

田 敏,施自明,蔡艳飞,等. 纳米材料技术在香石竹切花保鲜中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学,2023,51(19):10-17.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.19.002

纳米材料技术在香石竹切花保鲜中的应用研究进展

田 敏¹, 施自明¹, 蔡艳飞¹, 孙 丹², 赵培飞¹

(1. 云南省农业科学院花卉研究所/云南省花卉育种重点实验室/国家观赏园艺工程技术研究中心, 云南昆明 650200;

2. 昆明爱农农业科技有限公司, 云南昆明 650500)

摘要:香石竹(*Dianthus caryophyllus* L.)是世界四大切花之一,瓶插寿命是决定其品质和消费者喜好的重要因素;且香石竹为典型的乙烯敏感型切花,贮运过程中损耗率高。因此,各种化学和物理的采后处理方法被用于控制香石竹切花的采后处理,但这些方法具有生产成本低、保质期短、残留物会造成环境污染等局限性。纳米材料具有较高热稳定性、较强表面活性和催化性能等优点,与纳米材料技术相关的延长保质期策略有可能弥补传统保鲜方法的缺点,在切花保鲜领域具有广阔应用前景。本文从纳米材料的种类、浓度、试验材料的基因型、处理方式等方面综述了纳米材料技术对香石竹切花保鲜效果的影响因素,并分别综述了金属纳米颗粒、碳纳米材料、1-甲基环丙烯/NS 复合物、 β -环糊精纳米海绵-1-MCP 复合物及氢纳米气泡水等纳米材料的保鲜机制,旨在为香石竹采后处理中纳米保鲜产品的开发和应用提供参考。

关键词:纳米材料;香石竹;保鲜;金属纳米;碳纳米;环糊精纳米海绵;氢纳米气泡水

中图分类号:S681.509⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)19-0010-08

香石竹(*Dianthus caryophyllus* L.)又名康乃馨,是石竹科石竹属宿根草本植物,著名四大切花之一,其生产、消费及进出口贸易在世界各国花卉产业中占据着举足轻重的地位。香石竹同时也是最典型的乙烯敏感型切花之一,采后易衰老,贮运过程中损耗率通常在 30%~40%,损耗症状表现为花朵开放受到抑制、过早枯萎、花瓣变色、腐烂等现象,导致瓶插寿命短,极大影响了切花的观赏价值。为此研究者围绕香石竹的保鲜展开了系列研究,化学保鲜如使用 6-苄氨基嘌呤(6-BA)、8-羟基喹啉硫酸盐、季铵盐化合物、二氯异氰尿酸钠和硫代硫酸银(STS)^[1]等保鲜剂;物理保鲜如低温冷藏^[2-6]等保鲜措施被用于延长香石竹鲜切花的保鲜周期,提高香石竹采后寿命和观赏品质。但某些保

鲜剂毒性作用较大,如 8-羟基喹啉(8-HQ)、8-羟基喹啉柠檬酸盐(8-HQC);一些保鲜剂如硫代硫酸银(STS)溶液使用浓度较高,且稳定性较差(需要现配现用),过多使用会产生环境污染等风险;物理保鲜方法也存在诸如产品保鲜周期短、费用高等问题^[7-10]。

近年来,纳米材料作为一种具有较高热稳定性、较强表面活性和催化性能的新型材料,被广泛应用于医疗、纺织、建材、食品和切花保鲜等领域。本研究对纳米材料技术在香石竹保鲜中的应用研究情况和纳米材料的保鲜机制进行了综述,旨在为香石竹采后处理中纳米保鲜产品的开发和应用提供参考。

1 纳米材料技术简介

纳米材料可以定义为处于非结合状态的自然副产品或人工材料,其中 50% 以上或更多的颗粒作为聚合体或凝聚体,一个或多个外部尺寸在 1~100 nm 范围内,由这些物质或以它们作为基本单元构成的材料即为纳米材料^[11]。纳米尺度的材料其性能会发生突变,呈现出既不同于原组成的原子、分子,也不同于宏观物质的独特的物理、化学和光学性质。纳米材料技术涉及在分子或原子水平上理解、制造和操纵材料,研究这些材料的性质

收稿日期:2022-12-06

基金项目:云南省财政厅绿色食品品牌打造科技支撑行动(花卉)专项经费(编号:53000021000000013742);国家大宗蔬菜产业技术体系建设专项(编号:CARS-23-G56);昆明市呈贡区人才工作站(花卉专家工作站)项目;昆明市科学技术局国际(对外)科技合作基地(编号:GHJD-2021024)。

作者简介:田 敏(1985—),女,云南开远人,硕士,副研究员,主要从事花卉开发及相关技术研究。E-mail:tmnfl@yeah.net。

通信作者:赵培飞,硕士,研究员,主要从事花卉开发及推广研究。

E-mail:zhaopeifei@163.com。

及其应用。用于农业、生物科学和食品、保鲜工业的纳米材料包括各种类型,例如碳(石墨烯、纳米金刚石、富勒烯、碳纳米管、碳氮化物^[12]等)、复合材料、金属氧化物、金属、有机和无机材料等^[13-15]。

纳米材料具有较大的表面积可以提高效率,使用较少的原材料即可达到效果;同时还具有体积小、高稳定性、可调节成分、较强的抗菌性^[16-17]等优点,已被开发用于农业等行业,并被证明可以有效提高产量和减少收获后浪费^[18]。在果蔬^[19-20]、切花采后保鲜^[21-22]、植物生长^[23-24]等领域应用广泛。

2 纳米材料技术在香石竹保鲜中的应用

香石竹切花从母体植株采收后,缺乏养分和水分的供应,其内部会发生大分子物质降解、乙烯生成迅速增加等一系列生理生化变化。对乙烯极其敏感的香石竹,容易受到其伤害而使开花进程加快,花蕾在高乙烯浓度下甚至不能正常开放,再加上采后贮运等环节易受到微生物感染,引起萎蔫,严重影响切花观赏品质和瓶插寿命。国内外研究表明,纳米银、铜、碳等材料具有有效抑制乙烯合成和微生物生长发育的能力,因而被用于改善香石竹切花的采后寿命和质量(表1)。

表 1 纳米材料技术在香石竹保鲜中的应用

纳米材料类型	试验材料	处理方式	保鲜效果
纳米银	Master	脉冲处理	延缓花卉衰老,明显提高观赏品质和瓶插寿命 ^[25]
	White Liberty	纳米银+蔗糖瓶插液	提高切花瓶插寿命,改善叶片品质 ^[26]
	spray carnation Prince	瓶插液	促进水分吸收,改善水分平衡值及减缓鲜样质量下降,显著延长瓶插寿命,促进小花的依次开放、延缓小花衰老和改善花瓣颜色 ^[27]
	White Sim	溶液喷洒切花的所有器官	延长瓶插寿命,增加抗氧化酶活性 ^[28]
纳米铜	Tonic Golem	脉冲处理	促进花朵开放和使花色艳丽,延缓花瓣萎蔫 ^[29]
氢纳米气泡水(HNW)	Pink Diamond	瓶插液	延迟花瓣萎蔫和花朵枯萎,延长瓶插寿命 ^[30]
环糊精纳米海绵	Idra di Muraglia	瓶插液	防止花瓣中的色素降解,减少内源性乙烯的产生 ^[31]
碳纳米材料如石墨烯量子点(GQD)、富勒烯(C60)	Damina	瓶插液	减缓衰老,延长瓶插寿命 ^[32]
碳纳米管	White Liberty Grand Slam, Kirsi	瓶插液	保持水分平衡,改善开花并延长瓶插寿命 ^[33]

3 影响纳米材料技术对香石竹保鲜效果的因素

3.1 纳米材料种类

纳米材料种类是影响香石竹保鲜效果的关键因素之一。碳纳米材料(CNMs)及其衍生物如碳纳米管(carbon nanotubes)、石墨烯/氧化石墨烯(NGO)、C60等作为一种新兴的新型材料,以其出色的导电性、机械阻力、导热性、磁性和对病原体的抗菌活性^[34-35]成为最具有前景的材料之一^[36-37]。Zhang等研究了3种碳纳米材料单壁碳纳米管(SWCNT)、石墨烯量子点(GQD)和C60对香石竹Damina抗氧化活性和衰老的影响,结果发现与对照组相比,1 mg/L C60和25 mg/L GQD可将香石竹的瓶插寿命(VL)延长约10%;而SWCNT不能被植物维管组织吸收和运输,较高浓度的SWCNT甚至阻塞维管组织,导致瓶插寿命下降^[32]。

3.2 纳米材料浓度

纳米材料的浓度是影响保鲜效果的又一关键因素。纳米银(AgNPs)在抗菌方面所表现的高活性、广谱性、持久性和低毒性使其成为环境友好型的生物修复剂、净水剂和抗生素,在医疗、建材、纺织、保鲜和水净化^[38-42]等领域得到广泛的应用。刘季平等用3种不同浓度(150、250、300 mg/L)纳米银溶液预处理香石竹马斯特(Master)切花1 h,结果显示,各处理组均可延长瓶插寿命,但不同浓度处理呈现出差异。其中250 mg/L AgNPs溶液处理对切花花径、吸水量、相对鲜质量等生理指标产生了有益影响。瓶插期间Master花径增大,显著延缓了切花茎末端水分导度的降低,改善了水分吸收,使鲜样质量得以维持,切花的瓶插寿命显著延长^[43]。Naing等也研究发现,高质量浓度AgNPs对香石竹Omea切花的保鲜效果并不是最理想的。与对照相

比, 25 mg/L AgNPs 处理将香石竹切花寿命延长 1 倍(12 d), 而高浓度(50 mg/L) AgNPs 处理降低切花的相对鲜质量(relative fresh weight, RFW), 低于 25 mg/L NS 处理组, 衰老症状也提前 2 d 出现(出现在第 11 d)^[44]。Zhang 等研究碳纳米材料对香石竹品种 Damina 采后保鲜的影响, 发现不同浓度碳纳米材料(1、5、25 mg/L 的 GQD 和 C60)的保鲜效果也存在差异。与对照组相比, 25 mg/L GQD 使试验材料瓶插寿命增加 10.64%。然而, 1、5 mg/L GQD 处理使瓶插寿命降低了近 5%。对于 C60 处理组, 1 mg/L C60 减缓衰老的效果最好, 5、25 mg/L C60 同样也降低了试验材料的瓶插寿命^[32]。纳米气泡(nanobubbles)指的是存在于固液界面或者液相环境下, 粒径小于 1~1 000 nm 的气态聚集物^[45-46]。纳米气泡具有较高的比表面积和溶解度, 可以加速气体在液体中的溶解, 并在液体中保持更长时间的稳定性^[47-48]。氢气被认为是一种选择性抗氧化剂, 有研究表明, 富氢水预处理香石竹切花, 可以增强抗氧化酶活性和其他气体信号分子(包括一氧化氮和硫化氢)的参与来延长香石竹切花的瓶插寿命^[49]; 但氢气溶解度低、停留时间短, 应用纳米气泡可以克服这一缺点。Liu 等的研究表明, 在相同溶解氢(DH)浓度时, 氢纳米气泡水(HNW)比不添加纳米气泡的富氢水(hydrogen-rich water, HRW)表现出更高的抗氧化活性^[47,50]。在 Li 等的研究中, 氢纳米气泡水对香石竹 Pink Diamond 切花衰老的影响在一定范围内同样存在剂量依赖。用不同剂量(1%、5%、10% 和 50%)氢纳米气泡水处理切花, 经 5% 氢纳米气泡水的处理组切花寿命为 10 d, 与蒸馏水对照相比, 瓶插寿命延长近 51%, 也大于 10% 富氢水的处理(8 d), 而 50% 的氢纳米气泡水处理不能延缓切花衰老^[30]。与纳米银相比, 纳米铜(CuNPs)具有较高的导电性和导热性, 表现出良好的光学、抗菌、电学和催化性能, 被认为是对微生物的强抗菌剂, 常用于防治植物真菌病害以及保鲜消毒^[51-52]。Rashidiani 等将合成的纳米铜以 10、20 mg/L 的浓度, 通过脉冲方法处理香石竹 Yellow Viana 切花研究纳米铜对切花采后生理的影响, 结果发现, 与对照相比, 20 mg/L 的纳米铜脉冲处理使切花瓶插寿命增加约 30%, 并显著改善其水分关系。10 mg/L 纳米铜处理组与对照组相比瓶插寿命差异不显著^[53]。

3.3 香石竹品种的基因型

研究证实, 纳米材料技术对香石竹切花的保鲜

效果不仅与纳米材料类型、质量浓度有关, 而且同一种纳米材料在不同香石竹品种间的保鲜效果也存在差异。Masoumeh 等研究发现, 在瓶插液中加入碳纳米管能够有效促进香石竹细胞膨胀、开花, 延长香石竹切花的观赏期, 但相同处理下不同栽培品种的瓶插寿命存在差异。在瓶插液中加入 10 mg/L 单壁碳纳米管(SWCNT), 可明显延长品种 White liberty 的瓶插寿命, 而品种 Grand slam 和品种 Kirsi 的瓶插寿命无明显增加。多壁碳纳米管(MWCNTs)延长瓶插寿命的最佳浓度在 3 个品种中也不尽相同, 分别为 Grand slam 20 mg/L、White liberty 40 mg/L 和 Kirsi 80 mg/L^[33]。Masoumeh 等还研究发现, 2 种纳米管处理品种 Grand slam 和 Kirsi 切花鲜质量的最佳浓度与瓶插寿命的最佳浓度相同, 而用不同浓度 SWCNTs 保持溶液处理品种 White liberty, 对其鲜质量的效果相似^[33]。乙烯是导致香石竹切花质量恶化或衰老的主要因素^[8]。Naing 认为品种间保鲜效果的差异可能与不同基因型香石竹乙烯生产模式的差异有关。在 3 个香石竹品种(Koba Kabana、Purple Sky、Lufa)的瓶插液中添加 25 mg/L AgNPs, 品种 Koba Kabana 处理组的平均瓶插寿命最长(比对照延长 7 d), 相对鲜质量(RFW)在整个试验期间显著高于对照组, 维持了较高的 RFW 和较低的乙烯产量, 显著提高康乃馨切花的寿命。试验数据显示, 在品种 Koba Kabana 中, 从开花初期到衰老, 雌蕊的乙烯产量始终高于花瓣; 而品种 Lufa 和 Purple sky 的雌蕊产生的乙烯通过诱导花瓣中乙烯生物合成基因的表达, 从而对花瓣产生了强烈的影响, 并导致了比雌蕊更高水平的乙烯产生, 影响了瓶插寿命^[54]。

3.4 纳米材料处理香石竹的方式

用纳米材料对香石竹切花采取不同方式的处理, 也会影响保鲜效果。刘季平等探讨了 AgNPs 预处理、瓶插液及预处理+瓶插液 3 种方式对香石竹安静(Quiet)、马斯特(Master)和太平洋(Pacific)切花采后寿命的影响。结果显示, 预处理+瓶插液处理方式最为有效, 可显著延长这 3 个香石竹切花品种的瓶插寿命, 其中 50~70 mg/L 预处理+5~10 mg/L 瓶插液的处理效果最佳, 使 Master 切花瓶插寿命比对照延长 14 d^[55]。刘季平等认为产生这个结果的原因一方面是 AgNPs 的存在, 持续抑制瓶插液中和花茎末端细菌的生长, 减轻茎木质部导管的堵塞, 改善水分吸收; 另一方面与 AgNPs 拮抗乙

烯的作用有关,2 个作用叠加延长了香石竹切花寿命。在 Masoumeh 等的研究中,不同的处理方式会影响碳纳米管的保鲜效果,研究者采用叶面喷施和瓶插 2 种方式处理 3 个品种香石竹(White Liberty、Grand Slam、Kirsi)的切花,发现叶面喷施的方式对 3 个品种切花吸收水分、开花和保持品质影响较小,不能延长试验材料的瓶插寿命,推测可能是叶片太小限制了碳纳米管的叶面摄入^[33]。

3.5 其他影响因素

在实际应用中还应考虑纳米材料自身结构以及与其他物质联合使用时对保鲜效果的影响。

纳米海绵(NS)是一类新型的基于超交联聚合物的胶体结构,由具有几纳米宽空腔的亚微观粒子制成,其结构包含极性可调的纳米级空腔,可以捕获、运输和选择性释放大量亲水和疏水物质^[56]。与其他纳米粒子相比,纳米海绵不溶于水和有机溶剂,多孔、无毒且在 300 ℃ 的高温下仍然稳定^[57]。环糊精(CD)是一类环状低聚糖大分子的总称,常见的有 α 、 β 、 γ -CD 共 3 种类型。CD 分子与具有羰基的交联剂反应,形成多孔网状(海绵状)结构的聚合物即为环糊精基纳米海绵,此类聚合物可以分散在水中形成稳定的胶体溶液。Seglie 等研究了 2 种环糊精纳米海绵(α -CD-NSs、 β -CD-NSs)与 1-甲基环丙烯(1-MCP)形成的复合物,对延长香石竹 Idra di Muraglia 切花采后寿命的影响,发现在相同处理条件下, α -CD-NS 复合物的应用在统计学上没有提高切花的花瓶寿命;而 β -CD-NS 复合物在最低浓度(0.25 μ L/L)时即可有效防止衰老,减少乙烯产生(11 d 后几乎为零),更长时间保持原有花瓣颜色,比商业 1-MCP 气体施用方法更好地延长了切花的寿命^[58]。Seglie 等还研究发现,不同交联度的 β -环糊精纳米海绵(β -CD-NSs 1:2、 β -CD-NSs 1:4 和 β -CD-NSs 1:8)会对掺入的 1-甲基环丙烯(1-MCP)活性产生影响,交联度 1:8 的 β -CD-NSs 与 1-MCP 所形成的复合物,在低悬浮浓度(0.25 μ L/L)时即可达到最佳保鲜效果,使香石竹 Idra di Muraglia 切花的观赏品质保持 14 d(对照切花在 3 d 后失去美感,在 4 d 内出现完全衰老),减少内源乙烯产量,并更好地保持原始花瓣颜色^[31]。

碳纳米管的晶体结构非常接近石墨,研究表明,其结构对其性能有直接影响,单壁碳纳米管(SWCNTs)由单层石墨烯组成,直径范围为 0.4 ~

2 nm,而多壁碳纳米管(MWCNTs)由多层石墨烯片组成,外径和内径分别为 2 ~ 100 nm 和 1 ~ 3 nm,单壁碳纳米管和多壁碳纳米管的长度分别为 0.2 μ m 和几微米^[59]。不同的碳纳米管具有不同的性质和应用潜力^[59-60]。Masoumeh 等的研究表明,在香石竹的采后保鲜应用中,碳纳米管溶液有助于延长香石竹的瓶插寿命,但碳纳米管粒径会影响保鲜效果。在该研究中 2 种碳纳米管作为瓶插液的最佳浓度有差异,与 SWCNTs 相比,MWCNTs 的最佳浓度更高(两者分别为 10 ~ 40 mg/L 和 40 ~ 80 mg/L)^[33]。这种差异可能与碳纳米管的粒径有关,SWCNTs 具有更小的直径和更短的长度,易位能力强。

吴雨衡等也研究发现,纳米铜(CuNPs)与蔗糖的组合对香石竹切花保鲜效果更好。该组研究者用 CuNPs(2、5、10 mg/L)与蔗糖(3 g/L)组合溶液瓶插处理香石竹切花小桃红(Tonic Golem),2 mg/L CuNPs + 3 g/L 蔗糖的组合可最有效促进花朵开放和增进花色,提升吸水量和保持切花水分平衡,明显延缓花瓣萎蔫(瓶插 12 d 才出现)和改善观赏品质,具有良好的保鲜作用。与对照(以去离子水作为瓶插液)相比,2、5、10 mg/L CuNPs 单独处理对小桃红切花没有明显的保鲜效果,对照及单用 CuNPs 处理的小桃红切花瓶插 8 d 开始出现花朵萎蔫、花色暗淡等品质劣变现象^[29]。

4 纳米材料的保鲜机制

4.1 金属纳米颗粒的保鲜机制

研究证实,纳米银延缓香石竹切花衰老的机制与其抗菌和抑制乙烯合成能力有关^[44,61-63]。用纳米银处理香石竹切花后,纳米银粒子缺少 2 个电子的外壳对微生物有吸附作用,当微生物被银离子吸附后^[64],银离子一方面通过与微生物细胞质成分和核酸相互作用,破坏负责呼吸的酶并干扰膜通透性^[65-66],抑制瓶插溶液和花茎末端微生物的生长,而且还进入植物维管组织,抑制木质部细菌生长,减轻切花细菌性茎堵塞,改善切花的水分吸收和运输;另一方面银离子从维管组织转移到花器官,抑制香石竹花瓣和雌蕊中乙烯合成关键酶基因(ACS、ACO)、花瓣衰老相关基因(CPI),上调花瓣衰老抑制基因 CPI 的表达,同时香石竹乙烯信号转导通路上的正调控基因 EIL1/2、ERS2 和 EBF1 的表达也受到抑制,减少花瓣和雌蕊中乙烯的产生,从而显著延长切花瓶插寿命^[44,63]。

纳米铜对香石竹的保鲜机制研究同样也集中在抗菌和对乙烯的抑制方面,纳米铜的抗菌机制尚无统一论,可能的机制是通过:(1)与 DNA 和蛋白质等生物大分子的相互作用破坏生化过程^[67]; (2)破坏质膜完整性^[68]; (3)活性氧(ROS)的产生对细菌细胞造成氧化损伤^[69]; (4)导致细菌细胞死亡的一些凋亡基因表达的变化等造成微生物死亡,减少切花茎端细菌种群的生长,提高瓶插液的吸收和相对鲜质量(RFW),增加香石竹切花瓶插寿命^[70]。目前的研究还发现,纳米铜处理后香石竹花瓣中过氧化物酶(POD)活性增强,降低了花瓣中过氧化氢(H_2O_2)的水平,从而抑制自催化乙烯的产生,延长香石竹瓶插寿命^[53]。

4.2 碳纳米材料的保鲜机制

C60 和石墨烯量子点(GQD)对香石竹的保鲜机制在于:通过 C60 和 GQD 对香石竹中羟基自由基($-OH$)生成的部分抑制作用,以及 GQD 较高的 DPPH 自由基清除能力,C60 和 GQD 可直接影响香石竹细胞内活性氧代谢,导致细胞氧化还原状态发生变化,抗氧化系统活性增加,膜脂过氧化减少,从而有效延缓植物组织的衰老和脱落^[32]。

在香石竹瓶插液中的碳纳米管增强了酶(APX、CAT、POD 和 SOD)和非酶(类胡萝卜素、多酚和类黄酮)抗氧化剂活性,减轻了叶绿素降解、电解质泄漏和脂质过氧化,其保鲜机制在于通过改善水分关系和刺激抗氧化防御来延长瓶插寿命^[33]。

4.3 1-甲基环丙烯/NS 复合物、 β -环糊精纳米海绵-1-MCP 复合物的保鲜机制

β -环糊精纳米海绵(β -CD-NS)作为 1-甲基环丙烯(1-MCP)的载体,本身无保鲜香石竹切花的作用。气态性质的 1-MCP 是一种非常有效的乙烯负反应预防剂^[71],而且没有任何毒性;但通常只能维持相当短的时间,需要连续或重复处理;以及在低温下($0 \sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)活性降低^[72-77],增加了应用的难度。与市售产品相比, β -CD-NS 中包含的 1-MCP 在切花保鲜中表现出优异的抗乙烯性能,其机制在于: β -CD-NS 大分子交联程度显著影响 1-MCP 的释放,高交联的 β -CD-NS(如 1:8)的网状化程度较高,这种交联聚合物粉末内有大量自由空腔,1-MCP 可被包裹其中,并具有完全不溶性,起到缓释其中的活性成分 1-MCP 的作用,可以在较长时间内提供活性成分的连续供应,防止花瓣中的色素降解,减少内源性乙烯的产生,

提高香石竹切花寿命和观赏品质^[31]。高交联度的 β -CD-NS 复合物中,聚合物总量的增加使 1-MCP 扩散的路径长度增加,使复合物在低浓度下即可具有高活性,与气态商业产品相比所需的总剂量减少、处理切花的频率降低^[58,78]。Ludovica Seglie 等推测纳米海绵除了能够通过缓慢释放乙烯拮抗剂,减少衰老过程,同时还通过吸附乙烯和捕获其他目标有机化合物来减少乙烯生成,延长切花瓶插寿命^[79-82]。

4.4 氢纳米气泡水的保鲜机制

氢气纳米气泡水(HNW)是指纳米级粒径的氢气聚集物溶解于水中形成的“溶液”^[83]。由于纳米气泡具有独特的高内压和带负电荷表面的特性,这可以提高气体在液体中的溶解度和停留时间^[84]。与不含纳米气泡的氢气水相比,HNW 具有更强的抗氧化活性,对羟基自由基($-OH$)的去除能力更强^[47,85-86]。

切花衰老是一个复杂的过程,主要与水分的流失、离子的泄漏、活性氧的产生以及蛋白质和核酸的合成和降解有关^[87],ROS 参与膜降解并导致细胞死亡。在切花采后期间,通常观察到 ROS 过量产生,而 ROS 的清除可能由于抗氧化酶活性的增加而延缓切花衰老的发生^[88-89]。研究发现,HNW 延长香石竹瓶插寿命的机制如下:HNW 增加了氢分子(H_2)的可用性, H_2 渗透到细胞中,抑制了瓶插期间香石竹核酸酶(包括 DNase 和 RNase)和蛋白酶活性的增加趋势,通过降低活性氧的积累和衰老相关酶的初始活性,减少相对鲜质量下降和水分损失(维持细胞膨胀)、延缓电解液泄漏的增加、选择性去除具有细胞毒性的 ROS,推迟 ROS 的积累和花瓣细胞的死亡,延缓了香石竹切花的衰老^[30]。

5 结语与展望

纳米材料技术是一项相对年轻但发展迅速的技术,在世界各地的食品、农业、医药、各种工业和人类活动等广泛领域都有应用。纳米结构和纳米颗粒由于其高比表面积、小尺寸和特殊的性质(例如高催化性质)而改善了它们所使用的系统的质量。纳米材料应用于香石竹切花,其保鲜效果受材料种类、使用浓度、香石竹基因型和处理方式等因素的影响,在实际应用中应加以考虑。此外,目前关于纳米材料技术在香石竹保鲜领域的应用多集中于纳米银、碳纳米管等少数材料的保鲜研究,其

他材料的应用研究尚不够充分。同时,金属和金属氧化物纳米粒子易渗透到细胞中,未来的研究应侧重于减少纳米复合材料和纳米粒子可能存在的危害,采用更环保的合成方法,由天然产品合成的绿色纳米颗粒来解决这一限制,助力于香石竹切花采后保鲜,减少采后损失,提高产品质量,同时提高产品的竞争力。

参考文献:

- [1] 蒋亚莲,陆琳,瞿素萍,等. 不同浓度 6-BA 和 B₉ 对多头香石竹切花保鲜效果的影响[J]. 山西农业科学,2020,48(4):644-648.
- [2] le Masson B, Nowak J. Cut-flower life of dry transported carnations as influenced by different silver form pre-treatments[J]. Scientia Horticulturae, 1981, 15(4):383-390.
- [3] van Doorn W G. Water relations of cut flowers[M]//Horticultural reviews. Oxford, UK: John Wiley & Sons, Inc., 2010:1-85.
- [4] Petridou M, Voyiatzi C, Voyiatzis D, Aspirin R, methanol and some antibacterial compounds prolong the vase life of cut carnations[J]. Advances in Horticultural Science, 1999, 13(4):161-164.
- [5] 张英慧,崔志新,钟希琼,等. 溴代十六烷基吡啶对香石竹切花的保鲜效应[J]. 植物生理学通讯,2006,42(4):661-664.
- [6] 刘季平,何生根,吕培涛,等. 二氯异氰尿酸钠处理对香石竹切花的保鲜效应[J]. 园艺学报,2009,36(1):121-126.
- [7] Newman J P, Dodge L L, Reid M S. Evaluation of ethylene inhibitors for postharvest treatment of *Gypsophila paniculata* L. [J]. HortTechnology, 1998, 8(1):58-63.
- [8] 高俊平. 观赏植物采后生理与技术[M]. 北京:中国农业大学出版社,2002.
- [9] Ichimura K, Yoshioka S, Yumoto-Shimizu H. Effects of silver thiosulfate complex (STS), sucrose and combined pulse treatments on the vase life of cut snapdragon flowers[J]. Environment Control in Biology, 2008, 46(3):155-162.
- [10] Cameron A C, Reid M S. 1-MCP blocks ethylene-induced petal abscission of *Pelargonium peltatum* but the effect is transient[J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 22(2):169-177.
- [11] Garde-Cerdán T, Souza-da Costa B, Rubio-Bretón P, et al. Nanotechnology: recent advances in viticulture and enology[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(15):6156-6166.
- [12] Zhang B T, Zheng X X, Li H F, et al. Application of carbon-based nanomaterials in sample preparation: a review[J]. Analytica Chimica Acta, 2013, 784:1-17.
- [13] Raskar S, Laware S. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion[J]. Int J Curr Microbiol App Sci, 2014, 3:467-473.
- [14] Abou Hammad A B, Abd El-Aziz M E, Hasanin M S, et al. A novel electromagnetic biodegradable nanocomposite based on cellulose, polyaniline, and cobalt ferrite nanoparticles[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 216:54-62.
- [15] Salama D M, Abd El-Aziz M E, Rizk F A, et al. Applications of nanotechnology on vegetable crops[J]. Chemosphere, 2021, 266:129026.
- [16] Usman M, Farooq M, Wakeel A, et al. Nanotechnology in agriculture: current status, challenges and future opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2020, 721:137778.
- [17] Duhan S, Bhan C, Chawla S, et al. Role of nanotechnology in post harvest management of horticultural crops[J]. International Journal of Processing and Post Harvest Technology, 2016, 7(1):134-140.
- [18] Mousavi S, Rezaei M. Nanotechnology in agriculture and food production[J]. Chain Reaction, 2011, 100:17-19.
- [19] Sarmast M K, Salehi H. Silver nanoparticles: an influential element in plant nanobiotechnology[J]. Molecular Biotechnology, 2016, 58(7):441-449.
- [20] 王红娟,杨宏顺,陈复生,等. 纳米技术在采后果蔬保鲜中的研究进展[J]. 食品科技, 2011, 36(6):71-75.
- [21] Solgi M, Kafi M, Taghavi T S, et al. Essential oils and silver nanoparticles (SNP) as novel agents to extend vase-life of *Gerbera* (*Gerbera jamesonii* cv. 'Dune') flowers[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 53(3):155-158.
- [22] Lü P T, Cao J P, He S G, et al. Nano-silver pulse treatments improve water relations of cut rose cv. Movie Star flowers[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 57(3):196-202.
- [23] Nasrollahzadeh M, Sajjadi M, Dadashi J, et al. Pd-based nanoparticles: plant-assisted biosynthesis, characterization, mechanism, stability, catalytic and antimicrobial activities[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2020, 276:102-103.
- [24] Kaur R, Chandra J, Keshavkant S. Nanotechnology: an efficient approach for rejuvenation of aged seeds[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2021, 27(2):399-415.
- [25] Liu J P, Zhang Z Q, Li H M, et al. Alleviation of effects of exogenous ethylene on cut 'Master' carnation flowers with nano-silver and silver thiosulfate[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 143:86-91.
- [26] Basir Y, Zarei H, Mashayekhi K. Effect of nano-silver treatments on vase life of cut flowers of carnation (*Dianthus caryophyllus* cv. 'White Liberty')[J]. Journal of Advanced Laboratory Research in Biology, 2011, 19:40-42.
- [27] Lin X H, Li H M, Lin S Q, et al. Improving the postharvest performance of cut spray 'Prince' carnations by vase treatments with nano-silver and sucrose[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2019, 94(4):513-521.
- [28] Roshani T, Ahmadi N, Karimzadeh G. Effects of silver nanoparticles and 1-MCP on postharvest characteristic and activities of enzymes involved in cut carnation flower senescence[J]. Advances in Applied Science Research, 2016, 2:1-10.
- [29] 吴雨衡,黄祥富,何生根,等. 不同纳米铜处理对香石竹切花 '小桃红' 的保鲜效果[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2022, 35(1):7-12.
- [30] Li L N, Yin Q L, Zhang T, et al. Hydrogen nanobubble water delays petal senescence and prolongs the vase life of cut carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) flowers[J]. Plants, 2021, 10(8):

- 1662.
- [31] Seglie L, Martina K, Devecchi M, et al. β - Cyclodextrin - based nanosponges as carriers for 1 - MCP in extending the postharvest longevity of carnation cut flowers; an evaluation of different degrees of cross - linking [J]. *Plant Growth Regulation*, 2011, 65 (3) : 505 - 511.
- [32] Zhang D, Chen X, Sheng J, et al. The effect of carbon nanomaterials on senescence of cut flowers in carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) [J]. *Horticultural Science and Technology*, 2021, 39 (3) : 356 - 367.
- [33] Masoumeh A M, Sadegh M F, Abdolhossein R N, et al. Carbon nanotubes in the holding solution stimulate flower opening and prolong vase life in carnation [J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2022, 9 (1) : 261 - 264.
- [34] Poonia M, Manjuladevi V, Gupta R K. Ultrathin films of functionalised single - walled carbon nanotubes; a potential bio - sensing platform [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47 (8) : 1204 - 1213.
- [35] Lin L, Peng H L, Liu Z F. Synthesis challenges for graphene industry [J]. *Nature Materials*, 2019, 18 (6) : 520 - 524.
- [36] Dresselhaus M S, Dresselhaus G, Jorio A. Unusual properties and structure of carbon nanotubes [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2004, 34 : 247 - 278.
- [37] Gao C D, Feng P, Peng S P, et al. Carbon nanotube, graphene and boron nitride nanotube reinforced bioactive ceramics for bone repair [J]. *Acta Biomaterialia*, 2017, 61 : 1 - 20.
- [38] Lee S H, Jun B H. Silver nanoparticles; synthesis and application for nanomedicine [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20 (4) : 865.
- [39] Markets M. Metal Nanoparticles Market by metal (Platinum, Gold, Silver, Iron, Titanium, Copper, Nickel), End - use industry (Pharmaceutical & healthcare, Electrical & electronics, Catalyst, Personal care & cosmetics), and Region - Global Forecast to 2022 [J]. *Mark Res Rep*, 2018, 14 : 448 - 492.
- [40] Ahmeda A, Zangeneh A, Zangeneh M M. Characterization and anti - acute T cell leukemia properties of silver nanoparticles synthesized by a green approach for bioremediation applications; introducing a new chemotherapeutic drug for clinical trial studies [J]. *Applied Organometallic Chemistry*, 2020, 34 (3) : 53 - 74.
- [41] Shepard Z J, Lux E M, Oyanedel - Craver V A. Performance of silver nanoparticle - impregnated ovoid ceramic water filters [J]. *Environmental Science; Nano*, 2020, 7 (6) : 1772 - 1780.
- [42] Keshari A K, Srivastava R, Yadav S. Synergistic activity of green silver nanoparticles with antibiotics [J]. *Nanomed Res J*, 2020, 5 (1) : 44 - 54.
- [43] 刘季平, 张昭其, 李红梅, 等. 纳米银处理减轻香石竹切花细菌性茎堵塞的研究 [J]. *园艺学报*, 2014, 41 (1) : 131 - 138.
- [44] Naing A H, Win N M, Han J S, et al. Role of nano - silver and the bacterial strain *Enterobacter cloacae* in increasing vase life of cut carnation 'omea' [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8 : 1590.
- [45] Wang S, Liu Y S, Lyu T, et al. Aquatic macrophytes in morphological and physiological responses to the nanobubble technology application for water restoration [J]. *ACS ES&T Water*, 2021, 1 (2) : 376 - 387.
- [46] Svetovoy V B. Spontaneous chemical reactions between hydrogen and oxygen in nanobubbles [J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2021, 52 : 101423.
- [47] Liu S, Oshita S, Thuyet D Q, et al. Antioxidant activity of hydrogen nanobubbles in water with different reactive oxygen species both *in vivo* and *in vitro* [J]. *Langmuir*, 2018, 34 (39) : 11878 - 11885.
- [48] Lyu T, Wu S B, Mortimer R J G, et al. Nanobubble technology in environmental engineering: revolutionization potential and challenges [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53 (13) : 7175 - 7176.
- [49] 蔡 敏, 杜红梅. 富氢水预处理对香石竹切花瓶插寿命的影响 [J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2015, 33 (6) : 41 - 45.
- [50] Kato S, Matsuoka D, Miwa N. Antioxidant activities of nano - bubble hydrogen - dissolved water assessed by ESR and 2, 2' - bipyridyl methods [J]. *Materials Science and Engineering; C*, 2015, 53 : 7 - 10.
- [51] Mattea F, Vedelago J, Malano F, et al. Silver nanoparticles in X - ray biomedical applications [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2017, 130 : 442 - 450.
- [52] 王玉玉, 黎 蓝, 赖凌峰, 等. 纳米铜加蔗糖处理对非洲菊切花的保鲜作用 [J]. *中国农学通报*, 2021, 37 (4) : 62 - 67.
- [53] Rashidiani N, Nazari F, Javadi T, et al. Copper nanoparticles (CuNPs) increase the vase life of cut carnation and chrysanthemum flowers; antimicrobial ability and morphophysiological improvements [J]. *Ornamental Horticulture*, 2020, 26 (2) : 225 - 235.
- [54] Naing A H, Soe M T, Kyu S Y, et al. Nano - silver controls transcriptional regulation of ethylene - and senescence - associated genes during senescence in cut carnations [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 287 : 110280.
- [55] 刘季平, 谢立贤, 李红梅, 等. 不同纳米银处理方式对香石竹切花瓶插寿命的影响 [J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2012, 25 (4) : 1 - 4.
- [56] Trotta F, Dianzani C, Caldera F, et al. The application of nanosponges to cancer drug delivery [J]. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 2014, 11 (6) : 931 - 941.
- [57] dos Passos Menezes P, de Araújo Andrade T, Frank L A, et al. Advances of nanosystems containing cyclodextrins and their applications in pharmaceuticals [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2019, 559 : 312 - 328.
- [58] Seglie L, Martina K, Devecchi M, et al. The effects of 1 - MCP in cyclodextrin - based nanosponges to improve the vase life of *Dianthus caryophyllus* cut flowers [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 59 (2) : 200 - 205.
- [59] Patel D K, Kim H B, Dutta S D, et al. Carbon nanotubes - based nanomaterials and their agricultural and biotechnological applications [J]. *Materials*, 2020, 13 (7) : 1679.
- [60] Verma S K, Das A K, Gantait S, et al. Applications of carbon nanomaterials in the plant system; a perspective view on the pros and cons [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 667 : 485 -

- 499.
- [61] Hassan F A S, Ali E F, El – Deeb B. Improvement of postharvest quality of cut rose cv. ‘First Red’ by biologically synthesized silver nanoparticles[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 179: 340 – 348.
- [62] Li H B, Li H M, Liu J P, et al. Nano – silver treatments reduced bacterial colonization and biofilm formation at the stem – ends of cut gladiolus ‘Eerde’ spikes[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 123: 102 – 111.
- [63] Park D Y, Naing A H, Ai T N, et al. Synergistic effect of nano – silver with sucrose on extending vase life of the carnation cv. edun [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1601.
- [64] Lok C N, Ho C M, Chen R, et al. Silver nanoparticles: partial oxidation and antibacterial activities[J]. *JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 2007, 12(4): 527 – 534.
- [65] Park S H, Oh S G, Mun J Y, et al. Effects of silver nanoparticles on the fluidity of bilayer in phospholipid liposome [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2005, 44(2/3): 117 – 122.
- [66] Russell A, Hugo W. Antimicrobial activity and action of silver[J]. *Prog MedChem*, 1994, 31: 351 – 371.
- [67] Raffi M, Mehrwan S, Bhatti T M, et al. Investigations into the antibacterial behavior of copper nanoparticles against *Escherichia coli* [J]. *Annals of Microbiology*, 2010, 60(1): 75 – 80.
- [68] Avery S V, Howlett N G, Radice S. Copper toxicity towards *Saccharomyces cerevisiae*; dependence on plasma membrane fatty acid composition[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, 62(11): 3960 – 3966.
- [69] Thomas Webster T J. Bactericidal effect of iron oxide nanoparticles on *Staphylococcus aureus* [J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2010: 277.
- [70] Sun T T, Yan Y W, Zhao Y, et al. Copper oxide nanoparticles induce autophagic cell death in A549 cells[J]. *PLoS One*, 2012, 7(8): e43442.
- [71] Sisler E C, Serek M. Inhibitors of ethylene responses in plants at the receptor level: recent developments [J]. *Physiologia Plantarum*, 1997, 100(3): 577 – 582.
- [72] Trotta F, Cavalli R, Martina K, et al. Cyclodextrin nanosponges as effective gas carriers [J]. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 2011, 71(1): 189 – 194.
- [73] Devecchi M, Trotta F, Seglie L, et al. Effects of anti – ethylene compounds included in nanosponges in improving the postharvest longevity of carnation (*Dianthus caryophyllus*) and buttercup (*Ranunculus asiaticus*) cut flowers[J]. *Acta Horticulturae*, 2009(847): 237 – 244.
- [74] Apelbaum A, Sisler E C, Feng X Q, et al. Assessment of the potency of 1 – substituted cyclopropenes to counteract ethylene – induced processes in plants [J]. *Plant Growth Regulation*, 2008, 55(2): 101 – 113.
- [75] Blankenship S M, Dole J M. 1 – methylcyclopropene: a review[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 28(1): 1 – 25.
- [76] Kebenei Z, Sisler E C, Winkelmann T, et al. Efficacy of new inhibitors of ethylene perception in improvement of display life of kalanchoë (*Kalanchoë blossfeldiana* Poelln.) flowers [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 30(2): 169 – 176.
- [77] Feng X Q, Apelbaum A, Sisler E C, et al. Control of ethylene activity in various plant systems by structural analogues of 1 – methylcyclopropene[J]. *Plant Growth Regulation*, 2004, 42(1): 29 – 38.
- [78] Serek M, Sisler E C, Frello S, et al. Postharvest technologies for extending the shelf life of ornamental crops [J]. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation*, 2006, 1(1): 69.
- [79] Li D, Ma M. Nanoporous polymers: new nanosponge absorbent media [J]. *Filtration & Separation*, 1999, 36(10): 26 – 28.
- [80] Elad Y. Physiological factors involved in susceptibility of plants to pathogens and possibilities for disease control – the *Botrytis cinerea* example [M]. London: Modern Fungicides and Antifungal Compounds, 1995: 217 – 233.
- [81] Elad Y, Yunis H, Volpin H. Effect of nutrition on susceptibility of cucumber, eggplant, and pepper crops to *Botrytis cinerea* [J]. *Canadian Journal of Botany*, 1993, 71(4): 602 – 608.
- [82] Elad Y. Responses of plants to infection by *Botrytis cinerea* and novel means involved in reducing their susceptibility to infection [J]. *Biological Reviews*, 2007, 72(3): 381 – 422.
- [83] 孙 乐. 体相纳米气泡的性质与应用研究[M]. 北京: 北京化工大学, 2021: 88 – 97.
- [84] Temesgen T, Bui T T, Han M, et al. Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water – treatment techniques: a review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017, 246: 40 – 51.
- [85] Azevedo A, Etchepare R, Calgaroto S, et al. Aqueous dispersions of nanobubbles: generation, properties and features [J]. *Minerals Engineering*, 2016, 94: 29 – 37.
- [86] Fan Y J, Lei Z F, Guo Z T, et al. Enhanced solubilization of solid organics and methane production by anaerobic digestion of swine manure under nano – bubble water addition[J]. *Bioresour Technol*, 2020, 299: 122 – 125.
- [86] Fan Y J, Lei Z F, Guo Z T, et al. Enhanced solubilization of solid organics and methane production by anaerobic digestion of swine manure under nano – bubble water addition [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 299: 122 – 125.
- [87] van Doorn W G, Woltering E J. Physiology and molecular biology of petal senescence [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2008, 59(3): 453 – 480.
- [88] Naing A H, Lee K, Arun M, et al. Characterization of the role of sodium nitroprusside (SNP) involved in long vase life of different carnation cultivars[J]. *BMC Plant Biology*, 2017, 17(1): 1 – 12.
- [89] Rabiza – Świder J, Skutnik E, Jędrzejuk A, et al. Nanosilver and sucrose delay the senescence of cut snapdragon flowers [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 165: 111 – 125.