

# 鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs复合膜对枇杷的保鲜效果

张金丽<sup>1,2</sup>, 陈子和<sup>2</sup>, 陈燕婷<sup>2</sup>, 任中阳<sup>2</sup>, 张 坤<sup>2</sup>, 李清彪<sup>1,2</sup>

(1. 集美大学港口与环境工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 以枇杷为材料, 研究添加0.04% (以膜基质干重计) 低浓度银纳米颗粒(silver nanoparticles, AgNPs)的鱼鳞明胶-琼脂复合膜包装的保鲜效果, 测定贮藏期间枇杷果实生理指标的变化, 并与鱼鳞明胶-琼脂复合膜、泡沫网套和PE保鲜袋包装进行对比。结果表明, 与3组对照相比, 添加AgNPs的鱼鳞明胶-琼脂复合膜包装能有效降低枇杷果实的腐烂率和失重率, 抑制硬度的下降, 延缓VC、还原糖和可溶性固形物含量的降低。可见, 添加0.04% (以膜基质干重计) 低浓度AgNPs的鱼鳞明胶-琼脂复合膜对枇杷具有良好的保鲜效果。

[关键词] 鱼鳞明胶; 琼脂; 银纳米颗粒; 纳米复合膜; 保鲜; 枇杷

[中图分类号] TS 255.3

## Effect of Fish Scale Gelatin-Agar Composite Film Incorporated with Silver Nanoparticles on Preservation Quality of Loquat Fruits

ZHANG Jinli<sup>1,2</sup>, CHEN Zihé<sup>2</sup>, CHEN Yanting<sup>2</sup>, REN Zhongyang<sup>2</sup>, ZHANG Shen<sup>2</sup>, LI Qingbiao<sup>1,2</sup>

(1. College of Harbour and Environment Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. College of Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The effect of fish scale gelatin-agar composite film incorporated with 0.04% low concentration of silver nanoparticles (AgNPs) packages on preservation quality of loquat fruits was investigated, and the changes of physiological indexes of loquat fruits were measured during the storage. Compared with foam fruit net packages, PE packages and fish scale gelatin-agar composite film packages, the fish scale gelatin-agar composite film incorporated with AgNPs packages could significantly reduce the decay and weight loss of loquat fruits, inhibit the loss of firmness, delay the reducing of vitamin C, reducing sugar and total soluble solids. Therefore, the fish scale gelatin-agar composite film incorporated with low concentration of silver nanoparticles could improve the preservation quality.

**Keywords:** fish scale gelatin; agar; silver nanoparticles; nanocomposite film; preservation; loquat fruits

## 0 引言

近年来, 由于石油基塑料包装膜引发的环境问题日益受到关注, 因此, 生物基可降解包装膜的制备与应用成了研究热点<sup>[1-4]</sup>。明胶是由胶原蛋白通过热变性或化学、物理降解而得到的蛋白质属性生物可降解聚合物, 具有很好的生物相容性和成膜性, 被广泛用于制备可降解蛋白膜。其中, 由于原料

[收稿日期] 2020-11-05

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41976124); 福建省科技计划引导性项目(2018Y0064); 厦门市科技计划项目(3502Z20173029); 福建省教育厅科技项目(JA15261)

[作者简介] 张金丽(1969—), 女, 副教授, 博士, 从事功能性纳米材料的制备与应用研究。

来源丰富、安全性高, 鱼类明胶引起了人们的极大兴趣<sup>[5-9]</sup>。然而, 鱼类明胶膜作为包装材料, 存在机械性能不足、热稳定性差、不耐湿、易受微生物侵袭等缺陷, 因此, 对其改性研究成为当前研究的新热点<sup>[10-13]</sup>。将无机纳米颗粒作为填充物制备纳米复合膜是提高生物基包装膜机械和阻隔性能的有效途径之一。纳米填充物不仅可以提高生物基包装膜的机械和阻隔性能, 还可以作为抗菌剂、传感器和气体清除剂<sup>[5,14]</sup>。

金属银纳米颗粒 (silver nanoparticles, AgNPs) 由于具有显著和广谱的抗菌性能而被广泛用于制作纳米抗菌包装膜<sup>[15-17]</sup>。生物聚合物纳米复合膜的抗菌效率与 AgNPs 的尺寸、尺寸分布、颗粒聚集程度、银浓度大小、银与基质间的相互作用密切相关<sup>[15]</sup>。AgNPs 均匀分散在聚合物基质中才能更好发挥 AgNPs 的抗菌性能和降低纳米复合膜的银浓度, 同时增强 AgNPs 与聚合物基质间的相互作用, 可以降低 AgNPs 在包装使用中迁移的风险<sup>[18]</sup>。

本课题组将鱼鳞明胶作为还原剂和稳定剂制备粒径均一的 AgNPs, 然后将其与鱼鳞明胶、琼脂复合基质组合, 制备鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜, 研究发现, 由鱼鳞明胶还原制备的 AgNPs 与鱼鳞明胶-琼脂复合膜基质具有良好的相容性和较强的相互作用, 并且在相当膜基质干重 0.04% ~ 0.2% 的低含量下即可显著提高复合膜的理化和抗菌性能。本文选取枇杷作为保鲜对象, 采用添加相当膜基质干重 0.04% 低含量 AgNPs 的鱼鳞明胶-琼脂复合膜包装枇杷, 并与鱼鳞明胶-琼脂复合膜、泡沫网套和 PE 保鲜袋包装对比, 研究添加低浓度 AgNPs 的鱼鳞明胶-琼脂复合膜在室温下对枇杷的保鲜效果, 为鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜的抗菌包装应用提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料与试剂

供试枇杷品种为早钟 6 号, 采自福建莆田。

氨水 ( $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), 分析纯, 西陇科学股份有限公司; 硝酸银 ( $\text{AgNO}_3$ )、氢氧化钠 ( $\text{NaOH}$ )、草酸 ( $\text{C}_2\text{O}_4\text{H}_2$ )、乙酸锌 ( $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、三水合亚铁氰化钾 ( $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )、五水合硫酸铜 ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )、四水合酒石酸钾钠 ( $\text{C}_4\text{O}_6\text{H}_4\text{KNa} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 2, 6-二氯酚 ( $\text{C}_{12}\text{H}_6\text{Cl}_2\text{NNaO}_2$ ), 质量分数 >95%, 凯玛生化 (天津) 有限公司。

有机硅树脂框, 利用 2 块定制的有机硅树脂板自行切割加工而成。

### 1.2 仪器与设备

FA25 高剪切分散乳化机, 德国 FLUKO 公司; PSX 智能型恒温恒湿箱, 浙江宁波莱福科技有限公司; UM113 搅拌脱泡机, 日本 Unix 公司; TA-touch 质构仪, 上海保圣实业发展有限公司; HB-118 手持糖度计, 日本 ATAGO 公司; FL1 电炉, 北京市永光明医疗仪器有限公司; PSX 智能型恒温水浴锅, 上海梅香仪器有限公司。

### 1.3 AgNPs 的制备

AgNPs 的制备采用生物还原法<sup>[19]</sup>, 以鱼鳞明胶作为还原剂和稳定剂, 在碱性条件下与银氨离子反应制得。鱼鳞明胶经常温溶胀、60 °C 加热溶解, 配制成质量分数为 10% 的明胶储备液。取 7.5 mL 质量分数为 10% 明胶储备液于 250 mL 磨口锥形瓶中, 加入 2 mL 40 g/L NaOH 溶液和适量去离子水, 振荡均匀后加入 10 mL 10 g/L  $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$  溶液, 定容至 100 mL, 于 60 °C 下转速为 150 r/min 的恒温振荡器中避光反应 30 h。

### 1.4 鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜的制备

按 1.3 方法配制质量浓度为 40 g/L 的明胶溶液。琼脂经 95 °C 加热溶解, 配制成质量浓度为 12 g/L 的溶液。将鱼鳞明胶溶液和琼脂溶液等体积混合, 加入质量为鱼鳞明胶质量 20% 的甘油, 均质处理后加入 1 mL AgNPs 溶胶 (银质量浓度为 1 g/L), 搅拌均匀后利用搅拌脱泡机进行脱泡处理, 然后参照翁武银等<sup>[3]</sup>报道的方法将调制好的复合膜液均匀地涂在有机硅树脂框内, 置于温度为 25 °C、相对湿度为

50%的恒温恒湿箱中干燥24 h,制成鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs复合膜,复合膜中银含量为膜基质干重的0.04%。复合膜经热封做成25 cm×12.5 cm大小的包装袋用于枇杷保鲜实验。

1.5 枇杷的前处理和包装

枇杷于采收当天运回实验室,选择大小、成熟度基本一致并且无机械损伤和虫害的果实进行实验。将果实随机分成4组,每组100个果实,重复3次。第一组用常用的泡沫网套包装,第二组用PE保鲜袋包装,第三组用鱼鳞明胶-琼脂复合膜袋包装,第四组用鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs复合膜袋包装,所有处理组均放置于室温下进行贮藏。

1.6 枇杷贮藏期间果实生理指标的测定

1.6.1 失重率的测定

称取枇杷果实初始的质量和贮藏期间的质量,按式(1)计算失重率:

失重率/% = [(m<sub>1</sub> - m<sub>2</sub>)/m<sub>1</sub>] × 100, (1)

式中:m<sub>1</sub>为枇杷果实初始质量(g);m<sub>2</sub>为枇杷果实贮藏期间的质量(g)。

1.6.2 硬度的测定

采用质构仪柱形探头测定果实硬度<sup>[20]</sup>。参数设定如下:探头(PT-1)直径为5 mm,探头上行距离30 mm,测试前下行速率为60 mm/min,测试时下压速率为30 mm/min,测试后上行速率为60 mm/min,最小触发力为0.3 N,形变量为50%,两次下压间隔为5 s。

1.6.3 腐烂指数的测定

每隔5 d取样一次,依据果实腐烂面积占原果实面积的比例情况划分为5级<sup>[21]</sup>:0级为无腐烂面积出现;1级腐烂面积小于25%;2级腐烂面积大于等于25%,小于50%;3级腐烂面积大于等于50%,小于75%;4级腐烂面积大于等于75%。按照式(2)计算腐烂指数:

腐烂指数/% = ∑(腐烂级别 × 该级别果实数目)/(总果数 × 最高腐烂级别) × 100。 (2)

1.6.4 可溶性固形物含量的测定

将枇杷用均质器进行均质,过滤后,取1~2滴滴在手持糖度计上进行可溶性固形物含量的测定,以蒸馏水作为空白对照。

1.6.5 VC含量的测定

VC又称抗坏血酸,根据GB 5009.86—2016中的2,6-二氯靛酚滴定法测定抗坏血酸。称取枇杷果肉100 g,加入质量分数为2%草酸溶液100 mL,迅速进行匀浆。准确称取40 g匀浆样品于100 mL容量瓶中,用质量分数为2%草酸溶液进行定容,用标定过的2,6-二氯靛酚溶液进行滴定,直至溶液呈粉红色15 s不褪色为止,同时作空白试验。按照式(3)由2,6-二氯靛酚的消耗量计算样品中L(+)-抗坏血酸的含量:

X = (V - V<sub>0</sub>) × T × A/m, (3)

式中:X为试样中L(+)-抗坏血酸含量(mg/g);V为滴定试样所消耗2,6-二氯靛酚溶液的体积(mL);V<sub>0</sub>为滴定空白所消耗2,6-二氯靛酚溶液的体积(mL);T为2,6-二氯靛酚溶液的滴定度,即每毫升2,6-二氯靛酚溶液相当于抗坏血酸的毫克数;A为稀释倍数;m为试样质量(g)。

1.6.6 还原糖含量的测定

根据GB 5009.7—2016中的直接滴定法测定果实中还原糖含量。称取枇杷果肉匀浆5 g,置250 mL容量瓶中,加入50 mL水,缓慢加入乙酸锌溶液5 mL和亚铁氰化钾溶液5 mL,加水至刻度,混匀,静置30 min,过滤,取滤液备用。在加热条件下滴定标定过的碱性酒石酸铜溶液,根据样品液消耗体积按式(4)计算还原糖含量。

X = m<sub>1</sub>/(m × (V/250) × 1 000), (4)

式中:X为试样中还原糖的含量(g);m<sub>1</sub>为碱性酒石酸铜溶液相当于某种还原糖的质量(mg);m为试样质量(g);V为测定时平均消耗试样溶液体积(mL);250为定容体积(mL)。



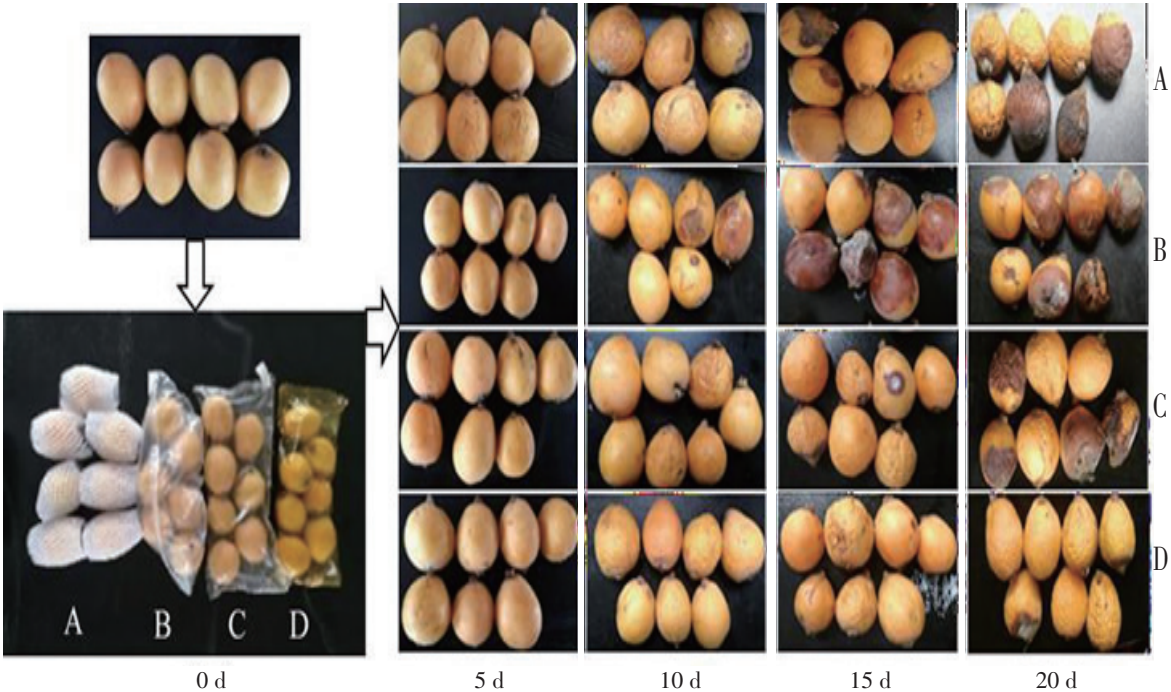
1.7 数据统计与分析

数据采用 SPSS Statistics 20.0 软件进行单因素方差分析，显著性检测方法为 Duncan 多重检验 ( $P < 0.05$ )，相关数据为 3 次以上的平均值。

2 结果与讨论

2.1 果实外观形态和失重率变化

每隔 5 d 拍照一次，观察不同包装枇杷果实外观形态的变化，结果如图 1 所示。由图 1 可以看出：贮藏 5 d，泡沫网套包装的枇杷果实开始失水干枯，而 PE 保鲜袋、鱼鳞明胶-琼脂复合膜和鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实均保持较好的新鲜度；第 10 天，泡沫网套和鱼鳞明胶-琼脂复合膜包装的果实皱缩，局部发生小面积腐烂，PE 保鲜袋包装的枇杷果实局部发生明显腐烂，而鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实也开始出现皱缩，但未出现腐烂；第 15 天，泡沫网套和鱼鳞明胶-琼脂复合膜包装的腐烂面积加大，PE 保鲜袋包装的大面积腐烂，而鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实局部发生小面积腐烂；第 20 天，泡沫网套、鱼鳞明胶-琼脂复合膜包装的枇杷果实均严重皱缩和腐烂，PE 保鲜袋包装的腐烂非常严重，而鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实只有小面积腐烂。可见，鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装可以有效抑制枇杷果实的腐烂和水分散失，从而延长枇杷的贮藏时间。



A—泡沫网套；B—PE 保鲜袋；C—鱼鳞明胶-琼脂复合膜；D—鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜。  
A—foam fruit net; B—polyethylene package; C—fish scale gelatin-agar film; D—fish scale gelatin-agar-AgNPs film.

图 1 不同包装对枇杷果实外观形态的影响

Fig.1 Effect of different packaging materials on appearance of loquat fruits

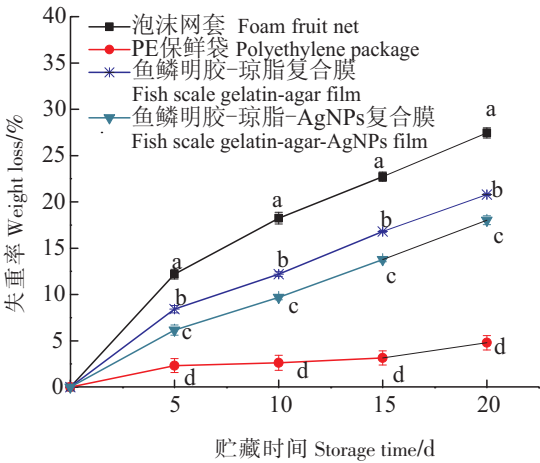
不同包装方式下枇杷果实的失重率均随着贮藏天数的增加而逐渐增大，且组间差异显著 ( $P < 0.05$ )，贮藏到第 20 天之后，泡沫网套、PE 保鲜袋、鱼鳞明胶-琼脂复合膜和鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实失重率分别为 27.75%，4.80%，20.79%，18.02%，差异显著 ( $P < 0.05$ ) (具体结果见图 2)。泡沫网套由于果面裸露较多，水分容易散失，因此失重率最高。PE 保鲜袋由于透气性较差，水分不易散失，所以保水效果最好。但由于透气性不好，袋内易积累果实呼



吸作用释放的二氧化碳, 过量的二氧化碳可导致果实无氧呼吸增强, 产生酒精等有生理毒害作用的代谢物, 促进果实败坏; 同时, PE 袋中有大量的冷凝水积聚, 容易滋生微生物而促进枇杷的腐败。鱼鳞明胶-琼脂复合膜和鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜作为生物聚合物薄膜, 可以覆盖果实表面皮孔或气孔, 减少蒸腾损失, 还可以保持一定的气体透过性, 调节气体交换, 实现微气调效应, 在一定程度上抑制果实呼吸作用, 延缓成熟和衰败<sup>[21]</sup>, 所以它们包装的枇杷果实失重率相对较低, 外观形态较好。添加 AgNPs 后复合膜包装的枇杷果实失重率低于未添加 AgNPs 复合膜的, 说明 AgNPs 的存在使复合膜的阻隔性能得以提高。这与邵霜<sup>[22]</sup>利用纳米银材料包装“大五星”枇杷果实, 发现纳米银包装材料可以减少水分子透过的研究结果相一致。

2.2 果实腐烂指数的变化

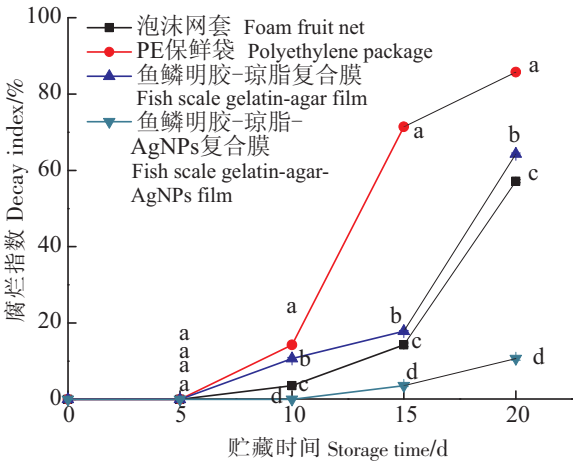
腐烂率是果蔬贮藏过程中最能直观判断贮藏品质的指标, 腐烂率越低, 说明保鲜效果越好<sup>[23]</sup>。不同包装贮藏期间枇杷果实腐烂指数的测定结果见图 3。由图 3 可知, 前 5 d 各组的腐烂指数均为 0, 但 5 d 后各组腐烂指数间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 泡沫网套、PE 保鲜袋、鱼鳞明胶-琼脂复合膜包装的枇杷果实在贮藏 5 d 后腐烂指数开始增加, 并随着贮藏天数的延长而增大。而鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装在贮藏 10 d 后, 果实才开始腐烂, 之后腐烂指数的增幅也明显较小。在整个贮藏过程中, PE 保鲜袋包装的枇杷果实腐烂指数最高, 这与 PE 保鲜袋的透气性差、易积聚冷凝水、滋生腐败微生物有关。有趣的是, 鱼鳞明胶-琼脂复合膜包装的果实腐烂指数在整个贮藏过程中均高于泡沫网套的, 表明蛋白质成分包装膜容易助长微生物, 促进果实的腐烂。相反, 0.04% AgNPs 含量的鱼鳞明胶-琼脂复合膜具有强的抗菌性能, 这可能与 AgNPs 本身具有很强的广谱抗菌性有关, 与果实表面接触能够抑制果实表面微生物的生长繁殖, 并能隔离空气中微生物与果实的接触。相对于其他 3 组包装, 鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜在常温下即表现出显著的抑菌保鲜作用, 具有普通气调保鲜<sup>[24]</sup>和低温保鲜<sup>[21, 25]</sup>不可比拟的优势, 且操作也更为简便。目前, 使用 AgNPs 抗菌包装或抗菌涂膜的研究报道逐渐增多, 如: Yang 等<sup>[26]</sup>利用聚乙烯纳米银保鲜袋对草莓果实进行保鲜, 结果发现, 纳米保鲜袋包装可以有效地降低草莓果实的腐烂率, 延长草莓的货架期; Zhang 等<sup>[27]</sup>考察八角金盘叶提取液还原制备的 AgNPs 对青霉菌诱导柑橘果实腐烂的抑制作用, 结果发现, 涂膜 AgNPs 能显著抑制青霉菌对柑橘的腐烂作用。



不同字母表示同一贮藏时间下组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。  
Different letters in the same storage time indicated that there was significant difference between groups under the same storage time ( $P < 0.05$ ).

图 2 不同包装对枇杷果实失重率的影响

Fig.2 Effect of different packaging materials on weight loss of loquat fruits



不同字母表示同一贮藏时间下组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。  
Different letters in the same storage time indicated that there was significant difference between groups under the same storage time ( $P < 0.05$ ).

图 3 不同包装对枇杷果实腐烂指数的影响

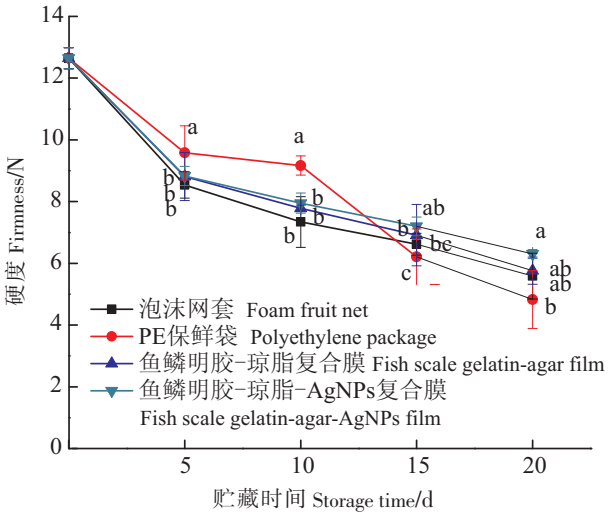
Fig.3 Effect of different packaging materials on decay index of loquat fruits

2.3 果实硬度的变化

硬度是果实主要品质指标之一，和果实后熟衰老密切相关<sup>[28]</sup>。在贮藏期，果实水分流失、呼吸消耗细胞内有机物和酶水解细胞壁等，会导致果实软化、硬度下降。图 4 是不同包装贮藏期间枇杷果实硬度变化的测定结果。由图 4 可见，随着贮藏时间的延长，枇杷果实的硬度不断下降。贮藏 20 d 之后，泡沫网套、PE 保鲜袋、鱼鳞明胶-琼脂复合膜和鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实硬度分别为 5.59、4.83、5.76、6.60 N。鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实硬度略高于鱼鳞明胶-琼脂复合膜和泡沫网套包装的，这与复合膜抑制果实的呼吸作用以及添加 AgNPs 后抑制呼吸和抑菌抗腐作用增强有关。PE 保鲜袋包装的枇杷果实在贮藏前期硬度最好，但后期快速下降，主要原因是 PE 保鲜袋透气性差，前期严重抑制了果实的呼吸作用，贮藏 10 d 后果实开始大量腐烂，导致果实硬度快速下降。本实验结果表明，添加 AgNPs 后的鱼鳞明胶-琼脂复合膜包装可以有效抑制枇杷果实硬度的下降。

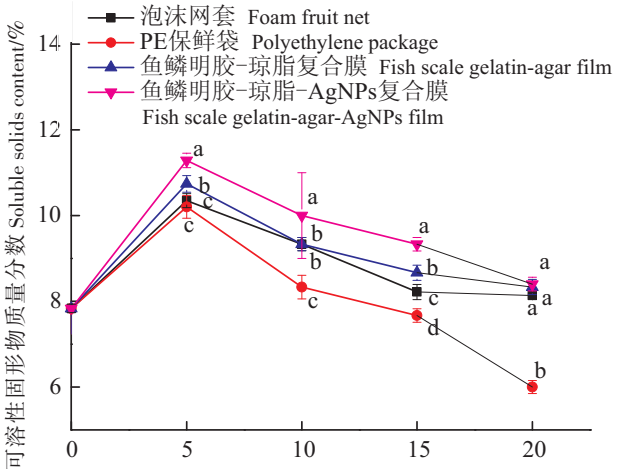
2.4 果实可溶性固形物含量的变化

可溶性固形物含量是衡量水果品质的重要指标<sup>[29]</sup>。对不同包装贮藏期间枇杷果实可溶性固形物含量进行分析，结果如图 5 所示。由图 5 可见，枇杷果实的可溶性固形物含量呈先上升后下降的趋势。究其原因，果实采后尚未完全成熟，贮藏过程中淀粉等大分子物质逐渐降解为可溶性的小分子物质，使贮藏前 5 d 可溶性固形物含量上升；到贮藏后期，由于可溶性小分子物质作为呼吸基质被逐步消耗，表现为可溶性固形物含量逐渐下降<sup>[21,24]</sup>。贮藏 20 d 后，泡沫网套、PE 保鲜袋、鱼鳞明胶-琼脂复合膜和鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实可溶性固形物质量分数分别为 8.13%、6.00%、8.33%、8.40%。鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实可溶性固形物含量高于其他包装的，并在前 15 d 内与其他组存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。这表明，鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜可有效促进贮藏前期枇杷果实可溶性固形物含量的提高，并延缓贮藏后期可溶性固形物含量的下降。此作用可能与鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜抑制果实呼吸代谢，延缓采后成熟和衰老过程中的物质转化有关。Li 等<sup>[16]</sup>将聚乙烯与纳米银、TiO<sub>2</sub> 等纳米粉末混合制备新颖的纳米包装材料，并用于枣的保鲜，发现纳米包装材料能有效提高枣的可溶性固态、总固体和还原糖含量，具有良好的保鲜效果。



不同字母表示同一贮藏时间下组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。  
Different letters in the same storage time indicated that there was significant difference between groups under the same storage time ( $P < 0.05$ ).

图 4 不同包装对枇杷果实硬度的影响  
Fig.4 Effect of different packaging materials on firmness of loquat fruits



不同字母表示同一贮藏时间下组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。  
Different letters in the same storage time indicated that there was significant difference between groups under the same storage time ( $P < 0.05$ ).

图 5 不同包装对枇杷果实可溶性固形物含量的影响  
Fig.5 Effect of different packaging materials on soluble solids content of loquat fruits

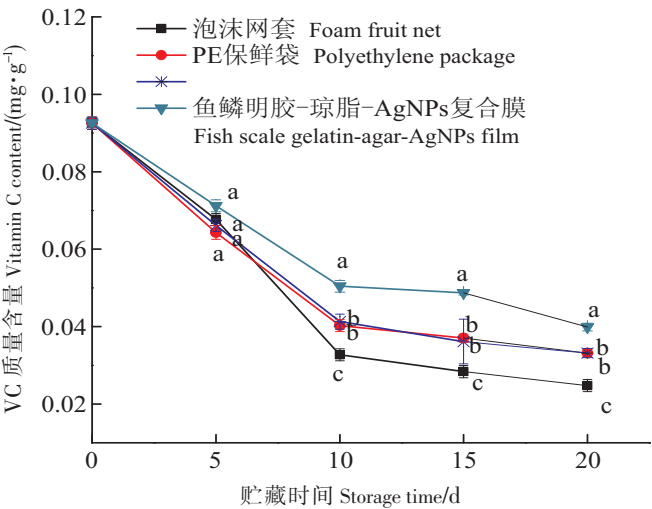
2.5 果实 VC 含量的变化

VC 是评价果实营养品质和贮藏效果的一个重要指标<sup>[24]</sup>。VC 可作为抗氧化剂直接参与植物体内活性氧的清除等一系列抗氧化反应, 同时果蔬本身含有抗坏血酸氧化酶, 催化 VC 氧化, 参与呼吸代谢等多种生理代谢反应, 因而 VC 含量在果蔬采后贮藏过程中会逐渐因氧化而减少<sup>[30]</sup>。添加纳米粒子可以改善包装薄膜的透气性和透湿性, 抑制果蔬的呼吸作用, 减缓 VC 的氧化分解<sup>[22,30]</sup>。Zhao 等<sup>[31]</sup>利用聚乙烯与纳米银、纳米 TiO<sub>2</sub> 共混制备出纳米复合包装袋, 研究了纳米复合包装袋对绿茶的保鲜效果, 结果发现, 纳米复合包装袋可以有效减缓 VC 的氧化。

对贮藏期间不同包装枇杷果实 VC 含量进行分析, 结果如图 6 所示。由图 6 可见, 不同包装下, 枇杷果实采后 VC 含量均随贮藏时间的延长先快速下降后缓慢下降, 其中以鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实 VC 含量下降最慢。贮藏 20 d 后, 泡沫网套、PE 保鲜袋、鱼鳞明胶-琼脂复合膜和鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实 VC 质量含量分别为 0.024 8, 0.033 2, 0.033 2, 0.039 9 mg/g。鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实 VC 含量显著高于其他对照组的 ( $P < 0.05$ )。可见, 添加 AgNPs 后, 鱼鳞明胶-琼脂复合膜能更好地抑制枇杷果实 VC 含量的下降, 维持果实营养品质。这与邵霜<sup>[22]</sup>报道的纳米银、二氧化钛和二氧化硅包装材料处理均可较好延缓枇杷果实 VC 含量下降结果相似。史君彦等<sup>[32]</sup>采用纳米银塑料保鲜膜包装黄瓜, 并研究纳米银塑料保鲜膜的保鲜效果, 结果也发现纳米银塑料保鲜膜可有效延缓黄瓜 VC 的降解代谢。

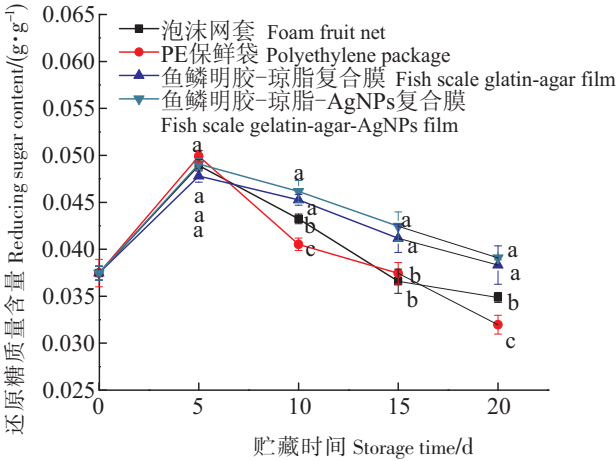
2.6 果实还原糖含量的变化

对贮藏期间不同包装枇杷果实的还原糖含量进行分析, 结果如图 7 所示。由图 7 可见, 贮藏期间枇杷果实的还原糖含量先上升后下降, 与可溶性固形物含量的变化趋势类似。贮藏前期还原糖含量的升高是由于果实的成熟, 果实中积累的淀粉逐渐被水解转变成可溶性糖; 后期由于糖作为呼吸基质逐渐被消耗, 所以含量不断下降<sup>[28]</sup>。贮藏 20 d 后, 泡沫网套、PE 保鲜袋、鱼鳞明胶-琼脂复合膜和鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实还原糖含量分别为 0.034 9, 0.032 0, 0.038 3, 0.039 1 g/g。鱼鳞明胶-琼脂-AgNPs 复合膜包装的枇杷果实还原糖含量略高于鱼鳞明胶-琼脂复合膜的 ( $P >$



不同字母表示同一贮藏时间下组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。  
Different letters in the same storage time indicated that there was significant difference between groups under the same storage time ( $P < 0.05$ ).

图 6 不同包装对枇杷果实 VC 含量的影响  
Fig.6 Effect of different packaging materials on VC content of loquat fruits



不同字母表示同一贮藏时间下组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。  
Different letters in the same storage time indicated that there was significant difference between groups under the same storage time ( $P < 0.05$ ).

图 7 不同包装对枇杷果实还原糖含量的影响  
Fig.7 Effect of different packaging materials on reducing sugar content of loquat fruits



0.05), 而显著高于泡沫网套和 PE 保鲜袋的 ( $P < 0.05$ ), 表明添加 AgNPs 可提高鱼鳞明胶-琼脂复合膜包装维持枇杷果实还原糖含量的效果。曹雪玲等<sup>[33]</sup>研究发现, 纳米银溶胶涂膜草莓后, 草莓还原糖含量的下降速率要低于未涂膜的草莓, 与本研究结果相似。

### 3 结论

研究添加 0.04% (以膜基质干重计) 低浓度 AgNPs 的鱼鳞明胶-琼脂复合膜包装在室温下对枇杷的贮藏保鲜效果。与鱼鳞明胶-琼脂复合膜、泡沫网套、PE 保鲜袋相比, 添加 AgNPs 的鱼鳞明胶-琼脂复合膜能有效降低枇杷果实的腐烂率和失重率, 抑制硬度的下降, 延缓 VC、还原糖和可溶性固形物含量的降低, 有效保持了枇杷果实的贮藏品质。添加 0.04% 低浓度 AgNPs 的鱼鳞明胶-琼脂复合膜对枇杷果实具有良好的保鲜效果, 在果蔬保鲜方面具有较好的应用前景。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] RHIM J, PARK H, HA C. Bio-nanocomposites for food packaging applications [J]. *Progress in Polymer Science*, 2013, 38(10): 1629-1652. DOI:10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008.
- [2] WANG L, LIN L Z, GUO Y Y, et al. Enhanced functional properties of nanocomposite film incorporated with EGCG-loaded dialdehyde glucomannan/gelatin matrix for food packaging [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 105863. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.105863.
- [3] 翁武银, 刘光明, 苏文金, 等. 鱼皮明胶蛋白膜的制备及其热稳定性 [J]. *水产学报*, 2011, 35(12): 1890-1896. DOI:10.3724/SP.J.1231.
- [4] 单梦圆, 宋琳璐, 胡奇杰, 等. 基于鱼鳞明胶的可食性保鲜膜对金枪鱼肉的保鲜作用研究 [J]. *核农学报*, 2019, 33(6): 1137-1145. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.06.1137.
- [5] HOSSEINI S F, GÓMEZ-GUILLÉN M C. A state-of-the-art review on the elaboration of fish gelatin as bioactive packaging: special emphasis on nanotechnology-based approaches [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 79: 125-135. DOI:10.1016/j.tifs.2018.07.022.
- [6] RUSTAD T, STORRØ I, SLIZYTE R. Possibilities for the utilisation of marine by-products [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2011, 46(10): 2001-2014. DOI:10.1111/j.1365-2621.2011.02736.x.
- [7] WENG W Y, OSAKO K, TANAKA M. Oxygen permeability and antioxidative properties of edible surimi films [J]. *Fisheries Science*, 2009, 75(1): 233-240. DOI:10.1007/s12562-008-0024-6.
- [8] ZHOU P Z, REGENSTEIN J M. Optimization of extraction conditions for pollock skin gelatin [J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(5): 393-398. DOI:10.1111/j.1365-2621.2004.tb10704.x.
- [9] ALFARO A D T, ALFARO A D T, BALBINOT E, et al. Fish gelatin: characteristics, functional properties, applications and future potentials [J]. *Food Engineering Reviews*, 2015, 7(1): 33-44. DOI:10.1007/s12393-014-9096-5.
- [10] MOHAJER S, REZAEI M, HOSSEINI S F. Physico-chemical and microstructural properties of fish gelatin/agar bio-based blend films [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 157: 784-793. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.10.061.
- [11] MENEZES M D L L, PIRES N D R, DA CUNHA P L R, et al. Effect of tannic acid as crosslinking agent on fish skin gelatin-silver nanocomposite film [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 19: 7-15. DOI:10.1016/j.fpsl.2018.11.005.
- [12] 徐叶琼, 翁武银. 热处理温度对明胶-魔芋粉复合膜性质的影响 [J]. *食品科学*, 2019, 40(3): 202-207. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20171008-027.
- [13] 宋琳璐, 单梦圆, 唐艳, 等. 桔子精油优化鱼鳞明胶膜性能的作用研究 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39(11): 240-247. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.11.041.
- [14] OTHMAN S H. Bio-nanocomposite materials for food packaging applications: types of biopolymer and nano-sized filler [J]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2014, 2: 296-303. DOI:10.1016/j.aaspro.2014.11.042.
- [15] RHIM J, WANG L, LEE Y, et al. Preparation and characterization of bio-nanocomposite films of agar and silver nanoparticles: laser ablation method [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 103: 456-465. DOI:10.1016/j.carbpol.2013.

12.075.

- [16] LI H M, LI F, WANG L, et al. Effect of nano-packing on preservation quality of Chinese jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. var. *inermis* (Bunge) Rehd) [J]. Food Chemistry, 2009, 114(2): 547-552. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.09.085.
- [17] KANMANI P, RHIM J. Physicochemical properties of gelatin/silver nanoparticle antimicrobial composite films [J]. Food Chemistry, 2014, 148: 162-169. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.10.047.
- [18] BUMBUDSANPHAROKE N, KO S. Nano-food packaging: an overview of market, migration research, and safety regulations [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(5): 910-923. DOI:10.1111/1750-3841.12861.
- [19] SINHA T, AHMARUZZAMAN M, SIL A K, et al. Biomimetic synthesis of silver nanoparticles using the fish scales of *Labeo rohita* and their application as catalysts for the reduction of aromatic nitro compounds [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2014, 131: 413-423. DOI:10.1016/j.saa.2014.04.065.
- [20] 叶建兵, 陈发河, 吴光斌. 一氧化氮对莲雾果实采后生理及品质的影响 [J]. 集美大学学报(自然科学版), 2012, 17(3): 180-185.
- [21] GHASEMNEZHAD M, NEZHAD M A, GERAİLOO S. Changes in postharvest quality of loquat (*Eriobotrya japonica*) fruits influenced by chitosan [J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2011, 52: 40-45. DOI:10.1007/s13580-011-0028-5.
- [22] 邵霜. 不同纳米包装材料对枇杷保鲜效果的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [23] 赵鲁宁, 周秋阳, 杨慧慧, 等. 季也蒙毕赤酵母 Y35-1 菌株对枇杷采后炭疽病的抑菌效果及保鲜作用 [J]. 食品科学, 2019, 40(4): 170-177. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20171226-329.
- [24] 孙正烜, 陈惠云, 杨虎清, 等. 纳米乳涂膜和1-甲基环丙烯处理对枇杷果实保鲜效果的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(23): 257-262. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201823038.
- [25] WANG Y P, SHAN Y X, CHEN J W, et al. Comparison of practical methods for postharvest preservation of loquat fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 120: 121-126. DOI:10.1016/j.postharvbio.2016.06.005.
- [26] YANG F M, LI H M, LI F, et al. Effect of nano-packing on preservation quality of fresh strawberry (*Fragaria ananassa* Duch. cv Fengxiang) during storage at 4 °C [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(3): 236-240. DOI:10.1111/j.1750-3841.2010.01520.x.
- [27] ZHANG J, SI G G, ZOU J, et al. Antimicrobial effects of silver nanoparticles synthesized by *Fatsia japonica* leaf extracts for preservation of citrus fruits [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(8): 1861-1866. DOI:10.1111/1750-3841.13811.
- [28] 陈学红. 高氧对草莓果实保鲜的效果及其机理研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [29] 聂继云, 李静, 徐国锋, 等. 水果可溶性固形物含量测定适宜取汁方法的筛选 [J]. 保鲜与加工, 2014(5): 62-64.
- [30] 张瑶, 杨京平, 杨莹跃, 等. 添加纳米粒子的塑料包装材料在杨梅保鲜中的作用 [J]. 农机化研究, 2007(3): 111-114. DOI:10.3969/j.issn.1003-188X.2007.03.036.
- [31] ZHAO L Y, LI F, CHEN G T, et al. Effect of nanocomposite-based packaging on preservation quality of green tea [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2012, 47(3): 572-578. DOI:10.1111/j.1365-2621.2011.02879.x.
- [32] 史君彦, 高丽朴, 左进华, 等. 纳米银保鲜膜包装对黄瓜保鲜效果的影响 [J]. 食品工业, 2017, 38(1): 109-112.
- [33] 曹雪玲, 刘发现, 金丽. 纳米银胶的制备及对草莓的保鲜性能研究 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(5): 327-329. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2014.05.060.

(责任编辑 马建华 英文审校 刘静雯)