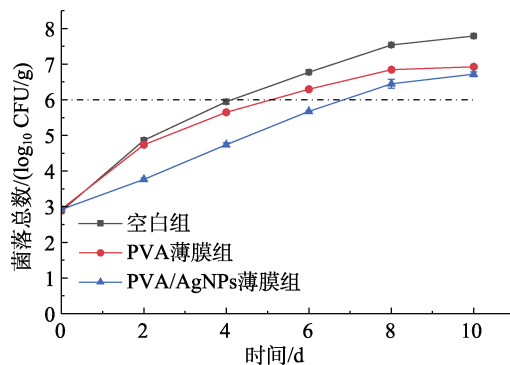


图 4 生鲜面叶菌落总数在贮藏期间的变化

Fig.4 Changes of the Total Plate Count (TPC) of fresh noodles leaf during storage

贮藏时间的延长,三组生鲜面叶中的菌落总数均增加,但 PVA/AgNPs 薄膜组的菌落总数显著低于其他两组。在第 4 天时空白组的菌落总数已达到腐败限值 (10^6 CFU/g) [25],而 PVA/AgNPs 薄膜组在第 7 天达到限值。表明 PVA/AgNPs 薄膜能够抑制生鲜面叶中微生物的生长,延长生鲜面叶的贮藏时间(约 3 d)。

2.2.2 生鲜面叶色泽在贮藏期间的变化

L^* 值的变化可以用来表征新鲜面条的褐变程度,较低的 L^* 值被认为对新鲜面条的褐变更为严重 [26]。每组生鲜面叶在贮存过程中的色泽变化如

表 2 所示。每组生鲜面叶的初始 L^* 、 a^* 、 b^* 值没有显著的区别,随着贮藏时间的延长, L^* 值和 b^* 值减小,生鲜面叶的整体亮度下降,色泽品质下降。但是 PVA/AgNPs 组的生鲜面叶亮度显著高于其他两组,这是由于 PVA/AgNPs 薄膜具有良好的阻隔性能和抗菌性能,减少微生物的侵袭,能在一定程度上维持生鲜面叶的亮度,延缓生鲜面叶发生褐变。

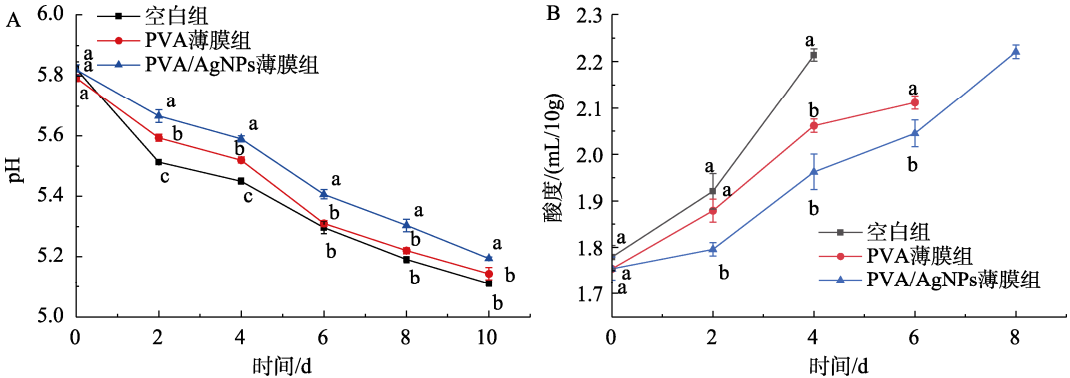
2.2.3 生鲜面叶 pH 和酸度在贮藏期间的变化

生鲜面叶在 4 °C 贮藏时 pH 和酸度的变化如图 5 所示。不同处理组的生鲜面叶初始 pH 值和

表 2 生鲜面叶色泽在贮藏期间的变化
Table 2 Changes of the color of fresh noodles leaf during storage

色度指标	时间/d	空白组	PVA 薄膜组	PVA/AgNPs 薄膜组
L^*	0	97.83±0.45 ^{Aa}	97.70±0.60 ^{Aa}	98.17±0.60 ^{Aa}
	2	90.13±0.91 ^{Ab}	92.23±0.65 ^{Ab}	92.40±2.82 ^{Ab}
	4	87.70±0.70 ^{Ac}	87.90±0.30 ^{Ac}	88.87±0.71 ^{Ac}
	6	85.40±0.20 ^{Bd}	86.47±0.60 ^{ABd}	87.80±1.31 ^{Ac}
	8	80.63±0.74 ^{Ce}	82.63±1.10 ^{Be}	85.17±0.76 ^{Ad}
	10	75.90±0.40 ^{Bf}	76.87±0.35 ^{Bf}	81.40±0.95 ^{Ac}
a^*	0	-1.23±0.04 ^{Aa}	-1.25±0.015 ^{Aa}	17.38±0.14 ^{Af}
	2	-1.89±0.06 ^{Ab}	-1.53±0.35 ^{Aa}	16.93±0.12 ^{Be}
	4	-2.72±0.11 ^{Ac}	-2.59±0.10 ^{Ab}	16.68±0.07 ^{Ad}
	6	-3.02±0.03 ^{Ad}	-2.81±0.05 ^{ABb}	16.14±0.22 ^{Ac}
	8	-3.29±0.02 ^{Ac}	-3.21±0.04 ^{Bc}	15.73±0.05 ^{Bb}
	10	-3.47±0.02 ^{Af}	-3.40±0.03 ^{Bd}	15.39±0.06 ^{Ba}
b^*	0	17.40±0.03 ^{Af}	-1.26±0.01 ^{Aa}	17.40±0.15 ^{Ad}
	2	16.95±0.04 ^{Be}	-1.56±0.10 ^{Ab}	17.29±0.25 ^{Ad}
	4	16.59±0.03 ^{Ad}	-2.36±0.13 ^{Bc}	16.78±0.29 ^{Ac}
	6	15.96±0.07 ^{Ac}	-2.68±0.21 ^{Bd}	16.22±0.05 ^{Ab}
	8	15.66±0.04 ^{Bb}	-3.03±0.02 ^{Ce}	15.91±0.02 ^{Aa}
	10	15.23±0.03 ^{Ca}	-3.28±0.02 ^{Cf}	15.61±0.07 ^{Aa}

注:不同大写字母表示每行的显著性差异 ($P<0.05$),不同小写字母表示每列的显著性差异 ($P<0.05$),下同。
Note: Different uppercase letters indicate significant differences per row ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences per column ($P<0.05$), same as below.



注: A: pH; B: 酸度。
Note: A: pH; B: acidity.

图 5 生鲜面叶 pH 和酸度在贮藏期间的变化
Fig.5 Changes of pH and acidity of fresh noodles leaf during storage

酸度没有显著差别。在 4 ℃ 贮存过程中, 三组样品的 pH 值均呈下降趋势, 酸度呈现上升趋势。这是因为生鲜面叶富含碳水化合物和蛋白质, 有利于微生物的生长, 微生物代谢产生酸, 导致 pH 值的降低^[27]和酸度的上升^[28]。PVA/AgNPs 薄膜具有的抗菌性能可以抑制生鲜面叶中微生物的生长繁殖, 减少微生物的代谢物质, 从而减少生鲜面叶的 pH 和酸度变化。

2.2.4 生鲜面叶蒸煮特性在贮藏期间的变化

蒸煮损失率越低, 其蒸煮品质越好^[29]。不同处理组生鲜面叶的蒸煮特性如图 6 所示。随着贮藏时间的延长, 每组的蒸煮损失均逐渐增大, 吸水率降低。在贮藏过程中随着微生物的生长, 面筋网络结构和大分子蛋白被破坏, 对淀粉和蛋白质的包裹作用减弱, 蒸煮过程中会产生沉淀, 汤汁变得浑浊; 蛋白质和淀粉的结构改变导致与水的结合作用减弱, 造成蒸煮损失增加吸水率降低^[30]。而 PVA/AgNPs 薄膜包裹的生鲜面叶的蒸煮特性相比于空白组和 PVA 薄膜组较好, 能够在一定程度上改善生鲜面叶蒸煮后的口感, 维持生鲜面叶贮藏期间的品质。表明 PVA/AgNPs 薄膜可以抑制面叶中微生物的生长繁殖, 减少对生鲜面叶中面筋网络结构的破坏。

2.2.5 生鲜面叶质构特性在贮藏期间的变化

生鲜面叶在贮存期间的质构特性如表 3 所示, 硬度和咀嚼性随着时间的增加均逐渐增大, 弹性和回复性变小。PVA/AgNPs 薄膜组的生鲜面叶相较于空白组和 PVA 薄膜组, 质构指标的变化相对

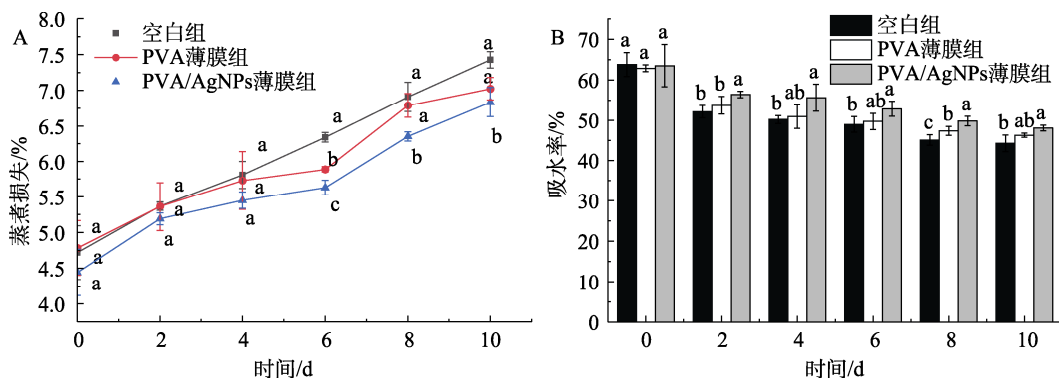
较小。一方面是由于 PVA/AgNPs 薄膜良好的阻隔性阻碍了生鲜面叶中的水分流失, 另一方面是由于其抑菌活性抑制了生鲜面叶中微生物的生长, 减弱对生鲜面叶面筋网络结构的破坏, 从而能更好的维持生鲜面叶在贮藏期间的品质。

2.2.6 银元素的迁移量分析

银元素的迁移量决定了 PVA/AgNPs 薄膜用于生鲜面叶保鲜的安全性。对使用 PVA/AgNPs 薄膜包裹处理第 0、2、4、6、8 天的生鲜面叶中的银含量进行检测。实验结果如表 4 所示。由表可知, 银元素向生鲜面叶中的迁移量随着贮存时间的延长而增加。在贮藏保鲜期内, 最高迁移量为 (0.0397 ± 0.0007) mg/kg, 低于欧洲食品安全局 (EFSA) 允许的限值 0.05 mg/kg^[31]。所以 AgNPs 薄膜的使用是相对安全的。

3 结论

本研究通过制备 PVA/AgNPs 复合薄膜, 研究 AgNPs 的添加对于 PVA 薄膜的机械性能、阻隔性和抑菌活性的影响并应用于生鲜面叶的保鲜中, 研究其贮藏期间的品质变化。结果表明, AgNPs 的添加可以提高薄膜的机械性能、阻隔性能和抑菌性能。AgNPs 添加量为 4% 时的复合薄膜对金黄色葡萄球菌具有良好的抑制作用, 能较好的维持生鲜面叶在贮藏保鲜过程中的品质, 且贮藏期间 Ag 的迁移量在欧洲食品安全局标准限量范围内, 具有较好的安全性。因此, PVA/AgNPs 复合抗菌薄膜在未来生鲜面叶的保鲜包装具有巨大的潜力。



注: A: 蒸煮损失; B: 吸水率。

Note: cooking loss, B: water absorption.

图 6 生鲜面叶蒸煮特性在贮藏期间的变化

Fig.6 Changes of the cooking characteristic of fresh noodles leaf during storage

表 3 生鲜面叶质构特性在贮藏期间的变化
Table 3 Changes of the texture characteristic of fresh noodles leaf during storage

质构指标	时间/d	空白组	PVA 薄膜组	PVA/AgNPs 薄膜组
硬度	0	2 288.08±141.07 ^{Ae}	2 259.39±257.70 ^{Af}	2 260.41±279.28 ^{Ae}
	2	3 531.12±313.43 ^{Ad}	3 420.24±360.81 ^{Ae}	3 023.86±249.47 ^{Ad}
	4	4 267.23±335.60 ^{Ac}	4 067.09±167.91 ^{ABd}	3 633.68±214.81 ^{Bc}
	6	4 913.15±366.19 ^{Ab}	4 719.93±245.65 ^{Ac}	4 533.80±417.81 ^{Ab}
	8	5 387.76±285.05 ^{Ab}	5 387.35±368.69 ^{Ab}	5 293.51±326.65 ^{Aa}
	10	6 352.83±161.34 ^{Aa}	5 911.66±280.65 ^{ABa}	5 675.40±323.21 ^{Ba}
弹性	0	0.95±0.04 ^{Aa}	0.94±0.03 ^{Aa}	0.94±0.01 ^{Aa}
	2	0.88±0.04 ^{Ab}	0.91±0.01 ^{Aab}	0.91±0.01 ^{Aab}
	4	0.85±0.03 ^{Ab}	0.86±0.05 ^{Abc}	0.90±0.01 ^{Aab}
	6	0.78±0.02 ^{Cc}	0.82±0.01 ^{Bcd}	0.87±0.03 ^{Ab}
	8	0.77±0.05 ^{Ac}	0.80±0.02 ^{Adc}	0.83±0.03 ^{Ac}
	10	0.73±0.02 ^{Bc}	0.77±0.03 ^{ABe}	0.81±0.05 ^{Ac}
咀嚼性	0	2 072.59±181.61 ^{Ad}	1 788.43±219.99 ^{Ad}	1 762.30±212.93 ^{Ae}
	2	2 577.08±139.57 ^{Ac}	2 540.09±297.62 ^{Ac}	2 241.10±210.51 ^{Ad}
	4	3 095.73±189.04 ^{Ab}	3 081.62±115.98 ^{Ab}	2 743.36±201.59 ^{Ac}
	6	3 271.70±345.16 ^{Ab}	3 338.45±235.86 ^{Ab}	3 245.54±234.63 ^{Ab}
	8	3 495.82±268.08 ^{Ab}	3 502.98±204.91 ^{Ab}	3 753.89±105.82 ^{Ab}
	10	4 047.26±153.05 ^{Aa}	3 980.72±365.12 ^{Aa}	3 706.84±472.44 ^{Aa}
回复性	0	1.36±0.13 ^{Aa}	1.36±0.13 ^{Aa}	1.33±0.12 ^{Aa}
	2	1.07±0.11 ^{Ab}	1.24±0.12 ^{Aa}	1.26±0.09 ^{Aa}
	4	0.98±0.05 ^{Abc}	0.99±0.06 ^{Ab}	1.06±0.13 ^{Ab}
	6	0.90±0.05 ^{Ac}	0.94±0.03 ^{Ab}	0.96±0.04 ^{Abc}
	8	0.87±0.03 ^{Ac}	0.90±0.03 ^{Ab}	0.92±0.02 ^{Abc}
	10	0.83±0.02 ^{Ac}	0.84±0.08 ^{Ab}	0.87±0.03 ^{Ac}

表 4 PVA/AgNPs 薄膜中的银向面叶中的迁移
Table 4 Migration of Ag from PVA/AgNPs films to fresh noodles leaf during storage

时间/d	0	2	4	6	8
迁移量/(mg/kg)	0.009 0 ± 0.000 7 ^d	0.012 8 ± 0.001 4 ^{cd}	0.018 1 ± 0.004 4 ^c	0.023 6 ± 0.001 4 ^b	0.039 7 ± 0.000 7 ^a

注：不同小写字母代表样本间具有显著性差异（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters represent significant differences between samples ($P<0.05$).

参考文献：

[1] 王钰文, 陈洁, 许飞, 等. 基于结构特性分析工艺对速食面叶复水性及品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(16): 232-241.
WANG Y W, C J, XU F, et al. Effect of analysis process on rehydration and quality of instant noodles based on structural characteristics[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2023, 14(16): 232-241.

[2] XU Y, III C H, WOLF-HALL C, et al. Fungistatic activity of flaxseed in potato dextrose agar and a fresh noodle system[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 121(3): 262-267.

[3] LI M, ZHU K X, WANG B W, et al. Evaluation the quality characteristics of wheat flour and shelf-life of fresh noodles as affected by ozone treatment - ScienceDirect[J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2163-2169.

[4] 范方方. 膨润土/壳聚糖/PVA 膜性能及其保鲜芒果的研究[D]. 广西大学, 2015.

FAN F F. Study on properties of bentonite/chitosan /PVA membrane and its preservation of mango[D]. Guangxi University, 2015.


[5] TAK H Y, YUN Y H, LEE C M, et al. Sulindac imprinted mungbean starch/PVA biomaterial films as a transdermal drug delivery patch-ScienceDirect[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 208: 261-268.

[6] ZHANG J, XU W, RZHANG Y C, et al. In situ generated silica reinforced polyvinyl alcohol/liquefied chitin biodegradable films for food packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 238: 116182.

[7] KHAN B, NAWAZ M, HUSSAIN R, et al. Enhanced antibacterial activity of size-controlled silver and polyethylene glycol functionalized silver nanoparticles[J]. Chemical Papers, 2021, 75(2): 743-752.

[8] SYAFI UDDIN A, SALMIATI, SALIM M R, et al. A review of silver nanoparticles: Research trends, global consumption, synthesis, properties, and future challenges[J]. Journal of the Chinese Chemical Society, 2017, 64(7): 732-756.

[9] NAVARRO GALLON S M, ALPASLAN E, WANG M, et al.

- Characterization and study of the antibacterial mechanisms of silver nanoparticles prepared with microalgal exopolysaccharides[J]. *Materials Science and Engineering C-Materials for Biological Applications*, 2019, 99: 685-695.
- [10] ZHAO G, STEVENS S E. Multiple parameters for the comprehensive evaluation of the susceptibility of *Escherichia coli* to the silver ion[J]. *Biomaterials*, 1998, 11(1): 27-32.
- [11] YANG D, LIU Q, GAO Y, et al. Characterization of silver nanoparticles loaded chitosan/polyvinyl alcohol antibacterial films for food packaging[J]. *Food hydrocolloids*, 2023, 136(P B): 108305.
- [12] CHI H, SONG S X, LUO M, et al. Effect of PLA nanocomposite films containing bergamot essential oil, TiO₂ nanoparticles, and Ag nanoparticles on shelf life of mangoes[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 192-198.
- [13] SHI C, WU Y, FANG D, et al. Effect of nanocomposite packaging on postharvest senescence of *flammulina velutipes*[J]. *Food Chemistry*, 2018, 246: 414-421.
- [14] KHAN M J, RAMIAH S K, SELAMAT J, et al. Utilisation of pullulan active packaging incorporated with curcumin and pullulan mediated silver nanoparticles to maintain the quality and shelf life of broiler meat[J]. *Italian Journal of Animal Science*, 2022, 21(1): 244-262.
- [15] 李慧, 田家瑶, 庞姗姗, 等. 聚乙烯醇/纳米纤维素/石榴皮多酚复合抗菌薄膜性能研究[J]. *食品与机械*, 2023, 39(4): 103-109.
- LI H, TIAN J Y, PANG S S, et al. Study on properties of polyvinyl alcohol/nanocellulose/pomegranate peel polyphenol composite antibacterial films[J]. *Food and Machinery*, 2023, 39(4): 103-109.
- [16] MA M, ZHU K X, GUO X N, et al. Delineating the physico-chemical, structural, and water characteristic changes during the deterioration of fresh noodles: Understanding the deterioration mechanisms of fresh noodles[J]. *Food Chemistry*, 2017, 216: 374-381.
- [17] AREGBE A Y, MU T, SUN H. Effect of different pretreatment on the microbial diversity of fermented potato revealed by high-throughput sequencing[J]. *Food Chemistry*, 2019, 290: 125-134.
- [18] 彭湃, 王晓龙, 马兰, 等. 燕麦麸粉和苦荞皮粉的添加对小麦面条结构、蒸煮品质及消化特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(20): 4102-4114.
- PENG P, WANG L, MA L, et al. Effects of addition of oat bran powder and tartary buckwheat skin powder on structure, cooking quality and digestive characteristics of wheat noodles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(20): 4102-4114.
- [19] ZHAO T T, GUO X N, ZHU K X. Effect of phosphate salts on the shelf-life and quality characteristics of semi-dried noodles[J]. *Food Chemistry*, 2022, 384: 132481.
- [20] TANG D, LIU Q, GAO Y, et al. Characterization of silver nanoparticles loaded chitosan/polyvinyl alcohol antibacterial films for food packaging[J]. *Food hydrocolloids*, 2023, 136: 108305.
- [21] 庄新超. 新型 BTI 可降解壳聚糖/聚乙烯醇保鲜膜的制备与应用研究[D]. 山西大学, 2021.
- ZHUANG X C. Preparation and application of new BTI degradable chitosan/polyvinyl alcohol cling film[D]. Shanxi University, 2021.
- [22] SONDI I, SALOPEK-SONDI B. Silver nanoparticles as antimicrobial agent: a case study on *E. coli* as a model for Gram-negative bacteria[J]. *Journal of colloid and interface science*, 2004, 275(1): 177-182.
- [23] RAI M K, DESHMUKH S D, INGLE A P, et al. Silver nanoparticles: the powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2012, 112(5): 841-852.
- [24] KORA A J, SASHIDHAR R. Biogenic silver nanoparticles synthesized with rhamnogalacturonan gum: Antibacterial activity, cytotoxicity and its mode of action[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2018, 11(3): 313-323.
- [25] YANG W, ZHU K X, GUO X N. Effect of bacteria content in wheat flour on storage stability of fresh wet noodles[J]. *Foods*, 2022, 11(19): 3093.
- [26] FU B X. Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing[J]. *Food Research International*, 2008, 41(9): 888-902.
- [27] SUWAIBAH G, ABDULAMIR A S, BAKAR F A, et al. Microbial growth, sensory characteristic and pH as potential spoilage indicators of chinese yellow wet noodles from commercial processing plants[J]. *American Journal of Applied Sciences*, 2009, 6(6): 1059.
- [28] CHUBUKOV V, GEROSA L, KOCHANOWSKI K, et al. Coordination of microbial metabolism[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2014, 12(5): 327-340.
- [29] 田晓红, 谭斌, 汪丽萍, 等. 我国市场上荞麦挂面的品质分析[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(4): 85-92.
- TIAN X H, TAN B, WANG L P, et al. Quality analysis of buckwheat noodles in Chinese market[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29(4): 85-92.
- [30] WÓJTOWICZ A, ONISZCZUK A, KASPRZAK K, et al. Chemical composition and selected quality characteristics of new types of precooked wheat and spelt pasta products[J]. *Food Chemistry*, 2020, 309: 125673.
- [31] LAMBRE C, BAVIERA J M B, BOLOGNESI C, et al. Safety assessment of the substance silver nanoparticles for use in food contact materials[J]. *EFSA Journal*, 2021, 19(8): 6790. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。