

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.09.006

周弦, 杨培华, 马慧慧, 等. SiNPs 处理对凤头姜仔姜贮藏保鲜品质的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(9): 65-73.

SiNPs 处理对凤头姜仔姜贮藏保鲜品质的影响

周弦¹, 杨培华¹, 马慧慧¹, 阳婷倩¹,
尚淼², 孙冲³, 朱永兴¹, 刘奕清¹1. 长江大学 园艺园林学院/香辛作物研究院, 湖北 荆州 434025;
2. 湖北省宜昌市农业科学院, 湖北 宜昌 443000; 3. 重庆文理学院 园林与生命科学学院, 重庆 永川 402160

摘要: 为探究二氧化硅纳米颗粒(SiNPs)处理对生姜(*Zingiber officinale* Roscoe.)采后贮藏品质的影响,以凤头姜仔姜为材料,用 100 mg/L SiNPs(SiNP100)溶液进行浸泡处理,分析仔姜在(12±1)℃、相对湿度为 85%~90%的贮藏条件下的品质和生理变化。结果表明, SiNP100 处理可有效延缓采后仔姜贮藏品质的变化。贮藏 28 d 时, SiNP100 处理的仔姜硬度、失重率、可溶性固形物、可溶性蛋白含量相较于对照分别提高了 7.76%, 57.81%, 26.76%和 19.74%; 过氧化物酶、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶活性相较于对照分别提高 149.18%, 90.01%和 10.27%; 苯丙氨酸解氨酶、多酚氧化酶活性与对照相比分别下降 8%, 62.28%; 类黄酮含量比对照提高 26.24%。综上, SiNPs 处理可有效维持采后仔姜的贮藏品质。

关键词: 生姜; 纳米硅; 贮藏; 保鲜; 品质中图分类号: S632.5; S609⁺.3 文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)09-0065-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of SiNPs Treatment on the Storage and Preservation Quality of Fengtou Tender Ginger

ZHOU Xian¹, YANG Peihua¹, MA Huihui¹, YANG Tingqian¹,
SHANG Miao², SUN Chong³, ZHU Yongxing¹, LIU Yiqing¹1. College of Horticulture and Landscape Architecture / Spicy Crops Research Institute, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434025, China;
2. Yichang Academy of Agricultural Sciences, Yichang Hubei 443000, China;
3. School of Landscape Architecture and Life Sciences, Chongqing University of Arts and Sciences, Yongchuan Chongqing 402160, China

收稿日期: 2024-04-08

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2022BBA0061, 2021BBA096); 重庆市调味品现代产业技术创新团队重大项目(2023CQMAITS007); 重庆英才优秀科学家项目(2022CQYC0101514); 长江大学大学生创新创业训练计划项目(Yz2023351)。

作者简介: 周弦, 硕士, 讲师, 主要从事生姜栽培与活性成分研究。

通信作者: 刘奕清, 教授。

Abstract: To investigate the effect of silicon dioxide nanoparticles (SiNPs) treatment on the postharvest storage and preservation quality of ginger, ‘Fengtou’ gingers were used as the material and treated with 100 mg/L SiNPs (SiNP100) solution, to analyze the preservation quality and the changes of tender ginger under storage conditions of $(12 \pm 1)^\circ\text{C}$ and relative humidity of 85%~90%. The results showed that soaking in SiNP100 solution can effectively maintain the storage quality of postharvest tender ginger. After storage for 28 days, compared with the control, the hardness, weight loss rate, soluble solids, and soluble protein content of SiNP100-treated tender ginger was increased by 7.76%, 57.81%, 26.76%, and 19.74%, respectively, the activities of peroxidase, catalase, superoxide dismutase was increased by 149.18%, 90.01% and 10.27%, respectively, the phenylalanine ammonia lyase and polyphenol oxidase activities was decreased by 8% and 62.28%, respectively. The flavonoid content was 26.24% higher than that of control. In summary, SiNPs treatment can effectively maintain the storage quality of postharvest tender ginger.

Key words: ginger; nano silicon; storage; postharvest preservation; quality

生姜(*Zingiber officinale* Roscoe.)起源于我国古代的长江、黄河流域,目前在全世界 50 多个国家和地区广泛栽培^[1].在我国,除极寒冷的东北和西北地区外,华东、华北、华南、西南和华中等地均有栽培.生姜风味独特,味辛辣,且富含蛋白质、维生素、膳食纤维等多种营养成分,能有效促进血液循环,具有增强免疫、抗肿瘤、抗衰老^[2]等功效.生姜作为我国传统的乡土特色蔬菜和中药材,已逐渐成为乡村振兴特色高效产业的优势作物^[1].仔姜又称嫩姜、菜姜,因其含水量高、纤维素少、口感脆嫩常作蔬菜食用,在长江流域已成为家中必备的酱腌菜^[3].仔姜通常在夏末秋初的酷热季节上市,贮藏保鲜极为困难,其风味和品质快速下降,容易造成极大的经济损失^[4-5].近年来,杀菌剂广泛应用于果蔬保鲜领域,杀菌剂虽然可杀死果蔬表面病菌,保鲜效果明显,但对人体健康易造成威胁,对环境易造成污染^[6].有研究表明,草酸、水杨酸、茉莉酸甲酯^[7]等新型环保材料已逐渐被应用到水果和蔬菜的保鲜生产实践中,可有效降低食品的腐烂率,保持其贮藏品质.

硅(Si)广泛存在于土壤中,占地壳总量的 26.4%,是仅次于氧(49.4%)的第二大元素.二氧化硅纳米颗粒(SiNPs)具有稳定性高、比表面积大、生物相容性好和无毒无味的特性,在农业领域已得到广泛应用^[8].Bhatnagar 等^[9]提出 SiNPs 可作为化学试剂的替代品来解决化学农药的污染问题,在延长作物贮藏期和保障粮食安全中具有巨大的应用潜力;Wang 等^[10]研究发现 SiNPs 提高了枇杷的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性,进而提高对自由基,包括 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基和羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的清除能力,抑制枇杷内部组织发生褐变和腐烂,维持品质、延长货架期;González 等^[11]研究发现 SiNP250 通过提高可溶性固形物、可滴定酸、维生素 C 的含量,从而保持贮藏时黄瓜的硬度,提高采后黄瓜的品质;前期在老姜中的研究表明, SiNP100 可通过提高 SOD、APX 和 CAT 等抗氧化酶活性,以及苯丙氨酸代谢和木质素代谢通路的相关基因表达,激活采后生姜的防御反应,降低生姜采后病害的发生,延长保鲜期^[12-13].目前关于 SiNPs 对仔姜贮藏保鲜品质的影响鲜有研究,本研究以湖北凤头姜仔姜为试验材料,采用 SiNPs 浸泡处理,探究 SiNPs 对凤头姜仔姜采后贮藏期间保鲜品质的影响,旨在明确仔姜保鲜过程中 SiNPs 对其品质是否具有保护作用,以期对仔姜采后保鲜技术提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 材料

供试仔姜品种为凤头姜,生长期为 150 d,2022 年 8 月 23 日从湖北省生姜品种及绿色生产技术转化中试基地采收,选取大小相近且无病虫害的姜块,洗净后 2 h 内运回长江大学香辛作物创新团队实验室. SiNPs 为 E551 食品级添加剂,纯度为 99.5%,粒径为 10 nm,购自于 Sigma-Aldrich 公司.

1.2 试验处理

前期预试验研究发现, 100 mg/L SiNP 溶液(SiNP100)处理可有效延长老姜贮藏期. 为进一步探究 SiNP100 对贮藏期间仔姜品质和生理特性的影响, 本研究设置两个处理. 1) 对照(CK): 清水浸泡处理仔姜 15 min; 2) SiNP100: 使用 100 mg/L SiNP 溶液(pH 值 7.34)浸泡仔姜 15 min. 处理后的仔姜在室内自然晾干, 用 10 μ m 的聚乙烯保鲜膜包好并置于冷藏库中贮藏 28 d. 冷藏库的温度为(12 \pm 1) $^{\circ}$ C、相对湿度为 85%~90%^[14-15]. 在贮藏期第 0 d, 7 d, 14 d, 21 d 和 28 d 取样, 每个时间点重复 3 次, 每次重复包含 6 块仔姜, 液氮速冻后置于-80 $^{\circ}$ C 冰箱备用. 另准备一组相同处理的仔姜用于测定贮藏 0 d, 7 d, 14 d, 21 d, 28 d 后的质量失重率, 每个处理每个时间点重复 3 次, 每次重复包含 3 块仔姜.

1.3 测定指标及方法

1.3.1 保鲜品质

外观品质观察. 在贮藏期第 0 d, 7 d, 14 d, 21 d 和 28 d 分别观察仔姜外观品质变化并拍照.

硬度的测定. 使用探头直径为 5 mm 的 TA-XT2i 硬度计(Stable Micro Systems, Guildford, UK)对仔姜硬度进行测定, 单位为 N. 挑选 6 个大小一致的仔姜, 每个仔姜选取中心位置表面平整点重复测定 3 次, 取平均值.

质量失重率的测定. 参考宋昕昕等^[16]方法称量记录样品第 0 d 的初始质量(m_0)与处理贮藏第 7 d, 14 d, 21 d, 28 d 的质量(m_1), 仔姜质量失重率的计算公式如下:

$$\text{质量失重率} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%$$

可溶性固形物测定. 参考段艳军等^[17]的方法, 取 0.5 g 仔姜组织, 加入液氮研磨至匀浆, 经 4 000 g/min 离心 15 min 后取上清液, 使用 PAL-1 型数显糖度计测定.

可溶性蛋白质测定. 参考李子煜等^[18]的方法, 采用考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白含量. 取 0.2 g 仔姜组织研磨成匀浆, 经 8 000 g/min 离心 20 min 后取上清液进行测定, 单位为 mg/g.

木质素含量测定. 采用乙酰溴比色法测定, 利用分光光度计测定 OD₂₈₀ 的吸光值, 计算木质素总含量, 具体步骤参照刘程惠等^[19]的方法.

1.3.2 抗氧化酶活性测定

通过氮蓝四唑(nitro-blue tetrazolium, NBT)光还原法测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性, 愈创木酚显色法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活性, 紫外吸收法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活性.

1.3.3 苯丙氨酸解氨酶活性测定

仔姜苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia lyase, PAL)活性测定采用 PAL 酶活检测试剂盒(索莱宝, BC0215). 取 0.1 g 研磨成粉的仔姜样品, 加入提取液, 充分混匀后以 10 000 g/min, 4 $^{\circ}$ C 离心 10 min, 具体步骤按照说明书进行操作.

1.3.4 多酚氧化酶活性测定

多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)测定采用 PPO 酶活检测试剂盒(南京建成, A136-1-1). 取 0.1 g 研磨成粉的仔姜样品, 加入提取液后匀浆, 8 000 g/min, 4 $^{\circ}$ C 离心 10 min, 具体步骤按照说明书进行操作.

1.3.5 类黄酮含量测定

采用亚硝酸钠-硝酸铝显色法测定, 根据样品在波长为 470 nm 处吸光度值计算仔姜类黄酮总质量分数^[20].

1.4 数据分析

所有试验平行重复 3 次, 结果以平均值 \pm 标准差表示; 采用 Origin 2018 软件绘图; 使用 SPSS 25.0 软

件进行显著性分析, $p < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 SiNP100 处理对仔姜贮藏保鲜品质的影响

2.1.1 SiNP100 处理对仔姜贮藏期外观品质的影响

随着贮藏时间的延长, 两种处理的仔姜均出现了光泽和亮度降低的表型变化特征。从贮藏 7 d 至 28 d, SiNP100 处理后的仔姜比 CK 色泽更好, 褐变的程度也更轻(图 1), 表明 SiNP100 处理对维持贮藏期间仔姜外观品质具有一定效果。

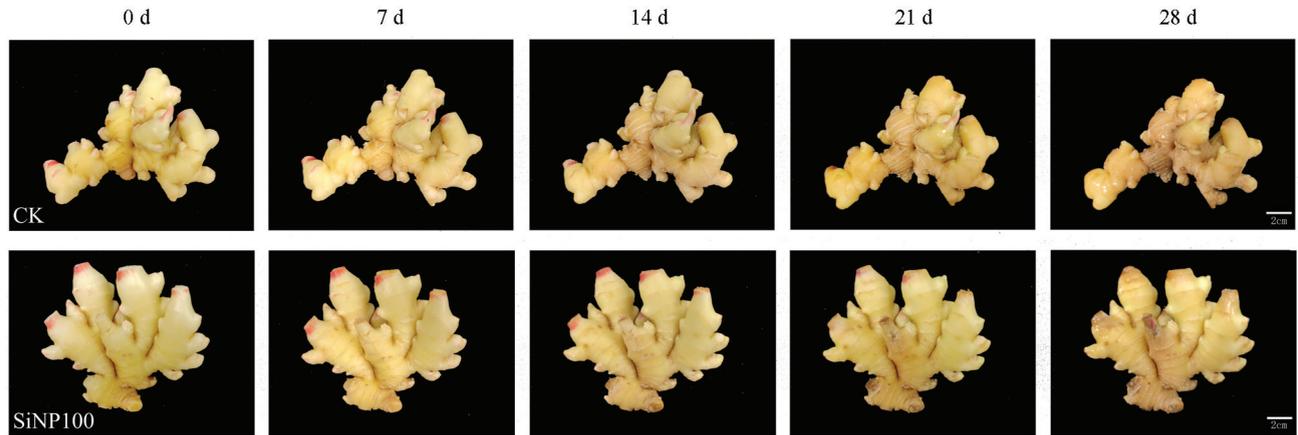


图 1 SiNP100 对仔姜贮藏外观的影响

2.1.2 SiNP100 处理对仔姜贮藏期硬度和质量失重率的影响

两种处理下的仔姜硬度都随贮藏时间的延长而下降。在贮藏 7 d, 14 d, 21 d, 28 d 时, CK 处理下的仔姜硬度分别下降了 16.48%, 13.87%, 23.57% 和 31.37%; SiNP100 处理后的仔姜硬度分别降低 10.90%, 12.52%, 17.89% 和 26.04%。同 CK 相比, SiNP100 处理下仔姜硬度下降幅度较小。在贮藏 28 d 时, 与 CK 相比 SiNP100 处理后的仔姜硬度显著提高了 7.76%(表 1)。

仔姜的质量失重率随着贮藏时间的延长而增大。SiNP100 处理后的仔姜质量失重率均低于 CK, 在贮藏第 7 d, 14 d, 21 d, 28 d 时, CK 条件下的仔姜质量失重率分别为 2.70%, 5.40%, 5.70%, 10.10%, SiNP100 处理后的仔姜质量失重率分别为 0.90%, 3.40%, 4.50%, 6.40%。在贮藏 28 d 时, CK 处理仔姜的质量失重率是 SiNP100 处理仔姜的 1.5 倍(表 1)。

2.1.3 SiNP100 处理对仔姜贮藏期可溶性物质的影响

仔姜的可溶性固形物含量随着贮藏时间的延长均呈下降趋势。整体上看, CK 处理仔姜的可溶性固形物下降幅度较快, SiNP100 处理仔姜的可溶性固形物下降幅度较平缓。在贮藏 7 d, 14 d, 21 d, 28 d 时, CK 处理仔姜的可溶性固形物分别降低了 24.64%, 42.51%, 35.32% 和 27.10%, SiNP100 处理仔姜的可溶性固形物分别下降了 9.03%, 11.70%, 10.68% 和 7.60%。在贮藏 28 d 时, 与 CK 相比 SiNP100 处理仔姜的可溶性固形物显著提高了 26.76%(表 1)。

仔姜的可溶性蛋白含量随贮藏时间呈下降趋势。在贮藏 7 d, 14 d, 21 d, 28 d 时, CK 处理仔姜的可溶性蛋白分别降低 17.49%, 20.20%, 28.01% 和 33.79%; SiNP100 处理仔姜的可溶性蛋白分别降低 3.40%, 12.22%, 16.47% 和 20.17%。在贮藏 28 d 时, 与 CK 相比 SiNP100 处理仔姜的可溶性蛋白显著提高了 19.74%(表 1)。

2.1.4 SiNP100 处理对仔姜贮藏期木质素含量的影响

仔姜的木质素含量随着贮藏时间的延长均呈增长趋势。SiNP100 处理仔姜的木质素含量增幅低于 CK,

且具显著差异性. 在贮藏 7 d, 14 d, 21 d, 28 d 时, CK 条件下的仔姜木质素含量分别上升 41.67%, 75.00%, 41.67% 和 50.00%; SiNP100 处理仔姜的木质素含量分别上升 25.00%, 41.67%, 25.00% 和 16.67%. 在贮藏 28 d 时, SiNP100 处理后的仔姜木质素含量比 CK 低 22.22% (表 1).

综上所述, SiNP100 可通过延缓仔姜硬度、降低仔姜质量失重率和可溶性固形物下降幅度、保持可溶性蛋白质质量分数并减少木质素积累来提高仔姜的贮藏品质.

表 1 SiNP100 处理对仔姜贮藏保鲜品质的影响

贮藏时间/ d	处理	硬度/ N	质量失重率/ %	可溶性固形物/ %	可溶性蛋白/ (mg · g ⁻¹)	木质素 (A280)
0	CK	28.34 ± 0.21	—	4.87 ± 0.09	5.89 ± 0.04	0.12 ± 0.01
	SiNP100	28.34 ± 0.21	—	4.87 ± 0.09	5.89 ± 0.04	0.12 ± 0.01
7	CK	23.67 ± 0.31	2.70 ± 0.01	3.67 ± 0.05	4.86 ± 0.01	0.17 ± 0.01
	SiNP100	25.25 ± 0.35*	0.90 ± 0.01*	4.43 ± 0.09*	5.69 ± 0.08*	0.15 ± 0.01*
14	CK	24.41 ± 0.43	5.40 ± 0.01	2.80 ± 0.01	4.70 ± 0.19	0.21 ± 0.01
	SiNP100	24.79 ± 0.45	3.40 ± 0.02*	4.30 ± 0.25*	5.17 ± 0.04	0.17 ± 0.02*
21	CK	21.66 ± 0.21	5.70 ± 0.01	3.15 ± 0.05	4.24 ± 0.09	0.17 ± 0.01
	SiNP100	23.27 ± 0.58*	4.50 ± 0.03*	4.35 ± 0.15*	4.92 ± 0.03*	0.15 ± 0.01
28	CK	19.45 ± 0.26	10.10 ± 0.02	3.55 ± 0.35	3.90 ± 0.02	0.18 ± 0.01
	SiNP100	20.96 ± 0.47*	6.40 ± 0.04*	4.50 ± 0.01*	4.67 ± 0.07*	0.14 ± 0.01*

注: * 表示同一贮藏时间处理与 CK 间差异有统计学意义 ($p < 0.05$).

2.2 SiNP100 处理对仔姜贮藏期抗氧化酶活性的影响

随着贮藏时间延长仔姜 POD 活性呈现先上升后下降的趋势. 在 CK 和 SiNP100 处理下的仔姜 POD 活性分别在贮藏第 14 d 和 7 d 达到峰值. 与 CK 相比, 在贮藏 7 d, 21 d, 28 d 时 SiNP100 处理后的仔姜 POD 活性分别升高了 22.93%, 86.99% 和 149.18% (图 2a). 仔姜 CAT 活性随着贮藏时间延长呈下降趋势. 在贮藏第 14 d, 21 d, 28 d 时, SiNP100 处理后的仔姜 CAT 活性均高于 CK, 分别升高了 37.37%, 51.11% 和 90.01%, 与 CK 差异有统计学意义 (图 2b). 随着贮藏时间的延长, 仔姜的 SOD 活性呈现先下降后上升的趋势. SiNP100 处理后的仔姜 SOD 活性显著高于 CK, 在贮藏第 14 d 和 28 d 时, SiNP100 处理后的仔姜 SOD 活性相对于 CK 分别升高了 23.09% 和 10.27% (图 2c).

2.3 SiNP100 处理对仔姜贮藏期苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 和多酚氧化酶 (PPO) 的影响

两种处理下的仔姜 PAL 活性随着贮藏时间的延长呈现先上升后下降的趋势, 但在贮藏第 7 d, 14 d, 21 d 时 SiNP100 处理后的仔姜 PAL 活性显著高于 CK, 分别提高了 26.86%, 35.43% 和 38.39% (图 3a). 仔姜 PPO 活性随着贮藏时间的延长也呈现先上升后下降的趋势. 在贮藏第 14 d 时, CK 处理与 SiNP100 处理的仔姜 PPO 活性基本一致, 但在贮藏第 7 d, 21 d, 28 d 时, SiNP100 处理后的仔姜 PPO 活性相对于 CK 显著降低, 分别降低了 18.65%, 37.72% 和 62.28% (图 3b).

2.4 SiNP100 处理对仔姜贮藏期类黄酮质量分数的影响

两种处理下的仔姜类黄酮含量随着贮藏时间的延长均呈下降趋势, SiNP100 处理后的仔姜类黄酮含量下降幅度显著低于 CK. 在贮藏 7 d, 21 d, 28 d 时, 与 CK 相比 SiNP100 处理后的仔姜类黄酮含量分别提高了 17.48%, 14.88% 和 26.24% (图 4).

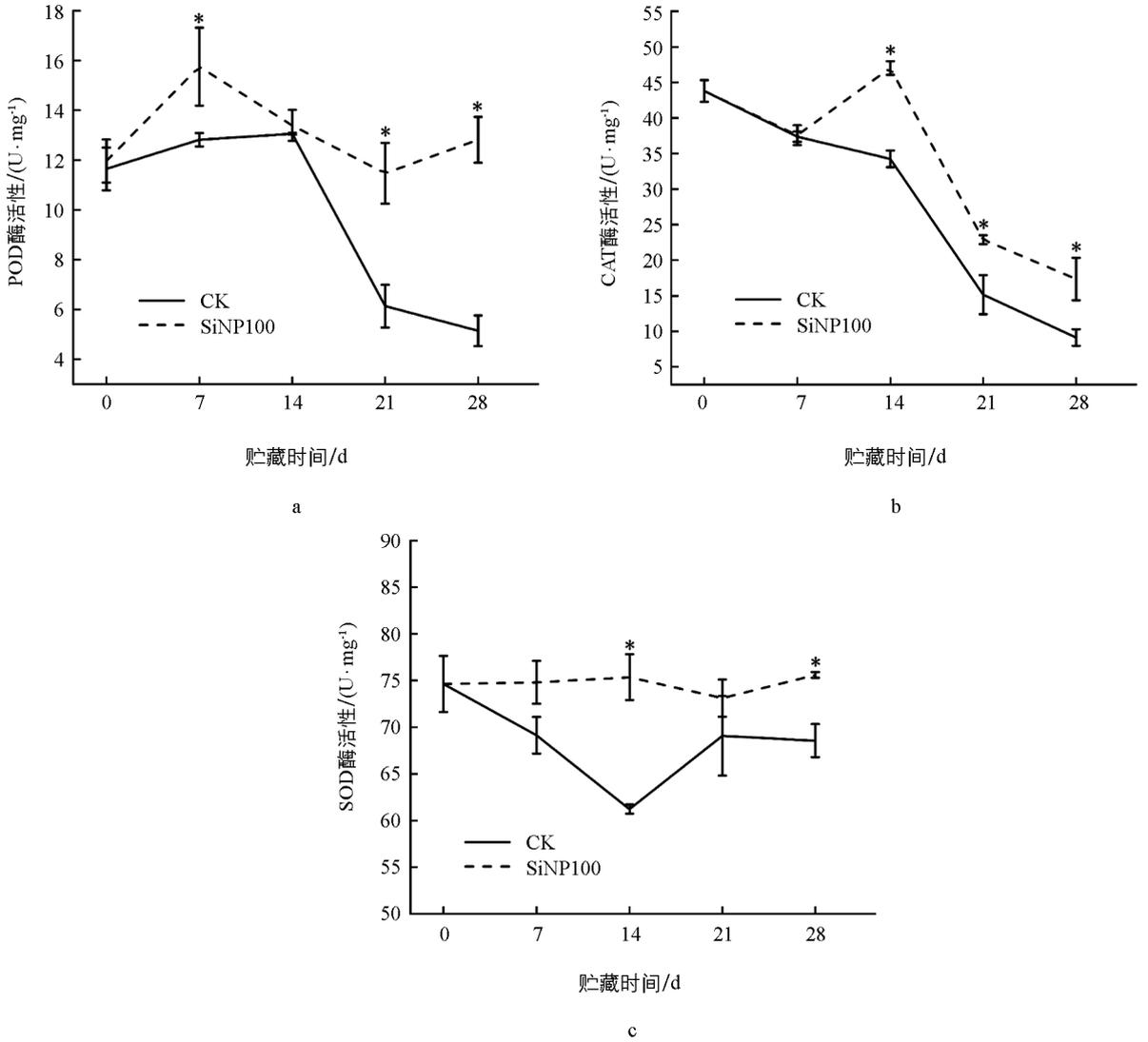


图 2 SiNP100 处理对仔姜贮藏期 POD(a)、CAT(b)和 SOD(c)活性的影响

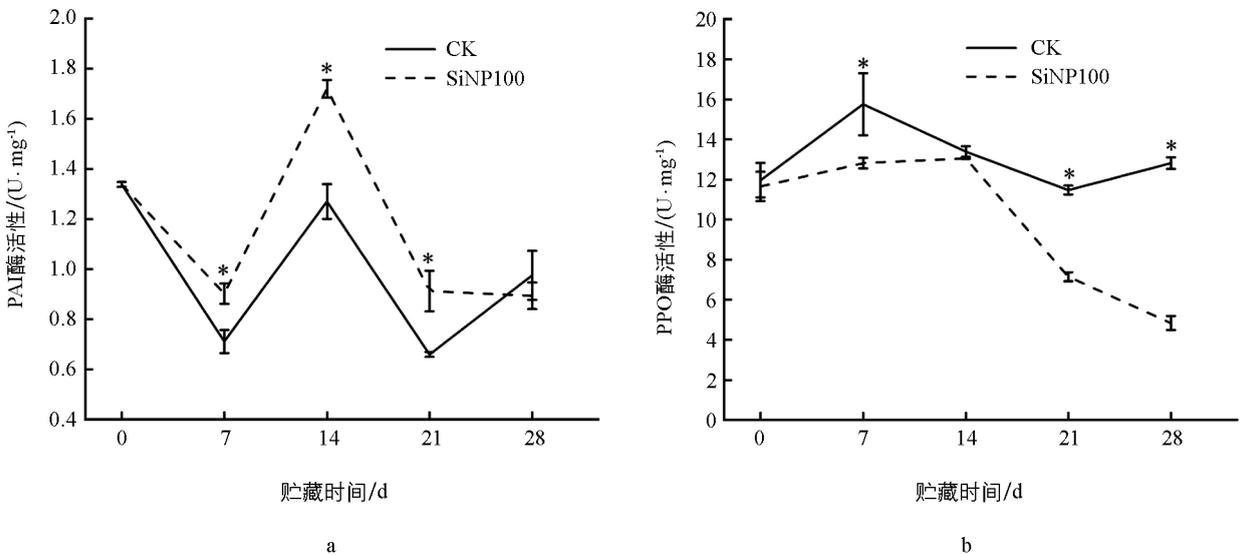


图 3 SiNP100 处理对仔姜贮藏期间 PAL(a)和 PPO(b)的影响

3 讨论

果蔬含水量是评价保鲜效果最直观的指标之一,而果蔬水分流失是造成失重率增加的主要原因^[21].研究表明,由于石榴果实在贮藏期失重率较大,表皮失水痕迹明显,显著降低了果实新鲜度^[22];青皮核桃的失重率随着贮藏时间的延长呈上升趋势,不利于核桃的长期储存^[23].而在仔姜组织中,水分含量高且表皮幼嫩,在采后贮藏过程中极易出现失水失重、霉变和腐烂等问题,直接影响仔姜的外观品质和经济价值^[24].本研究发现 SiNP100 处理后仔姜的质量失重率显著低于 CK,这可能是由于 SiNP100 在仔姜表皮沉积形成物理屏障,从而降低水分损失,防止仔姜失水萎蔫^[13].

可溶性固形物和可溶性蛋白是组成果实风味的重要物质,在一定程度上反映了果蔬在贮藏过程中营养物质总量,是评价果蔬品质的重要指标^[25].Wang 等^[10]研究发现 SiNPs 延缓了枇杷可溶性固形物、抗坏血酸和可溶性糖含量的下降,对延缓枇杷采后衰老,维持采后品质具有重要作用.本研究中,两种处理下仔姜的可溶性固形物和可溶性蛋白虽然随着贮藏时间的延长均呈下降趋势,但 SiNP100 下降幅度显著低于 CK,说明 SiNP100 可缓解采后贮藏期间可溶性固形物和可溶性蛋白的降解,从而延缓仔姜衰老.

研究表明纳米硅处理可以通过调节抗氧化酶活性清除果蔬体内的活性氧(reactive oxygen species, ROS)来延缓其成熟衰老、抑制乙烯的生物合成^[16, 26].Meng 等^[27]研究发现纳米硅可以显著提高樱桃 CAT、POD 和 SOD 活性,有效清除樱桃贮藏过程中产生的 ROS.本研究结果表明,与 CK 相比,在仔姜贮藏第 14 d, 21 d, 28 d 时, SiNP100 处理可通过维持较高水平 POD, CAT 和 SOD 活性来提高 ROS 清除能力,减轻 ROS 对细胞的伤害,从而延缓仔姜衰老腐烂.

果蔬中的酚类物质可经过 PPO 催化氧化形成醌类物质,进而聚合生成褐色物质引起果蔬褐变^[28].莲子中,0.4 mmol/L 水杨酸处理可显著抑制 PPO 活性,从而延缓了莲子褐变^[29].本研究中, SiNP100 处理显著降低仔姜 PPO 活性,这与 SiNP100 处理延缓仔姜褐变速率、保持了良好的外观品质的结果一致.

类黄酮作为果蔬中的酶促抗氧化剂,具有抗氧化作用,能够延缓果蔬衰老^[30].Peng 等^[13]研究表明添加纳米硅后老姜类黄酮含量显著高于 CK.本研究结果表明,贮藏第 14 d, 21 d, 28 d 时 SiNP100 处理后的仔姜类黄酮含量显著高于 CK,说明 SiNP100 可以促进类黄酮的合成,进而抑制仔姜的褐变程度,减少贮藏期间仔姜腐烂. PAL 是一种与植物抗病紧密相关的重要防御酶,其活性的增加可能会增强果蔬的抗病性,延缓果蔬腐烂和衰老,同时 PAL 作为催化苯丙烷代谢第一步反应的酶,与酚类物质、类黄酮等苯丙烷次生代谢产物的合成密切相关^[28].在本研究中, SiNP100 处理后仔姜的 PAL 活性在贮藏第 7 d, 14 d, 21 d 时显著高于 CK,推测 PAL 活性的增强可以促进类黄酮等次生代谢产物产生,抑制果实的褐变,提高仔姜抗逆性.

高等植物中,苯丙烷类次生代谢途径主要通过木质素合成途径、类黄酮合成途径等合成多种次生代谢物,在植物适应环境、抵御胁迫、品质形成等方面起着重要作用^[31].本研究发现, SiNP100 处理显著提高了 PAL 酶活性,延缓了类黄酮含量的降低,显著降低了木质素含量,推测 SiNP100 处理促进了仔姜中类黄酮的合成,而木质素合成途径则受到了抑制,导致木质素含量降低.研究表明,干旱胁迫下,硅处理可显著

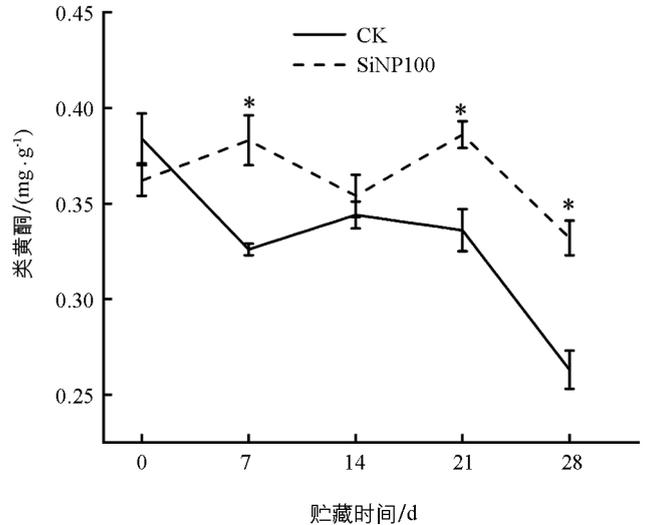


图4 SiNP100 处理对仔姜贮藏期间类黄酮质量分数的影响

增加番茄根系中木质素单体的含量,促进木质素的累积,表明木质素积累与硅诱导的番茄抗旱性有关^[32]. 本研究中, SiNP100 处理下仔姜质量失重率和木质素含量显著低于 CK, 推测 SiNP100 处理使仔姜的水分散失变缓, 而水分含量影响到了仔姜木质素的合成. 木质素大量沉积会增加细胞壁的厚度和硬度, 果蔬中木质素含量过高会影响食用品质^[33]. 因此, SiNP100 处理能减少仔姜贮藏期间木质素的积累, 保证仔姜的食用品质.

4 结论

综上所述, SiNP100 处理能显著降低仔姜贮藏质量损失, 延缓硬度与可溶性蛋白质含量的下降, 维持贮藏期间较高水平的可溶性固形物含量, 减少木质素含量增加, 提高 SOD, CAT, POD 和 PAL 酶活性, 同时抑制 PPO 活性, 减缓类黄酮含量的下降. 本研究可为纳米硅在仔姜采后保鲜中的应用提供理论参考.

参考文献:

- [1] 高伟, 席克勇, 尹军良, 等. 外源 SiNPs 对盐胁迫下生姜幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(9): 109-118.
- [2] 刘奕清, 朱永兴. 生姜高质高效生产 200 题 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
- [3] 鲁萌萌, 李文茹, 周少璐, 等. 生姜精油化学成分及其抗菌活性 [J]. 微生物学通报, 2021, 48(4): 1121-1129.
- [4] 刘怡妙, 凌悦, 徐旭, 等. 生姜的研究进展及其质量标志物的预测分析 [J]. 中草药, 2022, 53(9): 2912-2928.
- [5] 游玉明, 汤洁, 张美霞, 等. 外源 24-表油菜素内酯调控仔姜活性氧及酚类代谢减轻冷害 [J]. 食品科学, 2021, 42(3): 273-280.
- [6] 叶欣悦, 陆光磊, 须文. 不同保鲜剂对鲜食辣椒储藏品质的影响 [J]. 北方园艺, 2022(17): 92-99.
- [7] 梁惜雯, 徐冬颖, 陈晨, 等. 草酸、水杨酸、茉莉酸甲酯处理对甜樱桃采后贮藏品质的影响 [J]. 包装工程, 2022, 43(7): 18-25.
- [8] 卫元坤, 张优, 张政, 等. 基于缓蚀剂微/纳米容器的智能自修复涂层研究进展 [J]. 材料导报, 2023, 37(8): 176-185.
- [9] BHATNAGAR S, MAHANTA D K, VYAS V, et al. Storage Pest Management with Nanopesticides Incorporating Silicon Nanoparticles: a Novel Approach for Sustainable Crop Preservation and Food Security [J]. Silicon, 2024, 16(2): 471-483.
- [10] WANG L, SHAO S, MADEBO M P, et al. Effect of Nano-SiO₂ Packing on Postharvest Quality and Antioxidant Capacity of Loquat Fruit under Ambient Temperature Storage [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126295.
- [11] GONZÁLEZ-GARCÍA Y, FLORES-ROBLES V, CADENAS-PLIEGO G, et al. Application of Two Forms of Silicon and Their Impact on the Postharvest and the Content of Bioactive Compounds in Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Fruits [J]. Biocell, 2022, 46(11): 2497-2506.
- [12] ZHOU J, LIU X L, SUN C, et al. Silica Nanoparticles Enhance the Disease Resistance of Ginger to Rhizome Rot during Postharvest Storage [J]. Nanomaterials, 2022, 12(9): 1418.
- [13] PENG H M, HU H J, XI K Y, et al. Silicon Nanoparticles Enhance Ginger Rhizomes Tolerance to Postharvest Deterioration and Resistance to *Fusarium solani* [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 816143.
- [14] 赵朝光, 吴艺文, 万杨, 等. 3 种保鲜剂单独与复合处理对仔姜贮藏品质的影响 [J]. 保鲜与加工, 2023, 23(7): 19-26.
- [15] 王霜, 刘语思, 张光泉, 等. 二氧化氯处理对低温贮藏鲜切仔姜品质的影响 [J]. 食品科技, 2023, 48(3): 50-55.
- [16] 宋昕昕, 吕云皓, 王雨菲, 等. 紫外线辐照结合壳聚糖涂膜对哈密瓜贮藏品质的影响 [J]. 食品科学, 2023, 44(13): 159-165.
- [17] 段艳军, 田春娇, 朱英, 等. 不同取汁方法对枣果可溶性固形物含量测定的影响 [J]. 中国南方果树, 2022, 51(6): 218-220.

- [18] 李子煜, 吴婷, 马帅楠, 等. 不同干燥方式对西兰花茎和叶品质的影响 [J/OL]. 食品科学, (2023-12-07) [2024-01-03]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=143v0230px770t00qt0s0470gk014326&.site=xueshu_se.
- [19] 刘程惠, 李雯, 姜爱丽, 等. 不同真空包装材料对鲜切甘薯品质的影响 [J]. 包装工程, 2023, 44(9): 62-70.
- [20] 巴良杰, 孙雁征, 罗冬兰, 等. 丁香酚对西番莲保鲜效果及品质的影响 [J]. 食品科学, 2023, 44(21): 239-248.
- [21] HAJJI W, GLIGUEM H, BELLAGHA S, et al. Impact of Initial Moisture Content Levels, Freezing Rate and Instant Controlled Pressure Drop Treatment (DIC) on Dehydrofreezing Process and Quality Attributes of Quince Fruits [J]. Drying Technology, 2019, 37(8): 1028-1043.
- [22] 杨万林, 杨芳, 陈锦玉, 等. 贮藏时间对蒙自甜石榴营养品质及常温货架期间失重率的影响 [J]. 保鲜与加工, 2016, 16(6): 40-44.
- [23] 丁真真, 夏娜, 刘艳全, 等. 两种天然保鲜剂对气调包装青皮核桃贮藏期品质的影响 [J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(2): 271-278.
- [24] LV J Y, BAI L, HAN X Z, et al. Effects of 1-MCP Treatment on Sprouting and Preservation of Ginger Rhizomes during Storage at Room Temperature [J]. Food Chemistry, 2021, 349: 129004.
- [25] 楼君, 索金伟, 张慧, 等. 褪黑素处理对高节竹笋低温贮藏过程中木质化的影响 [J]. 林业科学, 2019, 55(12): 41-49.
- [26] 王斯彤, 王聪雅, 刘怡菲, 等. 不同保鲜处理对软枣猕猴桃贮藏及抗氧化性的影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(3): 302-308.
- [27] MENG X Y, CHEN C, SONG T, et al. Effect of Nano-Silica Coating Combined with Pressurized Ar Treatment on Postharvest Quality and Reactive Oxygen Species Metabolism in Sweet Cherry Fruit [J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131715.
- [28] 韩丽春, 何雪莲, 郑鄢燕, 等. 外源一氧化氮对扁豆采后贮藏品质的影响 [J]. 食品科学, 2023, 44(13): 175-182.
- [29] 严锐, 韩延超, 吴伟杰, 等. 水杨酸处理对鲜莲采后品质及抗氧化酶活性的影响 [J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 235-245.
- [30] 方静, 谷会, 李蕊, 等. 肉桂精油复合壳聚糖处理对采后芒果的保鲜效果 [J]. 中国南方果树, 2023, 52(6): 97-103.
- [31] 郭光艳, 柏峰, 刘伟, 等. 转录因子对木质素生物合成调控的研究进展 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(7): 1277-1287.
- [32] XIE J Q, CAO B L, XU K. Uncovering the Dominant Role of Root Lignin Accumulation in Silicon-Induced Resistance to Drought in Tomato [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259(Pt 1): 129075.
- [33] 刘仁婵, 吉宁, 王瑞, 等. 6-苄基氨基嘌呤结合柠檬酸复合处理对水晶葡萄采后品质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(9): 246-254.

责任编辑 王新娟