

纳米 TiO₂ 保鲜液对冬枣烂果病及生理品质的影响

刘芳, 闫晨卉, 陈莹莹, 郭红莲*

(天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 纳米材料抗菌防腐作用已在很多领域广泛应用, 但由于粒子聚集作用, 其抑菌性难以充分发挥。纳米粒子与高分子材料复合可在一定程度上阻止纳米颗粒的聚集, 所以将纳米材料复合成高分子复合体应用于农产品防腐保鲜领域将有广泛前景。该研究利用组织分离法从冬枣果实上分离得到了病原真菌, 并应用科赫法则验证了其致病性, 以羧甲基纤维素钠为基质混合纳米 TiO₂ 配成复合保鲜液, 对分离得到的致病菌进行了平板抑菌实验, 并初步探索了其抑制机理。结果表明, 分离得到的冬枣果实致腐菌为半知菌亚门镰孢菌属 (*Fusarium* sp.) 真菌, 离体实验表明纳米 TiO₂ 复合保鲜液对镰孢菌生长有抑制作用, 对病原孢子的最低抑菌质量浓度和最低杀菌质量浓度分别为 9.77×10^{-3} g/L 和 39.06×10^{-3} g/L, 纳米 TiO₂ 保鲜液主要通过破坏真菌细胞膜来抑制病原菌的生长; 冬枣保鲜研究证实, 保鲜液明显降低果实腐烂率并延缓了果实 Vc 含量的降低。综上, 纳米 TiO₂ 与 CMC-Na 复合液可以作为一种有效的抑菌手段应用于采后枣果的镰孢菌防治, 为延长冬枣果实保鲜期提供有效的技术支持。

关键词: 冬枣; 纳米 TiO₂ 保鲜液; 镰孢菌; 采后病害

文章编号: 1673-9078(2023)03-202-208

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.3.0307

Effects of Nano-TiO₂ Preservation Solution on Fruit Rot Disease and Physiological Quality of Dongzao Jujube

LIU Fang, YAN Chenhui, CHEN Yingying, GUO Honglian*

(College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Nanomaterials have been widely used in many fields for their antibacterial and antiseptic effects, but their antibacterial properties can not be brought into full play due to the aggregation of particles. The composite of nanoparticles and polymer materials can prevent the aggregation of nanoparticles to a certain extent, so turning nanomaterials into polymer composites for the applications in the field of antiseptics and preservation of agricultural products will have a broad prospect. In this study, pathogenic fungi were isolated from Dongzao jujube by the tissue isolation method, and their pathogenicity was verified by the Koch's law. The compound preservative was prepared by mixing nano-TiO₂ with the substrate, sodium carboxymethyl cellulose. The plate bacteriostasis experiment was carried out on the isolated pathogenic bacteria, and the inhibition mechanism was preliminarily explored. The results showed that the isolated Dongzao jujube fruit rot was *Fusarium* sp. In vitro experiments showed that the nano-TiO₂ compound preservative solution inhibited the growth of *Fusarium* sp. The minimum inhibitory concentration and minimum bactericidal concentration on pathogenic spores were 9.77×10^{-3} g/L and 39.06×10^{-3} g/L respectively. The nano-TiO₂ preservative solution inhibited the growth of pathogen mainly by destroying the fungal cell membrane; the research on the preservation of Dongzao jujube confirmed that the preservative solution can significantly reduce the rate of fruit rot and delay the reduction of the Vc content in the fruit. In conclusion, the composite solution of nano-TiO₂ and CMC-Na can be used as an effective antibacterial means to control *Fusarium* in the postharvest jujube fruits, which provides effective technical support for prolonging the shelf-life of dongzao jujube.

Key words: Dongzao jujube; nano-TiO₂ preservation solution; *Fusarium*; postharvest disease

引文格式:

刘芳, 闫晨卉, 陈莹莹, 等. 纳米 TiO₂ 保鲜液对冬枣烂果病及生理品质的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(3): 202-208.

LIU Fang, YAN Chenhui, CHEN Yingying, et al. Effects of nano-TiO₂ preservation solution on fruit rot disease and physiological quality of Dongzao jujube [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(3): 202-208.

收稿日期: 2022-03-18

基金项目: 天津市食品质量与健就好重点实验室开放课题 (TJS202101)

作者简介: 刘芳 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品物流保鲜与加工, E-mail: 17853463668@163.com

通讯作者: 郭红莲 (1971-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工与品质控制, 病原微生物防控方面的研究工作, E-mail: guohonglian@tust.edu.cn

冬枣是广泛种植于淮河秦岭以北地区的水果,因成熟期在寒露前后,故得名“冬枣”^[1]。其果肉鲜嫩多汁,甘甜清香,且含多种生物活性物质,具有很高的营养价值及保健功能,深受广大群众的喜爱^[2,3]。但是由于冬枣皮薄质脆的特点,加之呼吸作用强、营养成分多等易使霉菌在果实伤口处侵染繁殖,进而造成霉烂等现象,降低其商品价值和食用价值^[4,5]。

纳米材料属于非抗菌素杀菌剂,在果蔬保鲜领域有广泛应用,纳米抑菌剂、纳米包装材料等已有应用于果蔬保鲜并有显著效果的报导^[6-9]。纳米 TiO₂ 能产生强氧化物羟基自由基(OH)和活性氧(ROS)等,会破坏菌体细胞结构导致菌体死亡,且具有化学和热稳定性、无毒、成本低廉等特点,但因为粒子聚集效应明显,限制了其抑菌效力^[10,11]。传统果蔬涂膜保鲜是通过降低果蔬与外界的气体交换,减少水分丧失并防止病原微生物的侵染,进而实现延长果蔬保鲜时间的目的^[12,13]。为延长冬枣的货架期,满足日益增长的市场需求,单一的保鲜技术已无法适应人们对冬枣日益增长的需求,将物理、化学、生物等方法复合来延长枣果的保鲜期,扬长避短,才能研究出更环保、更有效的复合保鲜方法^[14,15]。

有报道表明,高分子物质可与纳米粒子复合交联成网状结构而减少其聚集^[16,17]。所以本研究将纳米 TiO₂ 复配羧甲基纤维素钠制成一种复合果蔬保鲜液,利用羧甲基纤维素钠的成膜性及纳米 TiO₂ 抑菌性制成的保鲜液囊括了原有涂膜保鲜优点的同时可以抑制病原菌的繁殖,进一步延长果蔬保鲜期,可以作为一种优良的新型保鲜方式应用于冬枣。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

材料:实验所用沾化冬枣购自天津汉沽果园,取回后选择相同成熟度,颜色、大小、硬度一致,无机械伤和病变的果实,以流水冲洗 5 min,晾干后备用;培养基所用土豆购自天津明耀超市。

试剂:纳米 TiO₂, 购自北京索莱宝科技有限公司;羧甲基纤维素钠(CMC-Na)、次氯酸钠、2,6-二氯酚,考马斯亮蓝、牛血清蛋白,以及培养基所用葡萄糖、琼脂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

台式高速冷冻离心机(TGL-16M),长沙湘仪离心机仪器有限公司;紫外分光光度计(TU-1810),北京普析通用仪器有限公司;垂直流超净工作台,上海

智城分析仪器制造有限公司;Nikon 光学显微镜,上海拓精工业检测仪器有限公司;多功能酶标仪,美国伯腾仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 致病菌分离

将带病斑的冬枣果实表面清洗后于无菌操作台内进行病组织分离,方法参考郭红莲等^[18],取枣果病斑病健交界处组织,置于 PDA 固体培养基平板上 28 °C 恒温培养,得到的菌落小心挑取菌丝三区划线培养,直到纯化得到单细胞菌落为止,记录菌落和菌丝形状,菌种-20 °C 保存用于后续实验。

1.3.2 回接验证和病菌鉴定

依照科赫法则回接验证病原菌致病性,确定果实发病症状,菌落和孢子形态并依照真菌鉴定手册鉴定病原菌。

1.3.3 纳米 TiO₂ 复合液抑菌性研究

称取一定量 CMC-Na 和 TiO₂ 粉末于烧杯中加蒸馏水,保鲜膜封口,静置 12 h 待体系均匀后超声震荡 20 min 去除气泡,按上述方法分别配置 1.00 g/L 纳米 TiO₂ 溶液、20.00 g/L CMC-Na 溶液和 1.00 g/L 纳米 TiO₂+CMC-Na 保鲜液(保鲜液中 CMC-Na 浓度皆为 20.0 g/L)。

制备孢子浓度为 1×10^5 CFU/mL 的 PDA 平板^[19]。将提前配置好的三种溶液用滤纸片吸附后置于含孢子平板中央,以吸附无菌水为对照。28 °C 恒温恒湿培养箱培养 5 d 观察孢子的萌发状态。通过抑菌圈是否出现以及抑菌圈直径来验证以上三组分对镰孢菌生长的抑制作用。

1.3.4 最低抑菌浓度 MIC 和最低杀菌浓度 MBC 的测定

为检测纳米 TiO₂ 保鲜液的抗菌活性,参考王利利^[20]、曾荣^[21]方法利用 96 孔板法测定纳米 TiO₂ 对镰孢菌孢子的最低抑菌浓度,初始纳米 TiO₂ 质量浓度 2.50 g/L,依次两倍梯度稀释;测出 MIC 后将该质量浓度以上的孢子悬液接种到固体培养基上培养过夜,24 h 后观察,无菌落长出者为复合液对镰孢菌孢子的 MBC。

1.3.5 纳米 TiO₂ 保鲜液对菌落扩展的影响

利用药平板抗菌法^[22]测量镰孢菌在 PDA 平板上的延伸直径来计算抑菌率,使最终平板中保鲜液纳米 TiO₂ 质量浓度 4 倍梯度稀释依次为 1.00 g/L (A)、0.25 g/L (B)、0.06 g/L (C)、0.02 g/L (D),反接入培养 5 d 的镰孢菌边缘菌片,每隔 24 h 测量菌落生长直径,以加入等量无菌水作为空白对照,实验重复三次。

$$B_1 = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

B_1 ——纳米 TiO_2 保鲜液在 PDA 平板上的抑菌率, %;

d_1 ——对照组直径, cm;

d_2 ——实验组直径, cm.

1.3.6 纳米 TiO_2 保鲜液对菌体生物量的影响研究

参考赵月^[23]的方案, 98 mL PDB 培养基中按照 2% (V/V) 接种量接入纳米 TiO_2 质量浓度 25.00、12.50、6.25、3.123 g/L 的保鲜液, 用以分析纳米 TiO_2 保鲜液在 PDB 培养基中对镰孢菌菌体生物量的影响。

$$B_2 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B_2 ——纳米 TiO_2 保鲜液在 PDA 平板上的抑菌率, %;

m_1 ——对照组干重, g;

m_2 ——实验组干重, g.

1.3.7 纳米 TiO_2 保鲜液对镰孢菌细胞渗出物的测定

取液体 PDB 培养 3 d 的镰孢菌丝体 4 000 r/min 离心 15 min, 无菌水洗涤三次, 再悬浮于 45 mL 的磷酸缓冲液 (pH 值 6.8) 中孵育过夜。加入 5 mL 纳米 TiO_2 浓度为 5.00 g/L 保鲜液, 摇匀后静置 5 min, 按照 Bradford 法^[24]用紫外分光光度计 595 nm 每隔 2 h 测定菌液中蛋白质含量; 紫外分光光度 260 nm 每 2 h 测定菌液中核酸含量, 对照组用无菌水代替纳米 TiO_2 保鲜液^[25]。

1.3.8 纳米 TiO_2 保鲜液对冬枣果实自然发病的影响

按前面预处理的枣果, 分成两组, 一组浸于纳米 TiO_2 保鲜液中 (保鲜液中纳米 TiO_2 浓度为上文测定的 MIC), 另一组浸于无菌水中为对照组, 20 min 后取出晾干, 室温 (20 °C) 置于泡沫箱中保持湿度, 观察发病情况。发病标准: 冬枣果实表面是否有明显的菌丝体生长并伴随果皮皱缩; 枣果表面是否有明显的褐色或黑色病斑, 局部凹陷、变软, 果肉颜色变为红褐色或黑褐色; 枣果近闻丧失原本清香味并有明显的发酵酒味或腐败的味道; 果实表面有非人为原因造成的非病斑类创口等; 以上条件出现一至多条则判定该冬枣已发病, 符合前三的任意一点则可判定为是由微生物引起的腐烂变质。

1.3.9 纳米 TiO_2 保鲜液对冬枣维生素 C 含量的影响

采用 2,6-二氯酚法测定枣果贮存期 Vc 含量变化^[26]。

1.4 数据处理

数据采用 Origin 2017 软件作图, 数据统计分析采用统计软件 SPSS 19.0 进行显著性分析, $P < 0.05$ 表示组间差异显著。

2 结果与分析

2.1 致病性检测结果及致病菌鉴定

通过组织分离法分离出的菌种在 PDA 固体培养基上生长 5 d 后, 菌落与培养基结合紧密, 初始为白色, 后期产色素逐渐变为粉色或粉紫色与白色混合, 菌落背面颜色更深, 生长速度较快, 有蕈菌味, 分生孢子呈镰刀形, 如图 1。致病菌接种于无伤枣果并常温 (20 °C) 放置 3 d 后, 孔中长出白色菌丝体, 病处轻微凹陷, 接种 7 d 后, 病斑处严重腐烂凹陷, 白色菌丝体覆盖大半枣果, 冬枣果肉颜色变深, 经过与自然发病果实比对, 确定分离出的菌株为冬枣果实致病菌, 对照组枣果未出现明显发病症状。结合菌株形态学及显微镜观察、真菌鉴定手册判定致病菌为镰孢菌 (*Fusarium* sp.)。



图 1 冬枣接种发病症状及镰孢菌宏观、微观图

Fig.1 The symptoms of winter jujube inoculation and the macroscopic and microscopic pictures of *Fusarium*

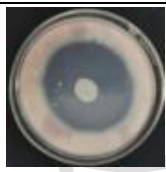
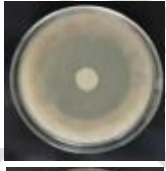
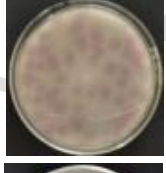
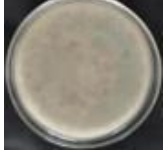
2.2 纳米 TiO_2 保鲜液抑菌性实验

纳米材料具有性能优异, 阻隔性好, 光催化活性以及安全无毒的特点, 且有实验证明磁纳米粒对多种有机农药具有优良的吸附纯化性能, 是很有发展前景的新型保鲜防腐剂^[27,28]。但是纳米粒子表面能大, 以及颗粒间存在的范德华力、氢键等各种作用力, 极易发生团聚, 其次是纳米粒子在果蔬表面的附着力, 都会影响到抑菌时间及效果, 为保证纳米粒子聚集影响

效果所以将纳米材料于成膜材料进行复合^[29]。从表 1 可以看出,相较于对照组,吸附了纳米 TiO₂ 溶液和纳米 TiO₂ 保鲜液的滤纸片周围孢子受到明显抑制,形成了抑菌圈,纳米 TiO₂ 组和纳米 TiO₂ 保鲜液组抑菌圈直径分别为 5.99、6.02,差异性不显著 ($P>0.05$),纳米 TiO₂ 溶液和纳米 TiO₂ 保鲜液对镰孢菌有显著抑制作用,而 CMC-Na 溶液组同对照组孢子萌发状况基本一致,说明 CMC-Na 没有抑菌性,纳米 TiO₂ 保鲜液对镰孢菌有抑制作用且抑菌物质为纳米 TiO₂,同时说明 CMC-Na 虽然没有抑菌性,但是也不会影响纳米粒子的抑菌性能,在体系中仅作为保鲜液基质存在。纳米 TiO₂ 保鲜液对镰孢菌孢子的最低抑菌浓度为 9.77×10^{-3} g/L,最低杀菌浓度为 39.06×10^{-3} g/L。综上所述说明纳米 TiO₂+CMC-Na 复合保鲜液对镰孢菌有抑制作用且抑菌性较强。

表 1 不同溶液与产生抑菌圈直径比较

Table 1 Comparison of diameters of bacteriostatic circle produced by different solutions

溶液组别	抑菌圈直径/cm	附图
纳米 TiO ₂ 溶液	5.99±0.03 ^a	
纳米 TiO ₂ 保鲜液	6.02±0.02 ^a	
CMC-Na 溶液	0	
CK	0	

注:各溶液抑菌圈直径表示为平均值±标准差,每行中的字母代表差异显著 ($P>0.05$, 差异不显著)。

2.3 纳米 TiO₂ 保鲜液在 PDB 培养基中对菌丝生物量的影响

如图 2 所示,镰孢菌在液体培养基中静置培养 5 d 后,随纳米 TiO₂ 保鲜液浓度变小,菌丝数量明显增加,培养液浑浊程度加深,越高浓度纳米 TiO₂ 保鲜液的加入,对镰孢菌菌丝肉眼可见生物量影响程度越大,如

图 3 所示,纳米 TiO₂ 浓度为 25.00 g/L 对镰孢菌抑制率高达 86.35%,结果表明保鲜液中纳米 TiO₂ 浓度越高,镰孢菌菌丝生物量越小,抑制率越高。保鲜剂组和对对照组对镰孢菌生物量抑制率差异显著 ($P<0.05$)。

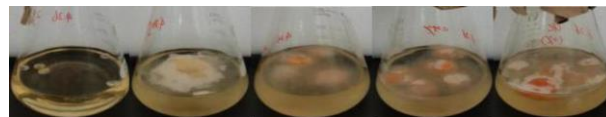


图 2 不同浓度纳米 TiO₂ 保鲜液对镰孢菌菌丝体的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of nano-TiO₂ fresh-keeping solution on *Fusarium mycelium*

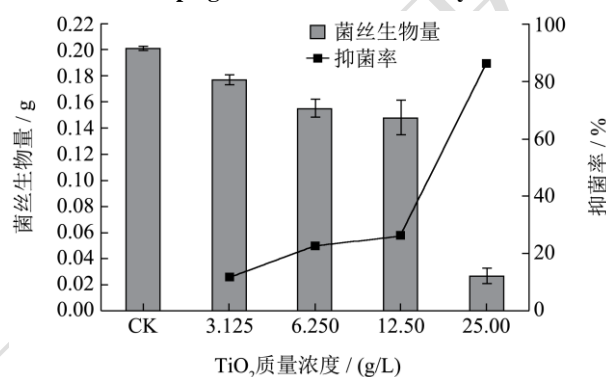


图 3 不同浓度纳米 TiO₂ 保鲜液对镰孢菌菌丝生物量和抑制率的影响

Fig.3 Effect of nano-TiO₂ fresh-keeping solution with different concentrations on *Fusarium mycelial biomass and inhibition rate*

2.4 不同浓度纳米 TiO₂ 保鲜液在 PDA 培养基上对镰孢菌菌落扩展的影响

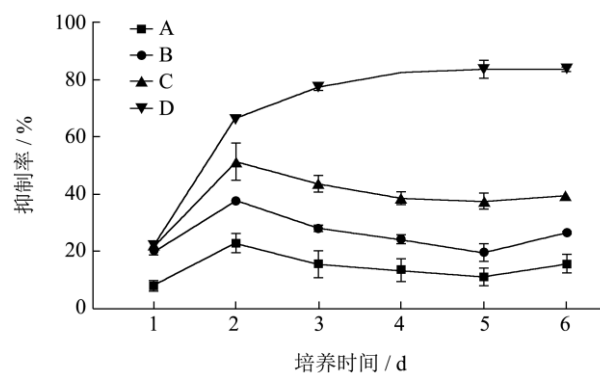


图 4 不同浓度纳米 TiO₂ 保鲜液对镰孢菌菌落扩展抑制率的影响

Fig.4 Effect of different concentrations of nano-TiO₂ fresh-keeping solution on the inhibition rate of *Fusarium colony expansion*

注:纳米 TiO₂ 保鲜液浓, A 为 1.0 g/L、B 为 0.25 g/L、C 为 0.06 g/L、D 为 0.02 g/L。图 5 同。

如图 4 所示,当有纳米 TiO₂ 保鲜液存在时,随着纳米 TiO₂ 浓度的降低镰孢菌菌落直径越大,证明抑菌

率越低。如图 4 所示,在一定浓度内,随着纳米 TiO₂ 浓度的增加,对镰孢菌菌落扩展的抑制率不断增强,在培养到第 6 天时 CK 组直径达到最大, A 组抑菌率达到了 83.33%,表明纳米 TiO₂ 保鲜液对镰孢菌的抑菌率与纳米 TiO₂ 浓度成正比,该结果与 2.3 结论一致。

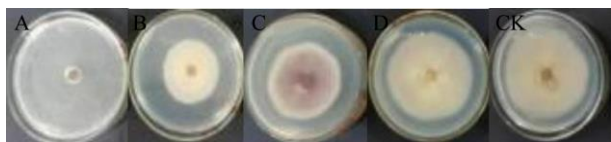


图 5 不同浓度纳米 TiO₂ 保鲜液对镰孢菌菌落扩增的影响 (第 5 天)

Fig.5 Effects of different concentrations of nano-TiO₂ fresh-keeping solution on *Fusarium* colony expansion (the fifth day)

2.5 纳米 TiO₂ 保鲜液对镰孢菌细胞渗出物测定结果

由于纳米 TiO₂ 的作用,可使微生物的细胞膜渗透性改变或破裂,内容物析出,在分光光度计下测量吸光度,吸光度大小与内容物析出的量成正比,内容物析出的量与微生物菌膜的破坏程度呈正比^[30]。通过考马斯亮蓝法绘制蛋白标准曲线,得出吸光度(y)与蛋白含量(x)的公式: $y=0.5914x+0.0027$, $R^2=0.999$,相关性较好。如图 6 所示,菌液中蛋白质含量随纳米 TiO₂ 作用时间逐渐上升,在 14 h 时基本达到稳定,菌液中核酸类物质含量与蛋白质曲线基本一致。结果表明,当纳米 TiO₂ 作用于镰孢菌时,能够改变镰孢菌菌膜透性或直接破坏细胞膜,导致镰孢菌细胞内容物外渗,在 14 h 时蛋白质及核酸类物质含量不再增加,推测是镰孢菌菌膜被纳米 TiO₂ 彻底破坏或是细胞内容物已完全流出。

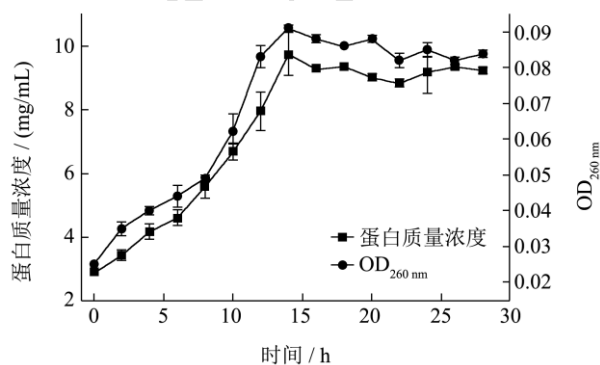


图 6 蛋白含量及 OD₂₆₀ 曲线

Fig.6 Protein content and OD₂₆₀ curve

本实验从枣果上分离出一株镰孢菌具有寄主广泛、危害大的特点,可以导致豌豆枯萎病、大豆根腐病、白莲腐败病等^[31-33]。镰孢菌与链格孢、青霉、

芽枝孢等协同会导致枣果枯萎病、黑点病、黑斑病以及果腐病等^[34,35]。纳米粒子对镰孢菌的抑菌性通过实验已经得到了验证,但是关于确切的抑菌机理还需要进一步探讨,其次是镰孢菌可通过种子和土壤传播,危害植株以及果实,从另一方面增加了防治的难度,还需要继续深入研究抑菌防腐的方法才能满足实际需求^[36]。

2.6 纳米 TiO₂ 保鲜液对冬枣果实自然发病的影响

根据图 7 发现随着贮藏时间延长,冬枣果实发病率逐渐上升,且对照组果实发病率一直显著高于实验组,至贮藏第 28 天,对照组冬枣发病率为 86.67%,而实验组果实发病率仅为 33.33%;关于霉腐率结果表明,保鲜液能有效降低冬枣的发病率,证明保鲜液能显著降低有致腐微生物引起的枣果腐败变质;与纳米 TiO₂ 溶液单独处理的枣果相比,保鲜液组发病率明显更低,结合 2.2 的结果,保鲜液中的 CMC-Na 成分对镰孢菌无明显抑制作用,推测是 CMC-Na 作为一种增稠剂增加了纳米粒子在果实表面的附着力及附着时间,进而增强了保鲜液抑制冬枣发病率的作用。综上所述,纳米 TiO₂ 保鲜液能够有效抑制冬枣果实发病,延长果实的贮藏期。保鲜液组和对照组发病率差异显著 ($P<0.05$)。

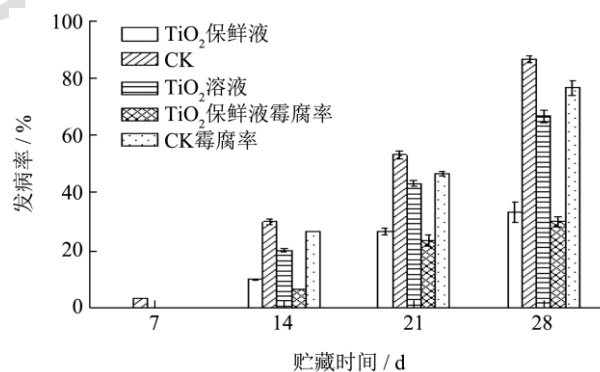


图 7 纳米 TiO₂ 保鲜液对冬枣自然发病率的影响

Fig.7 Effects of nano-TiO₂ on natural incidence of dongzao jujube

2.7 纳米 TiO₂ 保鲜液对冬枣维生素 C 含量的影响

维生素 C 是水果最主要的营养成分之一,冬枣 Vc 含量高达 300~500 mg/100 g,号称“活维生素丸”,冬枣贮藏期间 Vc 含量变化是反映冬枣品质的重要指标^[37]。由图 8 可知,在贮藏期间,纳米 TiO₂ 保鲜液处

理组和对照组 Vc 含量都呈下降趋势,但是纳米 TiO₂ 保鲜液组冬枣 Vc 含量一直高于对照组。至贮藏第 25 天时,纳米 TiO₂ 保鲜液组 Vc 含量为 2.10 mg/g,对照组 Vc 含量为 0.97 mg/g,差异显著 ($P<0.05$)。结果表明,纳米 TiO₂ 保鲜液能有效保持枣果 Vc 含量,减缓营养成分流失,对枣果贮存期生理品质的保持有一定效果。羧甲基纤维素钠和纳米 TiO₂ 复配所得保鲜液,兼顾了传统涂膜保鲜优点的同时能有效抑菌,降低枣果货架期霉腐率,延缓枣果营养物质的流失。但是通过根据以往报道,并且关于纳米材料真正作用于食品所可能产生的安全性、时效性以及对环境的影响等还存在较大争议,所以后续纳米材料真正作用于冬枣商业化保鲜时,浓度与作用效果以及后续的安全性问题还需要多次实验进行验证才能切实达到最好抑菌防腐保鲜并且安全的效果。

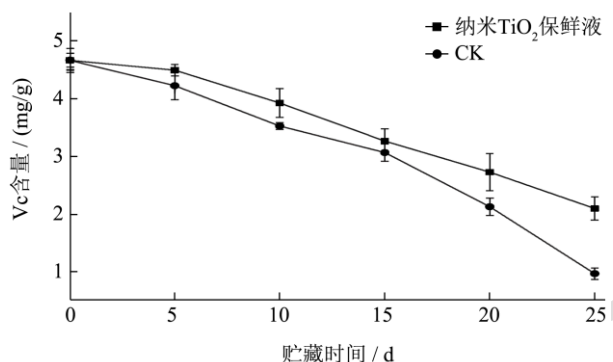


图8 纳米 TiO₂ 保鲜液对冬枣贮藏期间 Vc 含量变化的影响

Fig.8 Effects of nano-TiO₂ preservation solution on changes of Vc content during storage of winter jujube

3 结论

近年来果蔬防腐保鲜一直是人们研究的热点与难点,不同果蔬、不同危害以及多种多样的防治方式也在无形中增加了保鲜工作的难度,所以寻找一种抑菌性强、抑菌谱广、适用性强、操作简单又快捷且对人体安全无害的抑菌方式是当前保鲜工作的重中之重。通过离体实验发现,纳米 TiO₂ 保鲜液对镰孢菌菌丝扩展、菌丝生物量及孢子都存在明显的抑制作用且抑菌性较强;镰孢菌菌膜完整性探究结果表明,纳米 TiO₂ 可以通过破坏致病菌细胞膜渗透性或完整性使内容物析出进而达到抑菌的目的;实验末期自然发病率和贮存期 Vc 含量变化也证明纳米 TiO₂ 保鲜液能降低 53.34% 发病率并且能有效延缓 Vc 流失 1.13 mg/g。综上所述,纳米 TiO₂ 复合保鲜液对冬枣保鲜有很好的效果,是一种具有广阔的发展前景的涂膜保鲜技术,同时这将为纳米材料应用于果蔬保鲜提供新的思路及理论依据。

参考文献

- [1] 马如池.枣的稀有品种-冬枣[J].中国果树,1991,1:51.
- [2] 肖黎斌.秦宝冬枣采后生理及贮藏保鲜技术研究[D].陕西师范大学,2016.
- [3] 胡迎芬.冬枣黄酮的提取分离及抗氧化、抑瘤活性研究[D].青岛:青岛大学,2009.
- [4] 王亚萍,王贵禧,李艳菊.冬枣贮藏保鲜技术研究进展[J].中国农学通报,2006,3:82-87.
- [5] 徐悦,赵国建,朱永宝,等.冬枣生理变化及保鲜机理研究进展[J].特产研究,2020,42(6):90-95.
- [6] Khan M, Li J, Cao W, et al. Advancement in the photocatalytic properties of TiO₂ by vanadium and yttrium codoping: Effect of impurity concentration on the photocatalytic activity [J]. Separation and Purification Technology, 2014, 130: 15-18.
- [7] 龙小艺.一种南丰蜜桔的载银纳米 TiO₂ 抑菌保鲜方法[D].南昌:江西农业大学,2013.
- [8] Razmjou A, Mansouri J, Chen V. The effects of mechanical and chemical modification of TiO₂ nanoparticles on the surface chemistry, structure and fouling performance of PES ultrafiltration membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 378(1-2): 73-84.
- [9] Lee J Y, Park H J, Lee C Y, et al. Extending shelf-life of minimally processed apples with edible coatings and antibrowning agents [J]. LWT - Food Science and Technology, 2003, 36(3): 323-329.
- [10] 胡秀兰.壳聚糖/二氧化钛纳米复合材料制备及其在抑菌纸中的应用[D].杭州:浙江理工大学,2017.
- [11] 陶希芹,王明力,袁志,等.壳聚糖/纳米 TiO₂ 复合涂膜保鲜金秋梨的研究[J].食品与发酵工业,2009,35(5):210-213.
- [12] 连玉晶,王静.果蔬保鲜技术及可食用膜技术在果蔬保鲜中的应用[J].食品研究与开发,2003,2:101-105.
- [13] Nigel, H, Banks. Studies of the banana fruit surface in relation to the effects of TAL Pro-long coating on gaseous exchange [J]. Scientia Horticulturae, 1984, 24(3-4): 279-286.
- [14] 魏天军,魏象廷.中国枣果实病害研究进展[J].西北农业学报,2006,1:88-94.
- [15] 王馨,胡文忠,陈晨,等.纳米材料在果蔬保鲜中的应用[J].食品与发酵工业,2017,43(1):281-286.
- [16] Park Y, Cho H. Improvement in the dispersion stability of iron oxide nanoparticles in highly concentrated brine solution using encapsulation with polymer-polymer crosslinked shells [J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(12): 4743-4750.
- [17] Asadi-Zaki N, Mardani H, Roghani-Mamaqani H, et al.

- Interparticle cycloaddition reactions for morphology transition of coumarin-functionalized stimuli-responsive polymer nanoparticles prepared by surfactant-free dispersion polymerization [J]. *Polymer*, 2021, 228: 123899.
- [18] 郭红莲,王晓枫,路玉蓉,等.菜花贮藏期交链孢霉菌的侵染规律研究[J].*北方园艺*,2012,5:166-168.
- [19] 孟晓.苦瓜抑菌活性成分的提取分离与抑菌作用研究[D].成都:西华大学,2010.
- [20] 王利利.杂种鹅掌楸抗菌活性成分的分离鉴定[D].咸阳:西北农林科技大学,2020.
- [21] 曾荣.凤仙透骨草抑菌活性成分、抑菌机理及对柑橘防腐保鲜效果的研究[D].南昌:南昌大学,2012.
- [22] 张林.防治土传病害的几种主要化学农药对木霉菌厚垣孢子的影响[D].北京:中国农业科学院,2014.
- [23] 赵月.拮抗酵母对番茄果实灰霉病的抑制作用研究[D].天津:天津科技大学,2017.
- [24] Sedmak J J, Grossberg S E. A rapid, sensitive, and versatile assay for protein using coomassie brilliant blue G250 [J]. *Analytical Biochemistry*, 1977, 83(2): 788.
- [25] 许维锐.二氧化钛及其复合纳米材料抗菌性能、作用机制的研究及应用[D].广州:暨南大学,2017.
- [26] Linghao, Jiameng, Yongkang, et al. Titanium dioxide encapsulated carbon-nitride nanosheets derived from MXene and melamine-cyanuric acid composite as a multifunctional electrocatalyst for hydrogen and oxygen evolution reaction and oxygen reduction reaction [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, 248: 366-379.
- [27] 刁润丽.纳米材料的应用研究进展[J].*佛山陶瓷*,2021,31(9): 5-7.
- [28] 豆小文,褚先锋,杨银慧,等.纳米材料在农药残留分离富集和检测中的应用进展[J].*药物分析杂志*,2015,35(9):1509-1519.
- [29] 冒林丽,彭瀚旻,卢鹏辉,等.流速扰动聚焦超声下纳米颗粒聚集的研究[J].*振动测试与诊断*,2021,41(4):784-791,836.
- [30] Chao C A, Xu W A, Wan L B, et al. Selective laser melting of near- α titanium alloy Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V: Parameter optimization, heat treatment and mechanical performance - ScienceDirect [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 54(22): 14.
- [31] 舒梦霜.白莲病害鉴定及白莲腐败病防治技术与抗病基因筛选研究[D].南昌:江西农业大学,2020.
- [32] Dukare A, Paul S. Biological control of Fusarium wilt and growth promotion in pigeon pea (*Cajanus cajan*) by antagonistic rhizobacteria, displaying multiple modes of pathogen inhibition [J]. *Rhizosphere*, 2021, 17: 100278.
- [33] Wang K, Hu X, Yang S, et al. Impact of long-term chemical fertilizer and organic amendment to Fusarium root rot of soybean [J]. *Oil Crop Science*, 2020, 5(1): 48-53.
- [34] 耿海峰,张丽珍,牛伟.冬枣采后病害拮抗菌的筛选和鉴定[J].*食品科学*,2010,31(9):150-155.
- [35] 夏宏,夏青,王春生,等.鲜枣贮藏期致病病原菌种类研究[J].*中国生态农业学报*,2007,3:117-119.
- [36] Khan M A, Khan S A, Waheed U, et al. Morphological and genetic characterization of *Fusarium oxysporum* and its management using weed extracts in cotton [J]. *Journal of King Saud University - Science*, 2021, 33(2): 101299.
- [37] 石鲁珍,张景川,蒋霞,等.光谱测定新疆鲜冬枣 Vc 含量方法的研究[J].*塔里木大学学报*,2015,27(4):93-98.