

基于纳米材料的甘薯保鲜盒制造工艺与应用效果分析

胡婉君 徐军乐 殷婷婷 杨新笋
湖北薯芋产业技术研究院有限公司

DOI:10.12238/as.v8i11.3415

[摘要] 本研究针对甘薯长期贮藏中易失水、腐烂变质的技术难题,开发了一种基于纳米复合材料的新型保鲜盒。通过将壳聚糖-蒙脱石-乳清分离蛋白纳米复合涂膜与可降解塑料基体结合,设计了可容纳10-15kg鲜薯的保鲜盒容器。重点研究了该保鲜盒在长达8个月(每年10月至次年6月)贮藏期内对甘薯水分、品质及病害的控制效果。结果表明,该纳米保鲜盒能将甘薯水分损失率控制在10%以下,显著抑制病害发生,且箱体成本控制3元/个左右。本研究为甘薯及其他根茎类农产品的贮藏保鲜提供了经济有效的解决方案。

[关键词] 纳米材料; 甘薯保鲜; 保鲜盒; 水分保持; 病害控制; 成本分析

中图分类号: S946.1+1 文献标识码: A

Manufacturing process and application effect analysis of sweet potato preservation box based on nanomaterials

Wanjun Hu Junle Xu Tingting Yin Xinsun Yang

Hubei Potato and Taro Industry Technology Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] This study addresses the technical challenges of water loss and spoilage during long-term sweet potato storage by developing a novel nano-composite-based preservation box. By integrating a chitosan-montmorillonite-whey protein nanocomposite coating with a biodegradable plastic matrix, the container can hold 10-15kg of fresh sweet potatoes. The effectiveness of this preservation box in controlling moisture content, quality, and disease occurrence was evaluated over an 8-month storage period (October to June). Results demonstrated that the nano-preservation box maintained moisture loss below 10%, significantly reduced disease incidence, and achieved a production cost of approximately 3 yuan per unit. This study provides an economically viable solution for preserving sweet potatoes and other root and tuber crops.

[Key words] nanomaterials; sweet potato preservation; preservation box; moisture retention; disease control; cost analysis

甘薯是中国重要粮食作物,种植面积约占全球54%,但采后贮藏期间易出现失水、腐烂等问题,损耗率高达10%-15%,严重制约产业发展。传统地窖贮藏方式存在温湿度控制不稳定、病害传播风险大等局限性。

近年来,纳米材料因其比表面积大、活性高等特性,在食品包装领域展现出应用潜力。例如,含银纳米粒子薄膜可显著抑制微生物生长,纳米黏土材料能有效阻隔氧气。已有研究将纳米复合涂膜用于甘薯保鲜,但在整体保鲜盒设计及长期贮藏方面的研究仍属空白。

为此,本研究设计了一种专用于甘薯长期贮藏的纳米保鲜盒,通过优化箱体材料与结构,在常温条件下将水分损失率控制在10%以下,系统评估了贮藏期间甘薯品质与病害变化,为纳米材料在农产品保鲜中的应用提供了理论支持和实践参考。

1 材料与方法

1.1 纳米复合材料设计与制备

1.1.1 材料选择与配方优化:本研究开发的甘薯保鲜盒主要采用以下纳米复合材料:壳聚糖(脱乙酰度 $\geq 85\%$,粘度50-800 mPa·s)、纳米蒙脱石(层间距1.2-1.5nm,粒径30-50nm)和乳清分离蛋白(纯度 $\geq 90\%$)。这些材料的选择基于它们独特的性能互补特性:壳聚糖具备天然抗菌性和成膜性,纳米蒙脱石具有优异的气体阻隔性和湿度调节能力,而乳清分离蛋白则能形成致密的网络结构,增强薄膜的机械性能。

基于前期正交优化试验结果,确定纳米复合材料的最优配比为:壳聚糖质量浓度20g/L,蒙脱石质量浓度12g/L,乳清分离蛋白质量浓度60g/L。此配比下形成的纳米复合膜表现出最佳的综合性能^[1]:透气率550-800g/m²·24h,透湿率300-500g/m²·24h,

能够有效调节保鲜盒内气体和湿度环境,为甘薯创造适宜的贮藏条件。

表1 纳米复合材料配方优化表

组分	浓度范围(g/L)	最优浓度(g/L)	主要功能
壳聚糖	15-25	20	抗菌性、成膜性
纳米蒙脱石	8月15日	12	气体阻隔、湿度调节
乳清分离蛋白	50-70	60	增强机械性能

1.1.2 保鲜盒基体材料: 为控制成本并满足环保要求,保鲜盒基体材料选择聚丙烯(PP)作为主要基质,并添加玉米淀粉基可降解材料(添加比例30%)以增强生物降解性。盒体厚度设计为0.8-1.2mm,既保证了足够的机械强度(耐撕裂强度 $\geq 15\text{N/mm}$),又确保了材料的透气性。盒体尺寸设计为40cm \times 30cm \times 20cm,有效容积约24L,可容纳10-15kg甘薯。

1.2 保鲜盒结构设计

针对甘薯贮藏特性,保鲜盒采用模块化设计,具有以下结构特点:

1.2.1 透气微孔系统: 盒壁均匀分布直径50-100nm的微孔,通过纳米蒙脱石的层状结构调控气体交换速率,确保盒内CO₂浓度不超过5%(甘薯贮藏安全阈值)。

1.2.2 湿度调节层: 盒体内侧涂覆有纳米复合涂膜(厚度10-15 μm),其中的蒙脱石成分可吸附过量水分,并在环境湿度降低时释放水分,维持盒内相对湿度在85%-90%的稳定水平。

1.2.3 叠放结构: 盒体设计有堆叠卡槽,便于多层堆放而不压伤下层甘薯,同时保持空气流通。盒盖采用隐蔽式锁扣设计,确保密封性的同时便于开合。

1.3 制造工艺流程

纳米材料甘薯保鲜盒的制造工艺主要包括以下步骤:

1.3.1 纳米复合涂膜液制备: 将壳聚糖溶解于1%乙酸溶液中,磁力搅拌2h使其充分溶解;纳米蒙脱石经超声波分散30min后,与乳清分离蛋白溶液混合,最后将两种溶液混合搅拌4h,形成均匀的纳米复合涂膜液。

1.3.2 基体材料挤出成型: 将聚丙烯颗粒与玉米淀粉基可降解材料按比例混合,通过双螺杆挤出机在160-180 $^{\circ}\text{C}$ 下熔融共混,挤出成型为保鲜盒基体。

1.3.3 纳米涂布工艺: 采用喷涂技术将纳米复合涂膜液均匀涂布于保鲜盒内表面,涂布量为5-8g/m²,随后在50 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥固化20min,形成稳定的纳米复合膜。

1.3.4 质量检测与包装: 对成品保鲜盒进行密封性、力学性能检测,确保符合设计要求。

1.4 实验设置与评价方法

1.4.1 实验设计: 为验证纳米保鲜盒的实际效果,于2024年10月至2025年6月进行了为期8个月的贮藏实验。以市售普通塑料箱为对照组,纳米材料保鲜盒为实验组,每组设3个重复。每组

放置10kg新鲜甘薯(品种为“心香”),贮藏环境温度25 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度65 \pm 5%。

1.4.2 检测指标与方法: 所有数据采用SPSS 22.0进行方差分析,显著性水平设定为P<0.05。自贮藏开始,每10天进行一次称重和病害检测,主要指标包括:

(1) 水分损失率: 采用重量法测定,计算公式为:(初始重量-检测时重量)/初始重量 \times 100%。

(2) 病害指数: 检查甘薯表面霉变、软腐等情况,按病斑面积占总面积比例分级: 0级(无病斑)、1级(病斑面积 $\leq 5\%$)、2级(5%<病斑面积 $\leq 15\%$)、3级(15%<病斑面积 $\leq 30\%$)、4级(病斑面积>30%)。病害指数= \sum (病级 \times 该级薯块数)/最高病级 \times 总薯块数 $\times 100$ 。

(3) 生理指标: 包括呼吸速率(采用静置法测定)、丙二醛含量(硫代巴比妥酸法)、过氧化氢酶活性(紫外分光光度法)^[2]。

(4) 营养成分变化: 测定淀粉含量(斐林试剂法)、可溶性糖含量(蒽酮比色法)。

2 结果与讨论

2.1 保鲜盒性能测试结果

本研究开发的纳米材料保鲜盒在物理性能上表现出显著优势。如表2所示,与普通塑料箱相比,纳米保鲜盒在透气性、湿度调节性和抗菌性方面均有显著提升,同时保持了良好的机械性能。

表2 塑料箱与纳米保鲜盒性能对比表

性能指标	普通塑料箱	纳米保鲜盒	测试标准
透气率 g/m ² ·24h	1200-1500	500-800	GB/T 1037
透湿率 g/m ² ·24h	800-1000	300-500	GB/T 1037
抗菌率(%)	-	99.5(对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌)	GB/T 31402
耐撕裂强度(N/mm)	12-15	15-18	GB/T 16678
厚度(mm)	0.8-1.0	0.8-1.2	-

纳米保鲜盒的优异性能主要归因于纳米复合材料的独特结构。蒙脱石作为层状硅酸盐材料,其纳米级片层结构在聚合物基体中形成了曲折的路径,有效延长了气体分子的扩散路径,从而提高了材料的阻隔性能。同时,壳聚糖分子链上的氨基具有广谱抗菌性,可通过静电相互作用破坏细菌细胞膜,抑制微生物生长^[3]。这些特性的协同作用为甘薯长期贮藏创造了理想环境。

2.2 甘薯贮藏品质变化

2.2.1 水分损失率分析: 在整个8个月的贮藏期内,纳米保鲜盒表现出卓越的保湿性能。如图1所示,普通塑料箱中甘薯的水分损失率随贮藏时间延长持续上升,至贮藏结束(240天)时达到18.3%,远超甘薯品质保持的临界值(10%)。而纳米保鲜盒中的甘薯水分损失率显著降低,最终维持在8.7%,低于10%的目标要求。

值得注意的是,水分损失主要发生在贮藏前期(前60天),这与甘薯采后呼吸作用较强有关。纳米保鲜盒通过调控微环境气体组成,有效降低了甘薯的呼吸强度,减少了水分流失。贮藏中

后期(60-240天),水分损失速率明显减缓,表明纳米材料的湿度调节功能发挥了持续作用。

2.2.2病害发生情况:病害是甘薯长期贮藏的另一大挑战。由表3可见,随贮藏时间延长,两组甘薯的病害指数均有所上升,但纳米保鲜盒组的病害发生程度显著低于普通塑料箱组。

表3 甘薯贮藏期间病害指数变化(% ,均值±标准差)

贮藏时间(天)	普通塑料箱组(腐败率/%)	纳米保鲜盒组(腐败率/%)
30	2.3±0.5	1.2±0.3
60	5.6±0.8	2.8±0.6
90	9.7±1.2	4.3±0.7
120	15.4±1.8	6.2±0.9
150	22.6±2.3	8.5±1.1
180	30.3±3.1	11.7±1.4
210	38.5±3.7	14.6±1.8
240	45.2±4.2	17.3±2.1

至贮藏结束时,纳米保鲜盒组的病害指数仅为17.3%,显著低于普通塑料箱组的45.2%($P < 0.01$)。这一结果证实了纳米复合材料的抗菌保鲜功能。壳聚糖中的氨基质子化后形成的阳离子能与细菌细胞膜上的负电荷组分相互作用,改变膜通透性,引起细胞内容物泄漏,从而达到抑菌效果^[4]。此外,纳米蒙脱石具有吸附霉菌毒素的能力,进一步抑制了病害的发展。

2.2.3生理指标变化:在生理指标方面,纳米保鲜盒内的甘薯表现出更为稳定的代谢活性。呼吸速率测定结果显示,普通塑料箱中甘薯的呼吸强度在贮藏前期出现明显高峰,达到45.2mg CO₂/kg·h,而纳米保鲜盒组甘薯的呼吸强度始终维持在25-30mgCO₂/kg·h的较低水平。较低的呼吸强度有利于减少体内营养物质的消耗,这与可溶性糖和淀粉含量的测定结果一致。

丙二醛(MDA)含量是反映细胞膜脂过氧化程度的重要指标。普通塑料箱中甘薯的MDA含量从贮藏初期的0.10 μmol/g上升至240天时的0.38 μmol/g,而纳米保鲜盒组仅升至0.18 μmol/g,表明纳米保鲜盒能有效减轻甘薯细胞膜的氧化损伤。这一结果与过氧化氢酶(CAT)活性变化相符,纳米保鲜盒组甘薯的CAT活性始终高于普通塑料箱组,说明纳米材料处理增强了甘薯的抗氧化能力。

2.3成本分析

实现低成本是纳米保鲜盒能否推广应用的关键因素。基于塑料件成本构成模型,我们对10kg容量纳米保鲜盒的成本进行了详细分析^[5](表4)。

成本分析表明,单个保鲜盒的总成本可控制在3.00元,符合预期目标(≤3元/个)。这一成本结构主要通过以下优化措施实现:首先,采用玉米淀粉部分替代塑料基体,降低了原材料成本;

其次,通过一模多穴的模具设计(一次成型4个产品),降低了模具分摊成本;最后,优化生产工艺,将成型周期控制在20秒以内,提高了生产效率。

表4 10kg容量纳米保鲜盒成本分析

成本项目	金额(元/个)	计算依据
原材料成本	1.82	聚丙烯基体材料1.52元,纳米复合材料0.30元
模具分摊成本	0.35	模具造价4万元,使用寿命30万次
设备折旧成本	0.08	注塑机价格10万元,5年折旧期
加工成本(水电)	0.42	电费1.2元/度,水费3.2元/吨
人工成本	0.23	工人月收入5000元,生产效率2000个/天
管理成本	0.1	前五项总和的3%
总成本	3	-

值得注意的是,虽然纳米材料添加增加了部分成本,但其带来的保鲜效果提升显著降低了甘薯贮藏损耗。按减少损耗8-10%计算,每10kg甘薯可减少损失价值约12-15元,投入产出比高达1:4以上,具有显著的经济优势。

3 结论

本研究成功开发了一种基于壳聚糖/蒙脱石/乳清分离蛋白纳米复合涂膜的甘薯保鲜盒。经过8个月贮藏实验验证,该保鲜盒能将甘薯水分损失率控制在8.7%、病害指数降至17.3%,显著优于普通塑料箱。通过工艺优化,产品成本仅约3元/个,投入产出比达1:4以上,实现了透气、抗菌、保湿多功能一体化,具备良好的产业化应用前景。

[基金项目]

特色木薯、马铃薯、山药等产业关键技术研究与应用示范(2023YFD1600600)。

[参考文献]

- [1]罗丹,木泰华,孙红男.甘薯保鲜用纳米复合膜的配方优化与性能表征[J].现代食品科技,2023,39(3):200-207.
- [2]刘伟,陈蕊,黄晓梅.紫外分光光度法快速测定过氧化氢酶活性[J].分析实验室,2020,39(4):445-449.
- [3]木泰华,孙红男,罗丹.壳聚糖基纳米复合膜的制备与抗菌机理研究[J].食品科学,2022,43(16):50-56.
- [4]陈井旺,孙红男,木泰华.壳聚糖抗菌活性及其在食品保鲜中的应用[J].食品工业科技,2021,42(8):378-384.
- [5]王建军.塑料制品成本核算与控制[M].北京:化学工业出版社,2021.

作者简介:

胡婉君(2003--),女,汉族,湖北黄石人,大学本科,主要研究方向甘薯高效种植。