

NO供体缓释系统的开发及其在食品保鲜中的应用研究进展

胡峥¹, 毕顺鑫¹, 韩芳蕊¹, 陈蝶¹, 马明珠², 陈燕^{1*}, 罗红宇^{1*}

(1. 浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江舟山 316022) (2. 浙江省海洋开发研究院, 浙江舟山 316021)

摘要: 一氧化氮 (Nitric Oxide, NO) 因其突出的抗菌、抗生物膜和抗病虫害特性, 在食品领域展现出优异的保鲜功能。为了进一步提高其稳定性、延长使用寿命、降低毒副作用, 大量研究者正致力于开发稳定性更好、效率更高和安全性更强的 NO 供体缓释载体和系统。不同的缓释方式实现了 NO 的释放速率可在 0.1~10 $\mu\text{mol/h}$ 之间变化, 且释放时间可从数小时延长至数十天, 这种增强的释放效应使得 NO 供体缓释系统在生物医学领域得到了广泛应用。该文综述了 NO 的产生和信号途径, 并分析和总结了不同类型 NO 供体缓释体系的设计与开发及其在肉类、水产品、水果和蔬菜等食品保鲜领域中的实际效果和应用潜力。NO 供体缓释体系的开发, 可为增强 NO 的生物利用度以及为提高食品的品质和延长其货架期提供新的思路与解决方案, 并在食品领域展现出巨大的应用前景。

关键词: 一氧化氮 (NO); 供体缓释系统; 食品保鲜

文章编号: 1673-9078(2025)12-353-368

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1175

Research Progress on the Development of NO Donor Sustained-release Systems and Their Applications in Food Preservation

HU Zheng¹, BI Shunxin¹, HAN Fangrui¹, CHEN Die¹, MA Mingzhu², CHEN Yan^{1*}, LUO Hongyu^{1*}

(1.College of Food Science and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

(2.Zhejiang Marine Development Research Institute, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Nitric Oxide (NO) has demonstrated excellent preservation function in the food field due to its outstanding anti-microbial, anti-biofilm and anti-pest properties. In order to further improve its stability, extend its service life, and reduce its toxic side effects, many researchers are dedicated to the development of NO donor sustained-release carriers and systems that are more stable, efficient, and safe. Different sustained-release strategies have facilitated the modulation of NO release rates within a range of 0.1 to 10 $\mu\text{mol/h}$, while extending the release duration from several hours to several tens of days. This enhanced release profile has enabled the widespread application of NO donor sustained-release systems in the biomedical field. In this paper, the production and signaling pathways of NO are reviewed. The design and development of various types of NO donor sustained-release systems,

引文格式:

胡峥,毕顺鑫,韩芳蕊,等.NO供体缓释系统的开发及其在食品保鲜中的应用研究进展[J].现代食品科技,2025,41(12): 353-368.

HU Zheng, BI Shunxin, HAN Fangrui, et al. Research progress on the development of NO donor sustained-release systems and their applications in food preservation [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 353-368.

收稿日期: 2024-08-10; 修回日期: 2024-10-24; 接受日期: 2024-10-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (82204268); 浙江海洋大学人才引进科研基金 (JX6311132323); 国家级大学生创新创业训练计划 (202410340023)

作者简介: 胡峥 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与贮藏工程, E-mail: 3338374427@qq.com

通讯作者: 陈燕 (1986-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品贮藏与保鲜, E-mail: 418918204@qq.com; 共同通讯作者: 罗红宇 (1968-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 海洋生物活性物质和水产品精深加工, E-mail: lisa8919@163.com

as well as their practical effectiveness and application potential in food preservation across categories such as meat, seafood, fruits and vegetables, are analyzed and summarized. The development of NO donor sustained-release system can provide new ideas and solutions to enhance the bioavailability of NO, improve the food quality and extend its shelf life, which shows great application prospects in the food sector.

Key words: Nitric Oxide (NO); donor sustained-release system; food preservation

食品安全问题已经逐渐成为全球范围内备受关注的重要议题。据世界卫生组织报告，食源性疾病是世界范围内引起发病和死亡的主要原因，全球每年约有6亿人因摄入受污染的食品而患病，约42万人死亡^[1]。随着全球化食品安全的推进，食品供应链变得更加复杂，跨地域的生产、加工、运输和分销，使得食品安全管理面临诸多挑战，健康饮食改善和经济效益提升迫在眉睫^[2]。在日常生活中，新鲜肉制品、水产品、水果和蔬菜因货架期短，储运不当，易引起致病微生物的滋生并导致食物腐烂变质，不仅会造成巨大的经济损失，还会使消费者健康受到严重影响^[3]。常见和传统的物理（热、辐照、微冻和低温处理等）、化学药剂（二氧化氯、二氧化硫和臭氧等）、生物（植物精油）和其他新型保鲜方法（气调包装），虽然有一定的保鲜效果，但是会有人力、设备投入过大或高化学残留的情况出现，长时间使用还会影响食品的口感与质量（表1）^[4]。因此，选择有效的保鲜技术以延长食品保质期、减少资源损耗、改善食品安全性并提高经济价值具有重要意义。

一氧化氮（Nitric Oxide, NO）是一种脂溶性和微溶于水的气态自由基，作为细胞间和细胞内传递信息的重要信号分子^[12]，在生物体内发挥着延缓衰老、抗菌、抗炎和抗病虫害的作用^[13]。大量研究表明NO已在肉制品、水产品 and 采后果蔬等应用中展现出优异的保鲜功能^[14-16]。由于NO进入体内后与O₂进行自氧化反应，会在体内积累NO₃⁻，过量的NO₃⁻会被代谢成NO₂⁻，继而转化为亚硝胺，亚硝胺具有潜在的致癌性。因此，经NO处理后体内的残留通常以NO₃⁻或NO₂⁻的浓度衡量。目前，欧洲委员会规定蔬菜类NO₃⁻最大限量为2 500.00~4 500.00 mg/kg；我国《食品安全国家标准》规定蔬菜中对NO₃⁻含量并无要求，NO₂⁻限量不得超过20.00 mg/kg^[17]。Yang等^[18]研究发现经3.00%（体积）NO处理1 d后的杏仁、核桃和大麦中NO₃⁻含量分别为12.21、11.73、8.29 mg/kg，NO₂⁻含量分别为1.91、0.82、2.04 mg/kg。还有研究利用不同浓度的NO（300.00、600.00、900.00、1 200.00和1 500.00 μL/L）熏蒸杏干，熏蒸后杏干中NO₃⁻含量分别为279.50、392.90、458.74、569.55、629.64 mg/kg，

NO₂⁻含量分别为2.36、3.53、4.31、5.56、6.86 mg/kg^[19]。上述研究的NO残留结果均远远低于现行标准，表明低剂量外源性NO处理后果实几乎无残留，食用安全性较高。虽然NO已成为一种可供选择的安全的保鲜技术，但是NO半衰期短（2~5 s）和使用效率低的问题逐渐凸显。目前，研究者正致力于开发各种不同类型的NO供体缓释系统，以提高其使用寿命和抗菌效率，NO供体缓释体系有望为NO在食品贮藏领域的深入研究提供新的视角^[20-22]。

表 1 不同保鲜技术的优缺点
Table 1 Advantages and disadvantages of different preservation techniques

保鲜技术	优点	缺点	参考文献
微冻技术	较大程度抑制生物体的生理活性，减少细胞结构被破坏，达到延缓果蔬成熟衰老维持外观品质	处理过程复杂，操作不当会影响保鲜效果；处理时间较长，会引起部分风味损失	[5]
物理方法			
低温处理	低温环境有效减缓微生物的生长，减少食品腐败变质，较好的保持食品的营养成分和风味；适用范围广	运输和储存过程中对温度的控制要求严格；长时间的低温储存会导致部分食品冷冻损伤，影响风味	[6]
生物和其他新型方法			
植物精油	可以有效抑制食品中自由基的形成及微生物的生长；安全性较高	植物精油本身的气味会对部分产品的风味造成影响；成本高	[7]
自发气调包装	有效延长食品保质期；较好的维持食品新鲜度	自发气调中气体的生成速率难以精确控制；适用范围有限	[8]
二氧化氯	对多种病原体（包括细菌、病毒和真菌）具有较强的杀菌效果；处理后不会形成有机氯代产物	高浓度的二氧化氯具有毒性；残留高，对食品质量会产生一定影响	[9]
化学方法			
臭氧处理	抑制微生物生长；减少营养物质的消耗；维持果实的质量且无化学残留	高浓度臭氧处理不能保证果实在储藏过程中的质量；低浓度臭氧处理耗时耗力且不利于实际生产	[10]
NO处理	具有优异的抗菌与抗氧化作用，延长食品保质期；可改善食品色泽和香气，提升风味	生物利用度低；半衰期较短；易被氧化使用率低	[11]

该文综述了各类 NO 供体缓释系统及其在常见食品中保鲜的应用研究。通过对生成和信号途径的阐述,列举了一些不同类型 NO 供体释放材料的合成路径,概述了不同 NO 供体缓释系统在肉制品、水产品、水果和蔬菜等食品的贮藏应用,展望了 NO 供体缓释系统在提升食品质量方面的空间优势。各类供体缓释系统的开发与应用为拓宽 NO 在食品抗菌、保鲜领域的推广研究提供理论依据和技术支持,市场潜力巨大。

1 NO产生和信号途径

1.1 NO的生成

自 1998 年以来,NO 一直是科研人员重点的研究对象^[23]。NO 参与了多种生理过程,如神经通讯、细胞凋亡、平滑肌松弛和免疫调节等,其作为生物信号分子的发现推动了医学和生理学领域的进一步发展^[24]。在生物体内,NO 由三种一氧化氮合酶(Nitric Oxide Synthase, NOS)亚型产生:(一)神经元 NOS(Neuron NOS, nNOS 或 NOS- I),其表达于神经元和其他细胞类型的细胞质中;(二)内皮 NOS(Endothelial NOS, eNOS 或 NOS- III),其主要存在于内皮细胞中;(三)诱导型 NOS(Inducible NOS, iNOS 或 NOS- II),其主要与巨噬细胞相关,但已从各种其他组织中分离,例如:平滑肌、肝细胞、软骨细胞、小胶质细胞和内皮细胞等。nNOS 和 eNOS 均被认为是组成型亚型(Constitutive NOS, cNOS),由 Ca^{2+} 激活的钙调蛋白调节,而 iNOS 是钙非依赖性的。iNOS 产生的 NO 增强炎症期间白细胞对细菌和寄生虫的细胞毒性^[25]。所有 NOS 亚型都在分子氧和辅因子的反应下,通过氧化 L-精氨酸(L-arginine, LA)转化为 L-瓜氨酸产生 NO(图 1)^[26]。由于细胞种类的不同,NOS 的类型也不一样,NOS 会通过不同信号转导机制产生 NO^[27]。NO 的半衰期比较短,容易与其他自由基或分

子反应,因此研究人员大都以调控 NOS 活性为主。

1.2 NO信号传导

NO 信号传导是一个高度放大和集成的信号系统,依靠其独特的反应活性与化学特性,能够直接或间接作用于不同的蛋白质靶点,最终引发免疫启动^[28]。NO 作为机体内分布最为广泛的信使分子,通常以依赖或非依赖环磷酸鸟苷(Cyclic Guanosine Monophosphate, cGMP)的方式参与调节多种信号通路,如调节平滑肌和血压,参与蛋白质的翻译后修饰,影响细胞内的离子通道和蛋白激酶活性^[29]。动物细胞中的信号传导主要是 NO 穿过靶细胞膜并与其主要受体可溶性鸟苷酸环化酶(Soluble Guanylate Cyclase, sGC)结合。sGC 是 NO-sGC-cGMP 信号转导途径的中心环节,通常存在于血管平滑肌细胞与血小板中。NO-sGC-cGMP 轴是调控心血管系统的关键信号转导途径,在血管内皮细胞中,eNOS 作用于 L-精氨酸后合成并释放 NO,NO 通过与 sGC 中的血红素结合,形成铁-亚硝酰复合物,从而抑制血小板聚集和血小板在内皮的粘附^[30]。因此 sGC 在心力衰竭和高血压等疾病的治疗中具有重要作用^[31]。

植物体内的 NO 主要通过硝酸还原酶途径与 NOS 途径介导产生^[32],与动物细胞中的情况类似,植物细胞中 NO 介导的信号传导途径包括:与环核苷酸、 Ca^{2+} 离子和蛋白激酶等元件结合^[33,34]。NO 作为植物中重要的调节因子,通过多种基因表达实现对植物生命活动的调控,并在调节细胞的凋亡、生长发育(影响内源性乙烯代谢)、呼吸代谢、衰老和成熟,以及植物对非生物和生物胁迫的响应等过程中发挥着中枢作用^[35]。通过调节信号分子水平、改变防御相关基因的表达、协调防御信号通路之间的复杂关系从而激活防御系统,有效地抵抗多种病原体的侵害^[36]。NO 信号传导功能的实现,最终使得 NO 生理功能发挥作用。

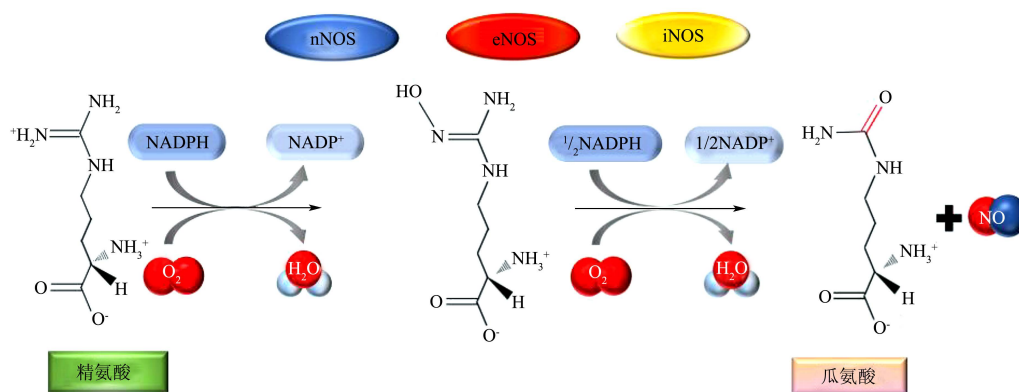


图 1 一氧化氮合酶(NOS)内源性一氧化氮生成途径

Fig.1 Endogenous NO generation pathway of nitric oxide synthase (NOS)

1.3 NO生理生化作用

1.3.1 NO的抗病性

植物在进化过程中为了对抗病原菌的侵害建立了多层次的被动和主动抗性机制。被动抗性主要是在植物细胞表面提供物理屏障和细胞内对病原体（如细菌、真菌、卵菌、支原体或病毒）有毒的物质（如抗菌化合物、酚类、不饱和内酯和抗菌肽）。主动抗性防御主要是在病原体感染后迅速诱导，包括活性氧（Reactive Oxygen Species, ROS）的释放、过敏反应的产生、植物抗毒素的形成以及细胞壁的加固和修复。这两种机制可以协同对抗病原菌的侵害，防御反应的激活可以精细调节激活时间和强度，从而决定植物的抗性水平^[36]。*S*-亚硝基化是控制与植物免疫相关细胞的主要翻译修饰过程，将NO添加到蛋白质半胱氨酸硫醇以形成*S*-亚硝基硫醇，从而影响二硫键的形成或蛋白质氧化，诱导蛋白质构象和定位的变化，并直接或通过控制辅因子的结合来影响其生物活性。在病原体的刺激下，NO合成效率增加，诱导了植物抗毒素物质的积累，影响过氧化物酶ROS的积累，诱导过氧化氢（Hydrogen Peroxide, H_2O_2 ）的产生，调节宿主的氧化还原状态，激活丝裂原活化蛋白激酶防御基因和疾病相关蛋白的表达，引发感染部位附近细胞程序性死亡，从而抑制病原体的生长^[37]。

1.3.2 NO的抗菌性

内源性NO主要以调控信号通路来发挥抗病性相关生理作用，而外源性NO主要以产生细胞毒性来获得抗虫害和抗菌性相关生理作用。与真核细胞类似，

NO在细菌中同样存在着NOS（细菌NOS, Bacterial NOS, bNOS），但它们缺乏一个必要的还原酶结构域^[38,39]，因此需要通过bNOS与体内真核还原酶作用产生NO，而bNOS产生的NO可以保护细菌免受免疫氧化爆发并增加细菌抗生素耐药性。

NO的抑菌效果具有剂量依赖性，在低浓度下其杀菌作用不明显，而高浓度下则显示出超强的杀菌性能，NO抗菌机制见图2。NO作为自由基在细胞内不太稳定，容易与氧或ROS中间体如超氧阴离子（ O_2^- ）和 H_2O_2 反应，通过以下反应（1）-（5）生成具有高氧化活性的产物，包括ONOO⁻、二氧化氮（Nitrogen Dioxide, NO_2 ）、三氧化二氮（Dinitrogen Trioxide, N_2O_3 ）等^[40]。



这些活性物质可以通过活性硫醇、胺、血红素基团、铁硫簇和其他基团（如苯酚或芳香族氨基酸残基）与蛋白质相互作用，例如： N_2O_3 和ONOO⁻可以通过硫醇的反应性和胺的亚硝化，或酪氨酸的硝化在不同的位置氧化膜蛋白。NO也可以与金属酶作用，导致铁耗竭，还可以与游离巯基反应^[41]。这两种反应都会造成代谢酶失活，同时NO可以靶向DNA，引起细胞脱氨基和氧化损伤，并导致DNA切割，最终造成细胞死亡。此外，NO能够通过诱导脂质过氧化作用，破坏细胞膜，NO对细菌的多因素损伤会引起细胞功能障碍并最终诱导细胞死亡^[42]。

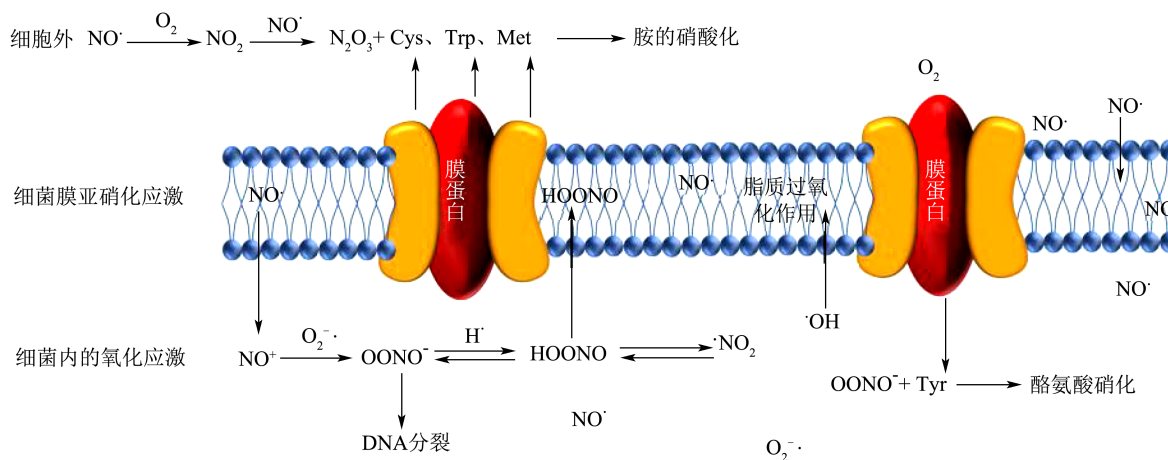


图2 NO的抗菌机制

Fig.2 Antibacterial mechanism of NO

2 NO供体及缓释系统的类型

2.1 NO供体

尽管 NO 具有不同的生理作用,但由于在实际应用过程中存在半衰期短或可用浓度不足、水溶性低、细胞代谢产生耐受性且极易被氧化成 *N*-氧化物等问题,其在各个领域中的应用均受到诸多限制,因此,NO 供体的设计与开发成为了有效改善上述不足的策略之一。根据产生 NO 的作用机制与释放方式不同可将 NO 供体分为直接供体和间接供体。直接 NO 供体通常是一类具有 $X-N=O$ 基序的分子,其无需经过其他酶或化学反应的转化过程可直接释放 NO,如 *S*-亚硝基-*N*-乙酰基-*DL*-青霉胺(*S*-Nitroso-*N*-acetyl-*DL*-penicillamine, SNAP)和硝普钠(Sodium Nitroprusside, SNP),它们能快速释放 NO 并使其能够迅速发挥生物效应^[43]。间接 NO 供体如有机硝酸盐、亚硝酸盐、金属 NO 络合物和氧化呋咱等,它们在体内则需要经过酶促代谢或其他生化反应才能释放 NO,通常在体内先转化为 NO 前体,再在 NOS 的作用下进一步生成 NO^[44]。目前,在实际应用中最受关注并被广泛结合使用的 NO 供体主要有 NO 气体、*N*-二氮烯鎓二醇(*N*-Diazenium Diolates, NONOates)和 *S*-亚硝基硫醇(*S*-Nitrosothiols, SNO)等。

2.1.1 NO气体

NO 是一种普遍存在的气体分子,它能够自由的穿过细胞膜,其额外有一个单电子,因而具有高度的反应性。内源性 NO 在极低的浓度范围内,也可以调节许多生理过程,如神经传递、细胞凋亡、基因转录等^[36]。现有研究表明,气体 NO 是一种用于新鲜和贮藏产品采后病虫害防治的熏蒸剂,对迄今测试的所有昆虫和螨类都有效,并可用于害虫控制,包括新鲜和贮藏产品上各个生命阶段的外食性和内食性的害虫^[18]。同时,NO 对侵害果实的真菌病原体(黄曲霉、黑曲霉和意大利青霉菌等)具有显著的抑制作用,通过破坏真菌细胞膜的完整性,改变菌丝体的微观结构,导致金属离子与核内物质渗漏,进一步抑制真菌的生长与繁殖^[45,46]。NO 作为植物乙烯生物合成的拮抗剂,NO 熏蒸可以改善新鲜食品采后品质,延缓衰老和延长货架期。若熏蒸操作得当,不会在新鲜水果和蔬菜上残留有害物质^[47,48]。由于 NO 容易与 O_2 反应生成 NO_2 ,因此建议在超低氧的条件下于密闭熏蒸室中进行熏蒸,以最大限度地减少熏蒸室中 NO 的氧化^[20]。对于新鲜食品,可用惰性气体如(N_2)稀释 NO,防止 NO_2 或 NO_3 的形成,当用适量 N_2 冲洗后,食品中

基本不会有以 NO_3^- 、 NO_2^- 离子或 NO_2 气体形式存在的残留物,气体 NO 熏蒸已成为一种相对安全的保鲜手段^[49]。

2.1.2 NONOates

NONOates 是一类含有 $[N(O)NO]^-$ 部分或基团的化合物,其结构具有高度可修饰性,通过设计保护基团,使其在特定酶的作用下分解,选择性地去除靶器官或细胞中的保护基团,从而暴露活性位点并释放 NO,或将 O_2 以“受保护”的形式修饰 NONOates,通过 ROS 触发的方式释放 NO^[43]。在生理条件下,每 1 mol 的供体可自发生成 2 mol 的 NO,其分解特性受 pH 依赖响应,NONOates 已在生物医学领域受到了广泛关注^[50]。通常,NONOates 的合成需要仲胺与高压 NO(通常 5 atm)在乙腈或甲醇钠的溶剂中反应,氮原子与胺连接产生 NONOates,根据结构的不同,NO 释放动力学的半衰期从数 s 到数 h 不等,例如,二乙胺-壬酸二乙酯、脯氨酸-壬酸二乙酯和二乙烯三胺-壬酸二乙酯的半衰期分别为 2.3 min、1.8 s 和 20 h^[51]。NONOates 基团通过 O_2^- 烷基保护可进一步增加其半衰期,即使在酸性介质中,这些 O_2^- 烷基化 NONOates 的分解也会非常缓慢^[52]。

2.1.3 SNO

SNO 不仅被认为是 NO 的储存库,还被视为是生物系统中 NO 的天然转运体,其通过硫醇残基的亚硝基化(或亚硝化)形成,其中 *S*-亚硝基谷胱甘肽(*S*-Nitrosoglutathione, GSNO)、*S*-亚硝白蛋白、*S*-亚硝基血红蛋白和 *S*-亚硝半胱氨酸是内源性 NO 供体^[52]。外源性 NO 供体(如 SNP、SNAP)可通过硫醇与氮氧化物或烷基亚硝酸盐反应合成得到。这些供体利用 pH 变化、酶活性或光照射等因素催化 SNO 或与 SNO 发生亚硝化反应,对 NO 进行调控,不仅延长了稳定递送 NO 的能力,还能选择性触发响应释放 NO^[53]。与其他供体相比,SNO 具有一些关键优势。首先,与 NONOates 的毒性相比,SNO 几乎不存在毒性问题。其次,与 NONOates 类似,SNO 不会随着时间的推移而产生耐受性。最后,SNO 具有无限制释放 NO 的可能性^[50]。尽管 SNO 已得到广泛研究,但是在实际应用中却鲜有报道,因此,通过它们的选择性效应和多种刺激响应释放 NO 在未来后续研究中应用潜力巨大。

2.2 NO供体缓释系统

NO 供体的合成和合理利用虽然改善了 NO 半衰期短、生物分布不均和缺乏递送的问题,但目前仍然面临着具有潜在毒性、光化学或由温度不稳定因素所

引起的不易存贮的重大挑战,使其难以实现延长释放,以及难以经受住对某些物质的抵抗。因此为改善 NO 供体的使用缺陷,增加其稳定性、生物分布、跨膜转运和循环使用时间,研究者将目光转向了合成各种能精准控制释放速率、延长生物学效应时间和减少毒副作用的缓释材料^[44]。近年来,将 NO 供体导入缓释载体中,最大程度利用其生理生化功能,逐渐成为各个领域的焦点。下文将对不同类型的 NO 供体缓释系统,包括纳米、有机、无机缓释材料的特点及合成方法进行归类和总结。

2.2.1 纳米缓释材料

纳米材料因其具有颗粒小(1.00~100.00 nm)、表面反应活性高、生物相容性好等特点被广泛研究。通过吸附或共价连接的方式,将 NO 供体附着在载体上(图3),可改善 NO 的疏水性、提高抗菌效率和抗生物膜能力。纳米缓释载体为 NO 抵御细菌、微生物的侵蚀提供了坚实的屏障,并显著增强了 NO 的高效利用^[54]。

2.2.1.1 纳米颗粒

二氧化硅(Silicon Dioxide, SiO₂)纳米颗粒是最有潜力的载体之一,具有粒子大小可调控、表面易修饰、功能化简单、稳定性强和生物相容性好等优点^[55]。SiO₂纳米颗粒可通过溶胶-凝胶方法合成,用定量的硅烷基功能剂对 SiO₂纳米颗粒进行改性,将粒子表面导入不同种类的官能团,如羟基、巯基和胺等,这些官能团即为 NO 释放的重要组成部分。Hetrick 等^[56]以四乙氧基硅烷或四甲氧基硅烷(Tetraethoxysilane, TEOS 或 Tetramethoxysilane, TMOS)和氨基烷氧基硅烷为原料,与乙醇(或甲醇)、氨水和水共缩合制备 SiO₂纳米颗粒;在碱性条件下,将 SiO₂中的胺官能团暴露在高压 NO(5 atm)中以转化为 NONOates;然后将 TEOS 或 TMOS 与改性后的氨基烷氧基硅烷混合,在氨催化剂的存在下,硅烷混合物加入至乙醇,通过溶胶-凝胶方法形成 NO 供体 SiO₂纳米颗粒,该纳米颗粒的 NO 释放总量为 7.60 μmol/mg,最大 NO 通量为 190 000 ppb/mg,其显示出比其他供体缓释材料更强的 NO 释放量;同时该材料具有超强的灭菌性能,所释放的 NO 可以灭杀 99.00% 的来自不同细菌(铜绿假单胞菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、表皮葡萄球菌和白色念珠菌)的生物膜,快速递送 NO 可能比缓慢/延长递送 NO 能更加有效地对抗生物膜^[57,58]。此外,通过改进 Stöber 法合成了无机/有机杂化 SiO₂纳米粒子,将烷基硅烷和氟碳基硅烷接枝到含胺 SiO₂纳米颗粒表面,制成了不同表面疏水性的材料;再在 SiO₂纳米颗粒表面添加疏水配体,可以在不影响粒径或形态

的情况下调节 NO 释放动力学($t_{1/2}=0.3\sim 2.7$ h);通过提高 SiO₂纳米颗粒表面特性的能力,拓宽 NO 释放的应用^[59]。还有研究以 SiO₂为核、SNO 改性的壳聚糖(Chitosan, CS)为壳层制备出 NO 释放核壳纳米颗粒,S-亚硝基基团并入硫醇改性的 CS 壳层纳米颗粒中,该纳米颗粒延缓了 NO 集中释放,并显示出 0.15 mmol SNO/mg 的 NO 释放量^[60]。硫醇化是改善多糖和无机颗粒之间化学键合的常用方法,基于淀粉的纳米颗粒具有载药量高、持续释放和靶向递送的优势。将淀粉硫醇化,纳米颗粒共价键合到亚硝酸钠合成了硫醇化的 NO 释放纳米颗粒,再将其掺入明胶海绵中,获得了能够精准控制 NO 释放的通用系统,该材料对大肠杆菌的抑菌率(99.70%)远高于金黄色葡萄球菌的抑菌率(70.00%),这是由于金黄色葡萄球菌肽聚糖外细胞壁比大肠杆菌厚,使其对释放 NO 的生物材料更具抵抗力^[16]。

2.2.1.2 纳米纤维

纳米纤维是一种通过表面电荷之间的静电排斥,不断的从粘弹性流体中拉伸纳米纤维,而制成可控调节其尺寸、形态和多孔网状的纳米材料^[61]。与其他技术相比,静电纺丝技术具有制作简单、纤维形态可控、易于设置和经济实用等优点,已用于纳米纤维的制作^[62]。纳米纤维是有效的 NO 供体递送平台,自身具有一定的抗菌和抗炎活性,还可防止 NO 的过早释放,实现 NO 的释放时间超过 24 h,在生物医学和医疗保健等领域受到了极大的关注^[63]。以聚乙烯吡咯烷酮和乙基纤维素制作生物聚合物,NONOates 作为 NO 供体分子,利用静电纺丝技术制备 NO 纳米缓释纤维(NO-纤维),NO-纤维保留着较高的 NO 含量(≥60%初始浓度),且能有效抑制铜绿假单胞菌和耐甲氧西林金黄色葡萄球菌的生长^[64]。Douglass 等^[65]将 GSNO 与聚合物聚羟基丁酸酯和聚乳酸共混,使用静电纺丝装置制备出 NO 纳米纤维材料,在 72 h 显示出最大 NO 通量为 $0.40\sim 1.50\times 10^{-10}$ mol/(mg·min),将其与金黄色葡萄球菌接触 24 h 后,发现材料表面减少了约 80.00% 的粘附细菌,加入生物相容性物质使用静电纺丝装置制作出的纳米纤维可以维持 NO 稳定释放(NO 不会受到水分的影响),进而提高抗菌效率。

2.2.1.3 纳米凝胶

纳米凝胶是一种具有三维(3D)可调多孔结构和亚微米范围(20.00~250.00 nm)粒径的水凝胶,它不仅有着纳米级制剂的隐性优势,而且具备着高稳定性、高负载能力、高水合性以及高可调性的特征。这些特征使得纳米凝胶可以有效地将供体包封在内部网络中,控制其释放速率和载药量,同时保护供体在存储

或避免在循环过程中降解以减小副作用^[66]。基于纳米凝胶的不同结构和组成单元,构建方法可分为物理交联和化学交联^[67]。化学交联是通过单体中的官能团偶联形成,与物理交联相比,化学交联的纳米凝胶初始阶段通常表现出更稳定的药物释放性能,并且可以通过调整交联剂的浓度和反应条件精确控制凝胶的结构和性能,从而能在大部分环境中使用。Kang 等^[68]设计了一种交联荧光纳米凝胶,通过化学交联制备一种具有 pH 响应和酶可降解性的硼酸交联乳糖修饰的 CS、多巴胺、NO 缀合乙酰化透明质酸的纳米凝胶,该凝胶负载有阿霉素 (Adriamycin, DOX),通过硼酸-邻苯二酚二醇交联的 pH 依赖性裂解和透明质酸酶活性来控制 DOX 和 NO 的缓慢释放,透明质酸酶水平为 0 单位时,30 min 后仅有 $\leq 8.00\%$ 的 NO 释放,当水平 ≥ 100 单位时,会释放 $\geq 90.00\%$ 的 NO,生物环境中邻近的吸电子羧基取代基削弱了部分 S-N 键,更有利于均裂产生 NO。物理交联是通过分子或官能团非共价相互作用(包括:氢键、范德华力、疏水相互作用、主客体相互作用和静电相互作用等)形成,物理交联的纳米凝胶主要是一些聚合物分子组成的超分子颗粒。虽然物理非共价键的相互作用相对弱于化学共价交联,但是由于物理自组装的过程不需要复杂的反应,其合成更为灵活方便且生物相容性更高,能在特定环境条件下释放活性物质^[69]。Huang 等^[70]将三聚磷酸钠作为交联剂以诱导 CS 包封 GSNO (G@CS) 并与 Ag 纳米

颗粒自组装形成纳米凝胶 (Ag-G@CS),GSNO 可通过金属离子响应 (Zn^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Ag^{+} 、 Cu^{2+}) 释放 NO,Ag-G@CS 中约 22.00% 的 NO 被释放出来,是 G@CS (约 5.00%) 的 4 倍,Ag 纳米粒子能够促进 GSNO 的分解,并增加 NO 的释放量,增强 Ag^{+} 的抗菌功效,实现生物膜的完全根除。此外,使用透明质酸溶液和二乙烯基砷的官能团交联形成透明质酸基凝胶后,将 SNAP 和抗菌肽掺入透明质酸基凝胶中形成含有 NO 和肽的纳米凝胶,该复合凝胶释放 NO 的持续时间超过 24 h,实验表明 NO 纳米凝胶对大肠杆菌、耐甲氧西林金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的最小抑菌浓度值分别为 1.56、0.78 和 0.39 $\mu\text{g/mL}$ ^[14]。综上,化学交联相比于物理交联的纳米凝胶,提供了更强的网络稳定性,更大的设计自由度以及增加的 NO 释放通量,物理交联的纳米凝胶则是具有更大的环境响应性和更温和的加载技术,可根据不同的实际需求,选择合适的交联方式。

2.2.2 有机缓释材料

有机缓释材料通过物理或化学方法将小分子供体与有机高分子载体结合,通过调整材料结构和性质来控制 NO 的释放速率和持续时间,最终实现延长释放供体的目的。有机缓释材料能显著提高 NO 供体的稳定性和生物可利用性,已开展了大量研究。目前,常见的有机缓释材料分为聚合物类和水凝胶类缓释材料。

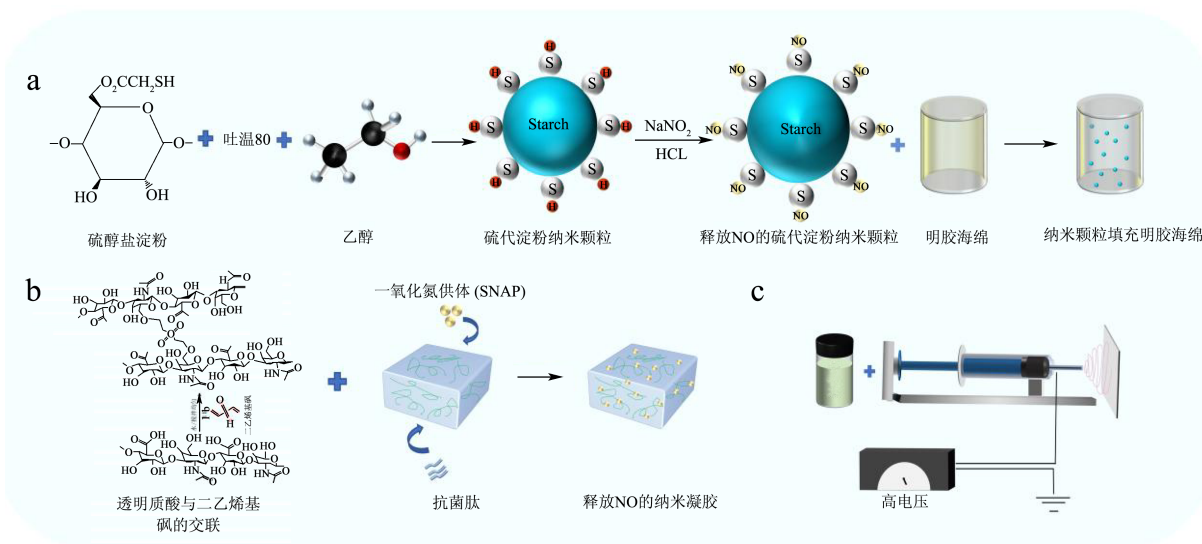


图 3 NO 供体缓释系统的纳米凝胶

Fig.3 Nano gel of NO donor sustained release system

注: a 为包埋在明胶海绵中可释放 NO 的硫醇化淀粉纳米颗粒; b 为通过交联反应形成的纳米凝胶,并将 SNAP 与抗菌肽掺入纳米凝胶; c 为可释放 NO 的 S-硝基谷胱甘肽纳米凝胶。

聚合物作为潜在的 NO 输送平台,将基于小分子的 NO 供体共价缀合或物理包封到聚合物载体中,形成具有优异的储存稳定性、增强的释放效率性和优化的药代动力学性的 NO 缓释系统。通过共聚合不同单体,可形成不同物理和化学特性的聚合物链,通过调节聚合物链的亲水和疏水性,以实现按需调控 NO 的释放速率^[42]。Zhou 等^[71]设计了一种可以稳定释放 NO 的有机创面敷料,通过将 NONOates 接枝在 CS 侧链上制成的聚合物 (CS-NO) 涂覆在聚己内酯静电纺丝毡表面合成,其在半乳糖苷酶的催化下,材料能够以可控持续的方式释放 NO。此外,还有研究利用改进的软光刻两阶段复制模塑技术制备了具有有序柱阵列的纹理化聚氨酯薄膜,在膜的表面用 SNAP 溶剂浸渍后得到了一种具有特殊表面织构化和 NO 释放的双功能聚氨酯聚合物膜,表面织构化和 NO 释放组合产生的协同效应使聚合膜可显著减少细菌的粘附(在 2 h 内该材料将表皮葡萄球菌的黏附减少了 84.00%,金黄色葡萄球菌在不同表面的粘附也出现了类似的结果)^[72]。

水凝胶是一类亲水性的 3D 网络结构凝胶,拥有良好的可拉伸性、较高的稳定性和保水性、增强的生物降解性和相容性,以及优异的活性成分保护性等特性,其能够以交联、冷冻干燥、溶胀和降解的方法进行改性,来获得具有不同生理功能的缓释材料^[26]。将 NO 供体嵌入水凝胶基质中,水凝胶能在水相环境中保持其 3D 网络结构,通过增减孔隙结构的大小、调节水凝胶的交联度调节 NO 的释放速率。有研究采用 LA 对羧甲基纤维素 (Carboxymethyl Cellulose, CMC) 进行改性,将 CMC-LA 水凝胶连接到交联剂 CS 的主链上,合成了一种具有良好生物相容性和可降解性的精氨酸羧甲基纤维素水凝胶 (L-CMCLA@CS),CMC-LA 中加入 CS 后,带有正电荷的氨基对细菌细胞表面上带负电荷的化合物具有亲和力,水凝胶通过 ROS 响应释放 NO,将 CMC-LA@CS 中的 L-精氨酸转化为 NO 和 L-瓜氨酸,释放 NO 的时间可持续 10 min,同时该材料展现出超强的抗菌率 (>90.00%),静电吸附过程改变了细菌细胞膜的渗透性,减少或抑制营养物质的运输,最终导致细菌“饥饿”而死亡,CS 和 NO 释放平台的协同效果,使 CMC-LA@CS 水凝胶组展现出良好的抗菌活性,并具有预防和治疗伤口细菌感染的能力^[73]。另一项研究通过氢键和静电相互作用将磺化二钼盐与聚吡咯交联制备出 3D 多孔水凝胶衍生载体 (PP-Mo) 冻干物,以物理吸附(包括氢键和 π - π 相互作用)将 NO 供体 (*N,N'*-二仲丁基-*N,N'*-二亚硝基-1,4-苯二胺)负载至多孔载体上,设计了一种可控的 NO 缓释系统 (PP-Mo-NO),在辐照 10 min

内 (1.00 W/cm^2),PP-Mo-NO 在相对较低的浓度 ($100.00 \mu\text{g/mL}$) 下对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的杀菌率均超过 99.10%,同时体内实验证明 PP-Mo-NO 释放的 NO 不仅可以有效地杀死感染部位的细菌,而且可以显著减轻细菌感染引起的炎症反应^[74]。NO 与有机物质体系产生的协同作用在抗菌、消炎方面有着优异的生物膜消融效果和细菌靶向性,有机缓释材料的设计与开发为 NO 抗菌的扩展应用提供了高效和安全的多模式协同策略。

2.2.3 无机缓释材料

无机缓释材料是将 NO 供体和无机化合物共混后得到的一类以储存并持续释放 NO 为目的的材料,其具有较高的热和化学稳定性、生物相容性和生物可降解性等。与部分有机材料相比,无机缓释材料具有规则的晶体和孔隙结构,优异的表面修饰能力,以及增强的 NO 负载和存储能力,超强的释放性能为 NO 供体提供了更高的稳定性和更长的 NO 缓释时间。最常见的无机缓释材料是一类包含有金属离子的缓释材料,通常会包含 Na^+ 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 、 Mn^{2+} 和沸石等物质^[75]。

金属离子缓释材料通常具有特殊的结构或化学性质,能够缓慢、持续地释放金属离子到周围环境中,以实现特定的生理功能或作用。将一定浓度 Cu^{2+} 和细胞外基质重要成分透明质酸混合后,通过胺化层共价将混合物固定在经氢氟酸预处理的 ZE21B 合金表面,得到一种 Cu^{2+} 与环戊二烯 1,4,7,10-四氮杂环十二烷-*N,N',N'',N'''*-四乙酸 (DOTA) 形成稳定的杂化涂层(图 4、图 5),该材料避免了 Cu^{2+} 的集中释放,利用螯合 Cu^{2+} 的催化作用可稳定、持续地生成 NO^[15]。加入金属离子不仅使材料具有更好的稳定性和有效性,还为 NO 的产生提供了启动开关。沸石也是一种常见的金属离子缓释材料,是由硅氧四面体和铝氧六面体结构组成,具有多孔、表面积大和较强吸附能力等特征。施用自身微孔结构和表面功能基团,与周围环境中的金属离子进行吸附和交换,金属离子吸附到沸石表面或进入沸石的微孔中后,在一定条件下能实现活性物质的缓释作用。Narin 等^[76]设计了一种储存 NO 的斜发沸石,在 30°C 下用 20.00 mL/min 的 NO 气体流量连续冲击,经用氦气吹扫后的沸石进行 NO 的负载,沸石对 NO 总吸附容量、可逆吸附容量和不可逆解吸容量分别为 8.48、1.78 和 6.71 mmol/g,负载 NO 后的沸石对大肠杆菌和枯草芽孢杆菌显示出可持续至少 6 周的抑菌活性,且强度不会降低。无机缓释材料为 NO 供体提供了很好的缓释平台,NO 供体和金属离子的有效结合,为 NO 的持续释放开辟了新的研究方向。

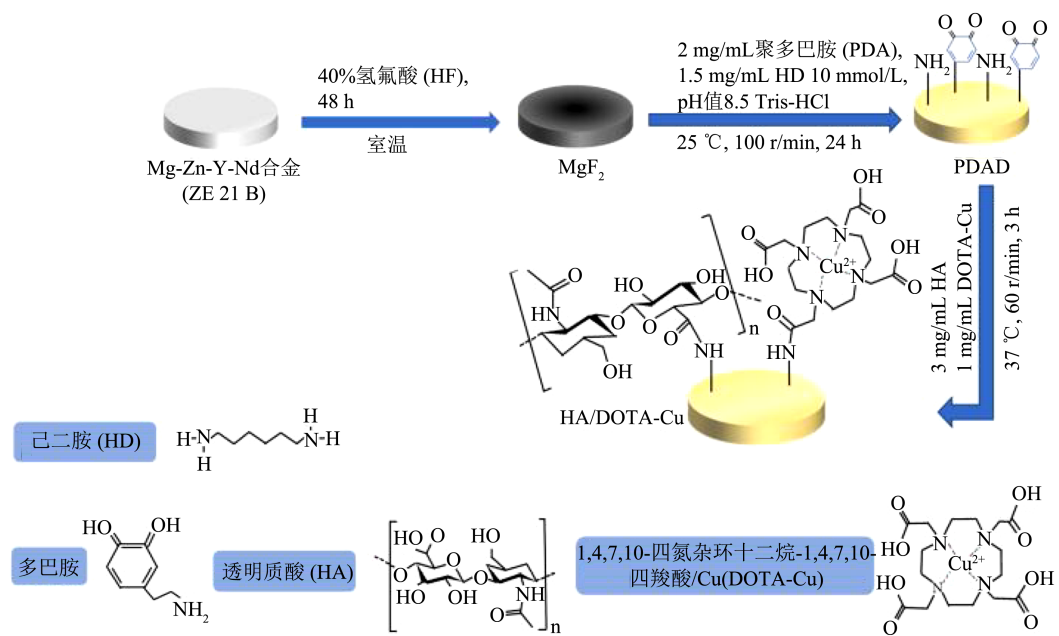


图 4 图 4 ZE21B 合金的表面改性方案

Fig.4 Surface modification scheme of ZE21B alloy

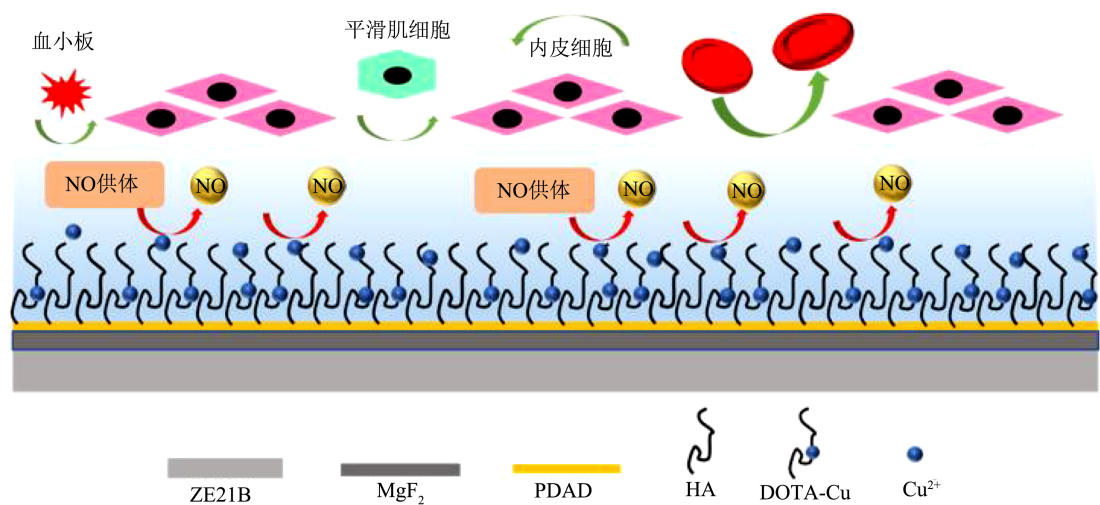


图 5 由 Cu 固定的 HA/DOA-Cu 样品催化的 NO 释放机理示意图

Fig.5 Schematic diagram of the mechanism of NO release catalyzed by Cu fixed HA/DOA-Cu samples

3 NO在食品中的应用

NO 作为一种生理性信号分子，已经在生物医学上开展了大量的研究，并显示出了极强的治疗效果，设计与开发不同类型的 NO 供体缓释系统，不仅提高了 NO 的使用率，还扩大了其在各个领域中的应用，为 NO 各种生理效应的充分展现拓宽了道路。目前，诸多研究表明 NO 在食品领域显示出突出的抗菌和保鲜功能^[77]。NO 通过与微生物细胞膜中的巯基团、酶活性部位和 DNA 发生反应，可干扰微生物的代谢和生长，同时 NO 可以与氧自由基反应，减少脂质氧化，使食品具有优异的抗病性和抗菌性生理作用，最终防

止或延缓其腐败变质。迄今为止，NO 供体缓释系统主要在生物医学领域中应用较多，其在食品领域中却鲜有报道，因此，下文仅就对不同类型的 NO 供体在各类食品处理后的贮藏保鲜应用研究进行列举。

3.1 肉制品保鲜

肉制品在运输贮存期间极易产生脂肪和蛋白质的水解氧化、微生物和细菌繁殖生长、酶自溶引起的感官、颜色和嫩度等品质劣化的问题，这些问题进一步会影响其风味与商业价值^[78]。亚硝酸盐和硝酸盐作为市场上腌制肉制品最为常用的食品添加剂，有利于维持肉制品的颜色和风味，也有利于肉制品不受微生物

的影响而减少腐败变质, 延长贮藏期^[79]。硝酸盐在肉制品加工中基本的作用机制是通过一些细菌和内源性还原剂(如还原性辅酶 I、抗坏血酸盐、异抗坏血酸盐还原硝酸盐和亚硝酸盐等)形成 NO^[80]。腌肉中鲜红色的色泽来源于 NO 与肌红蛋白发生反应后形成的亚硝基肌红蛋白络合物, 其独特的风味则产生于亚硝酸盐相关化合物和醇、酚相关的亚硝化物质相互反应, 亚硝酸盐通过对细菌酶活性的抑制显示出一定的抗微生物作用。NO 与蛋白质 Cys 中的巯基共价键合形成 SNO 的蛋白质亚硝基化, 已被证明参与了肌肉到肉的转化过程, 并对肉类品质有维持作用^[81]。盐酸氨基胍(Aminoguanidine Hydrochloride, AH)通过影响非 Ca²⁺依赖性 iNOS 产生的 NO 抑制了肌原纤维的断裂和肌原纤维完整性的破坏, AH 处理显著抑制了牦牛肉的嫩化和线粒体结构的完整性, 进一步证明 NO 通过调节 Cys 蛋白酶水解肌原纤维的作用, 影响牦牛肉的嫩度^[82]。不同浓度的 NO 气体处理猪胸最长肌后于 4 °C 下真空包装存储, 实验表明适量浓度(40.00 和 60.00 μL/L)处理可提高猪肉的保水性和嫩化度, 而过量浓度的 NO 气体(80.00 μL/L)处理则会增加猪肉的失水率和剪切力, 使猪肉颜色会变得更加鲜艳, NO 处理后猪肉的细菌总数均低于对照组(10⁶ CFU/g)^[83]。上述结果表明 NO 处理对冷却贮藏过程中的肉类质量有一定程度的调节作用, 在延缓外观颜色、嫩化度、保水性变化等方面表现优异, 通过抑制致病微生物的生长, 延长肉制品贮藏期。

3.2 水产品保鲜

水产品中含有大量人体摄入的必须营养物质, 如矿物质、高蛋白、脂肪等, 可帮助人体抵抗疾病, 促进大脑发育。随着世界人口的增长以及饮食习惯的变化, 人们对水产品的需求正在逐渐变大, 国际物质粮农组织在《2022 年世界渔业和水产养殖状况》报告中提到, 世界人均水产品的消费量正在不断地升高, 已经成为仅次于猪肉的第二大动物性食品来源^[84]。但在捕捞时, 容易造成水产品机械损伤, 如若不及时采用有效的保鲜措施, 水产品内的微生物、细菌从伤口处迅速侵入, 繁殖生长, 引起腐败变质, 降低商品价值。当海鲜死后, 其体内的酶类迅速的将蛋白质分解成低分子代谢物和游离氨基酸, 这些物质将成为细菌的营养物, 因此选择及时有效的方式对水产品进行保鲜是当务之急^[85]。外源 NO 对寄生虫(如蠕虫、线虫和吸虫)具有显著毒性, 其能在一定程度上抑制无肝肠胞虫(*Enterocytozoon hepatopenaei*, EHP)拷贝数的增加并减缓 EHP 的侵袭。对脊尾白虾注射不同浓度

的 SNP 溶液后, 贮藏第 5 天对照组中的 EHP 拷贝数均显著高于其他各组, 0.30、0.60 和 0.90 μg/L SNP 处理组中的 EHP 拷贝数分别是对照组的 0.25、0.22 和 0.30 倍, SNP 处理后的脊尾白虾免疫防御能力得到有效提高, 减轻脊尾白虾的发病症状^[86]。Wang 等^[87]将罗非鱼片用饱和 NO 溶液浸泡后, 由于 NO 与肌肉中的肌红蛋白(Myoglobin, Mb)结合产生亚硝基肌红蛋白(Nitrosylmyoglobin, MbNO), MbNO 具有稳定的粉红色, 因此罗非鱼片红肌的 *a** 值从 3.20 增加到 8.15, 白色肌的 *a** 值从 1.87 增加到 2.84, NO 处理不仅改善了罗非鱼片的肌肉色泽和颜色稳定性, 而且还延长了罗非鱼在冷藏过程中的贮藏时间。在水产品贮藏期间, 由于自溶和微生物降解过程会生成三甲胺、二甲胺和氨等 TVB-N 组分, 这些组分对人体健康有不良影响, 有研究将 NO 处理后的罗非鱼冷藏 15 d, 结果发现 NO 处理组罗非鱼的 TVB-N 值为 16.37 mg/100 g 远低于对照组 21.93 mg/100 g, 且在 TVB-N 的可接受限度范围(20.00 mg/100.00 g)内, 表明 NO 处理可减少罗非鱼中 TVB-N 的生成, 并降低水产品食用安全性问题的产生, 同时可延长罗非鱼片的货架期^[88]。目前, NO 在水产品领域上的研究较少, 但随着各类 NO 供体缓释系统研究的不断深入扩展, 相信在食品保鲜领域的成果将会有进一步的提升和突破。

3.3 水果保鲜

新鲜水果因其拥有丰富的营养物质, 如维生素、矿物质和膳食纤维等, 一直是健康饮食的重要组成部分。但水果在采摘后易受到微生物和菌群的影响从而引起腐败变质^[89]。有氧条件下, 水果中相关酶参与的呼吸作用会使碳水化合物、糖苷等有机物分解, 减弱了果实的风味和营养水平。在后熟阶段, 果实中淀粉含量的降低和果胶的分解, 虽然增加了果实的芳香和风味, 使水果变软、变甜, 且更加适合人们食用, 但也更加容易遭受致病菌的侵害^[90]。NO 已被证明对新鲜果实具有一定的生理作用机制(包括抑制呼吸速率、减少乙烯合成、延迟褐变产生、减少发病率和防护果实颜色、延缓衰老、推迟果肉软化和降低软化酶活性等), 因其可以中和氧化损伤, 所以显示出对上述各种品质劣变发生的保护作用^[91]。相较于传统保鲜方法, NO 处理在水果保鲜贮藏领域具有显著的优势。首先, 供体缓释系统通过控制 NO 释放, 能够有效抑制乙烯生成, 从而延缓水果的成熟过程, 保鲜期可延长 30.00%~50.00%, 例如 NO 处理后苹果的保鲜期可以达到 4~6 个月, 而传统的冷藏保鲜期一般为 2~4 个月, 气调包装的保鲜期则为 3~5 个月^[92]; 其次, 使用传统

方法保鲜, 水果硬度维持率通常为 60.00%~70.00%, 可能出现褐变等质量问题, 而 NO 处理后的水果品质表现出色, 其硬度保持率可达到 80.00% 以上, 色泽和风味保持良好^[93-95], 此外, NO 供体缓释系统在抗病性方面效果显著, NO 处理后水果的病害发生率降低约 30.00%~40.00%^[91]。

外源 NO (SNP) 处理血橙具有较优的保鲜效果, 与对照组相比, 果皮中柠檬烯 (香气) 含量和果肉中可溶性固形物含量 (甜度) 分别提高了 2.70 倍和 1.24 倍, NO 处理不仅改善了血橙果肉的色泽和硬度, 还使可溶性糖、果糖、蔗糖、维生素 C、氨基酸和矿质元素含量增加, 同时通过抑制多聚半乳糖醛酸酶和果胶酯酶的活性, 减少了浆液中 16.06% 的单宁含量, 延缓了原果胶的降解, 促进了花青素、类黄酮和总黄酮的积累, 进一步提高血橙的风味, 并使涩味最小化^[96]。Zheng 等^[97]将猕猴桃果实浸泡在 SNP 溶液 10 min 后, 室温下贮藏, 发现 NO 处理激活了猕猴桃的防御反应, 提高了抗病相关物质的水平和防御相关酶的活性, 降低了病害发病率, 将保鲜期延长了约 30.00%, 此后在贮藏期间果实的发病率逐渐增加; NO 处理延缓了猕猴桃中可溶性固形物含量的增加和维生素 C 的损失, 提高了苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalanine Ammonia Lyase, PAL)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 和 β -1,3- 葡聚糖酶的活性, 同时上调了 PAL、POD 和几丁质酶的表达, 提高了总酚、类黄酮、富含羟脯氨酸的糖蛋白和木质素的含量。施用 SNP 溶液与 NO 清除剂 (Carboxy-PTIO) 反复喷雾处理甜瓜, 可降低接种粉红单端孢的甜瓜腐烂发生率和病情严重程度, 在果实愈合的第 3 天, SNP 处理的果实发病率和疾病严重程度分别比对照组低 40.00% 和 33.80%; 喷施 SNP 后, 总酚、类黄酮和木质素含量均有所增加, 增幅分别为 38.70%、39.60% 和 31.30%, 喷雾产生的 NO 通过激活苯丙素代谢和促进伤口处木质素和松香素的积累, 加速甜瓜伤口的愈合^[98], 在愈合过程中, SNP 处理显著提高了木质素含量 (比对照组提高了 28.50%), 伤口处木质素的积累增加了甜瓜愈合组织的硬度, 降低了愈合组织的弹性、回弹性和粘聚力, 致使愈合过程中甜瓜失重较少, 病情指数较低^[99]。NO 除了对新鲜果实具有保鲜和抗菌效果, 对干果中的真菌病害也有一定的作用。有研究者发现使用 NO 气体熏蒸有效减少了杏干果实内的病害, 降低菌丝体生物量, 增加细菌细胞膜透性, 破坏质膜的完整性, 改变了菌丝体的微观结构使得金属离子和核内物质的渗漏, 最终抑制真菌的生长繁殖, 达到防治杏干真菌病害的目的^[46]。研究结果显示对照组在 48 h 时, 开始受到黄曲霉菌与黑曲霉

菌的侵染, 600.00、900.00、1 200.00 $\mu\text{L/L}$ NO 浓度熏蒸杏干, 72 h 后对黄曲霉菌的抑制率分别为 40.66%、46.53% 和 87.21%, 对黑曲霉菌抑制率分别为 20.01%、32.49%、66.04%, NO 熏蒸显著降低了由黄曲霉菌、黑曲霉菌引起的杏干的病害发生和传播率, 并以浓度依赖的方式抑制真菌在离体条件下的菌落扩张和菌丝生长^[45]。NO 不仅能改善果实的贮藏品质, 还能对其病害有强烈的抑制作用, NO 通过影响水果的风味和外观, 延长贮藏期, 降低病害率, 最终达到品质保持和病害控制的效果, NO 处理已成为水果保鲜的一种有效措施。

3.4 蔬菜保鲜

蔬菜是人们日常生活中必不可少的食物之一, 根据国际物质粮农组织统计, 人体中必需维生素 C 的 90.00%、维生素 A 的 60.00% 来自于蔬菜, 蔬菜内部含有多对健康有效的植物化学物质, 其为人提供多种必需的营养物质, 这些营养物质可以有效预防慢性、退行性疾病的发生。蔬菜在采摘过程中易产生许多人眼不能观测到的细微伤口, 这些损伤会加速细菌对蔬菜的侵蚀, 由于其自身就携带有细菌, 摘离母体后, 抵抗力瞬间下降, 逐渐产生腐败、溃烂和软化等现象^[100]。NO 供体与消毒剂 (H_2O_2) 联合使用, 显著减少了粘附在蔬菜上的细菌, 同时使其对生物膜的分散性提高了至少 50.00%^[101]。施用 SNP 与 1- 甲基环丙烯协同处理双孢蘑菇, 促进了 ROS 的代谢, 从而保护了细胞膜的完整性, 阻碍多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 与酚类化合物的结合, 下调了 PPO 的活性, 同时有效地保持了双孢蘑菇的品质, 与对照组相比, SNP 处理后果实的硬度、总酚含量和类黄酮含量分别增长了 118.91%、1.18 倍和 1.23 倍; 通过刺激抗氧化酶活性和提高抗坏血酸和谷胱甘肽含量, 减少 ROS 积累和丙二醛的产生, 减轻氧化损伤, 进而延长了双孢蘑菇的贮藏期^[102]。鲜切的马铃薯浸泡在 200.00 $\mu\text{mol/L}$ 的 SNP 溶液 20 min 后, SNP 处理延缓了马铃薯质地、营养成分和表面颜色的降解 (a^* 值降低了 0.75~0.99, ΔE^* 值增加了 1.37~1.67, 而 L^* 值逐渐增加至 7.67%~11.54%), 增加了超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD) 活性 (提高 69.08%~93.15%), SNP 处理最大限度的减少了脂质氧化的损害, 增强了抗氧化活性, 并抑制了褐变相关酶, 且保证了马铃薯中的亚硝酸盐含量在食用安全范围内^[103]。蔬菜采后虫害防治对国际贸易和粮食安全至关重要, 在超低氧条件下施用 NO 熏蒸花椰菜、生菜、南瓜、西红柿等 10 种果蔬, 通过用 N_2 冲洗稀释 NO

既可以最大限度地减少 NO 的氧化, 还有效防治了采后蔬菜的病虫害 (西花蓟马), NO 处理对蔬菜采后品质保持有积极作用且无有害影响^[47]。NO 处理蔬菜在减少细菌性病害的发生、维持蔬菜的品质和延长贮藏期等方面表现优异, 是蔬菜保鲜的一种可供选择的方式。NO 在食品领域的部分应用情况如表 2 所示。

表 2 NO在食品领域中的应用
Table 2 The application of NO in the food industry

NO 类型	食品	作用效果	参考文献
NO 气体	柑橘、梨、桃、生菜、花椰菜和苹果	延长果蔬的贮藏期, 有效杀死所有生命阶段的昆虫和螨, 方法高效且无有害残留	[20]
	苹果、杏仁、芦笋、牛油果、蓝莓、西蓝花、樱桃、大蒜、葡萄、猕猴桃、莴苣、芒果、橘子、梨、桃子、西葫芦、草莓、柑橘	NO 熏蒸较好的保持了各种新鲜果蔬的营养品质, 且新鲜产品中的残留量没有显著水平的提高, 符合现行标准要求	[21]
	杏仁、大麦、鹰嘴豆、核桃、班豆、阿月浑子果实、大米、胡桃、小麦	经 NO 熏蒸处理并用 N ₂ 冲洗后, 在坚果和谷物产品上没有出现显著的以 NO ₃ ⁻ 、NO ₂ ⁻ 离子或 NO ₂ 气体形式存在的残留	[18]
	苹果	降低了苹果中乙烯产生的速率、粉化程度和腐烂率, 提高了总酚含量, 降低果肉褐变的发生率	[104]
NO 饱和溶液 (NO 气体)	罗非鱼	改善了罗非鱼片的质量, 使得冷藏期间滴水损失显著减少, 且 TVB-N 含量相对较低, NO 处理延长了罗非鱼片的货架期	[88]
NO 溶液 (NO 气体)	“新泰红”桃果实	较好的维持了桃果实的营养与外观品质, 显著降低了桃果实的呼吸强度、乙烯释放量、失重率和褐变程度, 保持了较高的可溶性糖含量	[105]
SNP 溶液	阿月浑子果实	有效的控制了新鲜阿月浑子果实的酶促褐变, 延缓了果实的衰老和较好的保持了果实的贮藏品质。	[106]
	香蕉	显著抑制了冷害的发生, 香蕉中与能量代谢有关的酶活性显著提高, 通过维持果实高水平的能量状态和诱导能量代谢相关酶活性, 提高了果实耐冷性	[107]
	扁豆	延迟了扁豆感官品质的损失, 提高了扁豆的耐储与抗病能力, 延长了货架期	[108]

目前, NO 在食品保鲜领域中的应用大多以气体熏蒸或供体溶液喷洒为主, NO 供体缓释系统尚未在食品保鲜领域得到广泛探索和应用。可能是由于食品

安全监管要求和技术挑战, 使得 NO 供体缓释系统的稳定性和安全性在食品中的应用尚未得到验证和批准。但随着材料合成技术的进步和食品安全性的深入研究, NO 供体缓释系统将会成为食品保鲜领域的一种关键技术。

4 总结和展望

NO 供体可通过抑制腐败菌的滋生和调控品质相关酶的活性, 以提高食品质量并延长货架期, 其在食品保鲜领域中的应用已经取得了显著的成效, 因而对减少食品安全问题和提升社会效益起到了积极推动作用。进一步, 各类 NO 供体缓释系统的开发, 不仅有效解决了 NO 稳定性不高和使用效率低的弊端, 还增强了其抗菌性能和生物利用度, 并在生物医学领域开展了大量的工作。该文主要阐述了 NO 的生成和信号途径, 包括信号传导功能、抗菌和抗病性能, 同时介绍了不同类型 NO 供体系统的开发及其在食品保鲜领域的应用进展。虽然, NO 供体缓释载体已经成功实现 NO 的递送, 但在使用过程中可能会出现缓释系统生物相容性差、NO 释放量不均和潜在毒性物质残留的情况, 因此, 关于 NO 供体缓释系统的安全性、毒理学和药物残留等方面的内容还需深入探索, 以期 NO 供体缓释系统在食品保鲜领域的顺利扩展奠定理论基础。

基于 NO 缓释系统在食品保鲜领域中的应用研究现状, 对未来 NO 供体缓释系统的开发与应用工作提出以下展望: (1) 目前 NO 供体缓释系统的载体主要以纳米、有机和无机等物质组成, 在使用过程这些物质对人或动物的正常细胞是否有损伤或损伤程度如何还需进一步确认, 因此, 后续在 NO 供体缓释平台合成阶段, 可偏向选择生物相容性更高或更安全的药物和试剂, 或者减少毒性材料的使用剂量, 以保证载体自身的安全性。(2) 虽然现有研究表明, 经 NO 处理后的食品中 NO₂⁻ 和 NO₃⁻ 的残留量符合标准要求, 但是食品内部是否有亚硝胺的生成和转化情况尚不明确, 后续工作除了继续关注体内 NO₂⁻ 和 NO₃⁻ 的含量外, 还应考虑监测亚硝胺和一些其他有害物质的积累。(3) 关于 NO 供体在食品中的保鲜应用研究, 现阶段试验着重探究和分析的是材料 NO 活性成分的释放和其生理生化作用的展现, 还无法全面追踪人体或动物摄入食物后人体或动物对材料的吸收和代谢的情况, 后续工作可以侧重于阐明 NO 在人体内摄取运用后其代谢转化相关机制以及对人体安全性的研究。(4) 目前在食品方面的研究大多以气体熏蒸和 NO 供体溶液喷洒为主, NO 供体缓释系统在食品中的研究还较少, 后

续可以进一步拓展其在食品保鲜领域中的应用。(5)未来的研究除了继续优化 NO 供体缓释系统的各项性能外,还可以考虑其与不同的抗菌剂或保鲜技术联合使用,以协同发挥更优异的贮藏保鲜功能和抗菌作用。

综上所述,今后设计开发生理作用强、安全性高和经济实用的 NO 供体缓释载体并用于改善食品品质具有潜在的应用前景。生物利用度更高、稳定性更强及安全性更优的 NO 供体缓释系统将会成为未来食品保鲜领域研究方向的核心,并为食品贮藏保鲜领域的发展提供可供选择的理论支持和技术指导。

参考文献

- [1] World health organization. Food safety[EB/OL]. (2022-04-30) [2024-9-15]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>.
- [2] 冯艳娟.新时代构建食品安全监管体系的必要性及策略探究[J].食品工业,2020,41(12):196-200.
- [3] CHLEBICZ A, ŚLIŻEWSKA K. *Campylobacteriosis, Salmonellosis, Yersiniosis, and Listeriosis* as zoonotic foodborne diseases: a review [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(5): 863.
- [4] ZHU Y, GU M, SU Y, et al. Recent advances in spoilage mechanisms and preservation technologies in beef quality: a review [J]. Meat Science, 2024, 213: 109481.
- [5] 李蝶,李海燕,钟士宏,等.微冻对蚕豆籽粒保鲜效果及成熟衰老的影响[J].食品科学,2025,46(1):149-157.
- [6] 唐国冬,田雨,王倩,等.低温处理对葡萄果皮细胞结构的影响[J].食品科学,2017,38(5):191-196.
- [7] 张亚美,池帅,李颖畅,等.生物保鲜剂在水产品保鲜中的应用及研究进展[J].中国食品添加剂,2023,34(11):36-44.
- [8] 张少平,李洲,练冬梅,等.青椒采后贮藏保鲜研究进展[J].食品科学,2023,44(13):328-337.
- [9] 田红炎,饶景萍.二氧化氯处理对机械损伤猕猴桃果实的防腐保鲜效果[J].食品科学,2012,33(18):298-302.
- [10] 李欣,梁子兆,范思仪,等.不同浓度间歇性臭氧处理对猕猴桃贮藏保鲜效果及抗氧化系统的影响[J].食品科学,2024,45(20):239-246.
- [11] 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.
- [12] 李维芳,王春蕾,王妮,等.一氧化氮影响植物不定根发生的研究进展[J].浙江农业学报,2020,32(4):742-752.
- [13] 周春丽,吕玲琴,苏虎,等.一氧化氮对果蔬保鲜机理的探索进展[J].食品研究与开发,2012,33(1):217-222.
- [14] FASIKU V O, OMOLO C A, KIRURI L W, et al. A hyaluronic acid-based nanogel for the co-delivery of Nitric oxide (NO) and a novel Antimicrobial peptide (AMP) against bacterial biofilms [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 206: 381-397.
- [15] JIA Q, JIA Q, ZHU S, et al. A promoting Nitric oxide-releasing coating containing copper ion on ZE21B alloy for potential vascular stent application [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11(12): 4542-4561.
- [16] DAVARI N, NOURMOHAMMADI J, MOHAMMADI J. Nitric oxide-releasing thiolated starch nanoparticles embedded in gelatin sponges for wound dressing applications [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 265: 131062.
- [17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.GB 2762-2017,食品中污染物限量[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [18] YANG X, LIU Y B. Residue analysis of Nitric oxide fumigation in nine stored grain and nut products [J]. Journal of Stored Products Research, 2019, 84: 101521.
- [19] 陈燕.一氧化氮熏蒸对干果贮藏期病害抑制及毒素清除作用的研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2020.
- [20] LIU Y B, YANG X, MASUDA T. Procedures of laboratory fumigation for pest control with Nitric oxide gas [J]. Journal of Visualized Experiments, 2017, 129: 56309.
- [21] YANG X, LIU Y B. Residual analysis of Nitric oxide fumigation on fresh fruit and vegetables [J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 132: 105-108.
- [22] 邓豪,王曼,王霞伟,等.一氧化氮熏蒸延缓杏干贮藏期间品质的下降[J].现代食品科技,2022,38(1):188-196.
- [23] AHMED R, AUGUSTINE R, CHAUDHRY M, et al. Nitric oxide-releasing biomaterials for promoting wound healing in impaired diabetic wounds: state of the art and recent trends [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2022, 149: 112707.
- [24] JAFFREY S R, SNYDER S H. Nitric oxide: a neural messenger [J]. Annual Review of Cell and Developmental Biology, 1995, 11(1): 417-440.
- [25] DA SILVA G, DA SILVA M, NASCIMENTO D, et al. Nitric oxide as a central molecule in hypertension: focus on the vasorelaxant activity of new Nitric oxide donors [J]. Biology, 2021, 10(10): 1041.
- [26] ESTES BRIGHT L M, WU Y, BRISBOIS E J, et al. Advances in Nitric oxide-releasing hydrogels for biomedical applications [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2023, 66: 101704.
- [27] ZHANG Y H, CASADEI B. Sub-cellular targeting of constitutive NOS in health and disease [J]. Journal of Molecular and Cellular Cardiology, 2012, 52(2): 341-350.
- [28] VANDELLE E, LING T, IMANIFARD Z, et al. Nitric oxide signaling during the hypersensitive disease resistance response [J]. Advances in Botanical Research, 2016, 77: 219-243.
- [29] 李竞廷,温朝辉.一氧化氮在肿瘤治疗中的研究进展[J].现代肿瘤医学,2023,31(5):945-950.
- [30] 李青宴,黄艳华,沈磊.cGMP及其介导的信号通路在血小板聚集中的作用的研究进展[J].中国现代应用药学,2021,38(23):3045-3049.
- [31] LIU R, KANG Y, CHEN L. Activation mechanism of human Soluble guanylate cyclase by stimulators and activators [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 5492.
- [32] 张玲玲,吴丹,赵子捷,等.植物一氧化氮信号分子的研究进展[J].植物学报,2017,52(3):337-345.

- [33] ARASIMOWICZ M, FLORYSZAK-WIECZOREK J. Nitric oxide as a bioactive signalling molecule in plant stress responses [J]. Plant Science, 2007, 172(5): 876-887.
- [34] NEILL S J, DESIKAN R, HANCOCK J T. Nitric oxide signalling in plants [J]. New Phytologist, 2003, 159(1): 11-35.
- [35] DOMINGOS P, PRADO A M, WONG A, et al. Nitric oxide: a multitasked signaling gas in plants [J]. Molecular Plant, 2015, 8(4): 506-520.
- [36] DING L N, LI Y T, WU Y Z, et al. Plant disease resistance-related signaling pathways: recent progress and future prospects [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(24): 16200.
- [37] CARR J P, MURPHY A M, TUNGADI T, et al. Plant defense signals: players and pawns in plant-virus-vector interactions [J]. Plant Science, 2019, 279: 87-95.
- [38] SUDHAMSU J, CRANE B R. Bacterial nitric oxide synthases: what are they good for? [J]. Trends in Microbiology, 2009, 17(5): 212-218.
- [39] WAREHAM L K, SOUTHAM H M, POOLE R K. Do Nitric oxide, Carbon monoxide and Hydrogen sulfide really qualify as 'Gasotransmitters' in bacteria? [J]. Biochemical Society Transactions, 2018, 46(5): 1107-1118.
- [40] KAMM A, PRZYCHODZEN P, KUBAN-JANKOWSKA A, et al. Nitric oxide and its derivatives in the cancer battlefield [J]. Nitric Oxide, 2019, 93: 102-114.
- [41] THOMAS D D. Breathing new life into Nitric oxide signaling: A brief overview of the interplay between Oxygen and Nitric oxide [J]. Redox Biology, 2015, 5: 225-233.
- [42] RONG F, TANG Y, WANG T, et al. Nitric oxide-releasing polymeric materials for antimicrobial applications: a review [J]. Antioxidants, 2019, 8(11): 556.
- [43] LIU S, LI G, MA D. Controllable Nitric oxide-delivering platforms for biomedical applications [J]. Advanced Therapeutics, 2022, 5(3): 2100227.
- [44] ANDRABI S M, SHARMA N S, KARAN A, et al. Nitric oxide: physiological functions, delivery, and biomedical applications [J]. Advanced Science, 2023, 10(30): 2303259.
- [45] CHEN Y, GUO Q, WEI J, et al. Inhibitory effect and mechanism of Nitric oxide (NO) fumigation on fungal disease in Xinjiang Saimaiti dried apricots [J]. LWT, 2019, 116: 108507.
- [46] CHEN Y, DENG H, ZHANG J, et al. Effect of Nitric oxide fumigation on microorganisms and quality of dried apricots during storage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(12): 15725.
- [47] LIU Y B. Nitric oxide fumigation for control of western flower thrips and its safety to postharvest quality of fresh fruit and vegetables [J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2016, 19(4): 1191-1195.
- [48] LIU Y B. Nitric oxide as a new fumigant for postharvest pest control on fresh commodities [J]. Acta Horticulturae, 2015(1105): 321-328.
- [49] LIU Y B, OH S, JURICK W M. Response of *Aspergillus flavus* spores to Nitric oxide fumigations in atmospheres with different oxygen concentrations [J]. Journal of Stored Products Research, 2019, 83: 78-83.
- [50] JEN M C, SERRANO M C, VAN LITH R, et al. Polymer-based Nitric Oxide therapies: recent insights for biomedical applications [J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(2): 239-260.
- [51] HRABIE J A, KEEFER L K. Chemistry of the Nitric oxide-releasing Diazeniumdiolate ("Nitrosohydroxylamine") functional group and its oxygen-substituted derivatives [J]. Chemical Reviews, 2002, 102(4): 1135-1154.
- [52] PAUL S, PAN S, MUKHERJEE A, et al. Nitric oxide releasing delivery platforms: design, detection, biomedical applications, and future possibilities [J]. Molecular Pharmaceutics, 2021, 18(9): 3181-3205.
- [53] POH W H, RICE S A. Recent developments in Nitric oxide donors and delivery for antimicrobial and anti-biofilm applications [J]. Molecules, 2022, 27(3): 674.
- [54] MCNAMARA K, TOFALL S A M. Nanoparticles in biomedical applications [J]. Advances in Physics: X, 2017, 2(1): 54-88.
- [55] ARSALAN A, YOUNUS H. Enzymes and nanoparticles: modulation of enzymatic activity via nanoparticles [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 118: 1833-1847.
- [56] HETRICK E M, SHIN J H, PAUL H S, et al. Anti-biofilm efficacy of Nitric oxide-releasing silica nanoparticles [J]. Biomaterials, 2009, 30(14): 2782-2789.
- [57] SHIN J H, METZGER S K, SCHOENFISCH M H. Synthesis of Nitric oxide-releasing silica nanoparticles [J]. Journal of the American Chemical Society, 2007, 129(15): 4612-4619.
- [58] SHIN J H, SCHOENFISCH M H. Inorganic/Organic hybrid silica nanoparticles as a Nitric oxide delivery scaffold [J]. Chemistry of Materials, 2008, 20(1): 239-249.
- [59] CARPENTER A W, JOHNSON J A, SCHOENFISCH M H. Nitric oxide-releasing silica nanoparticles with varied surface hydrophobicity [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 454: 144-151.
- [60] CHANG W L, PENG K J, HU T M, et al. Nitric oxide-releasing *S*-nitrosothiol-modified silica/chitosan core-shell nanoparticles [J]. Polymer, 2015, 57: 70-76.
- [61] SHAHRIAR S, MONDAL J, HASAN M, et al. Electrospinning nanofibers for therapeutics delivery [J]. Nanomaterials, 2019, 9(4): 532.
- [62] JIFFRIN R, RAZAK S I A, JAMALUDIN M I, et al. Electrospun nanofiber composites for drug delivery: a review on current progresses [J]. Polymers, 2022, 14(18): 3725.
- [63] EL-AASSAR M R, IBRAHIM O M, AL-OANZI Z H. Biotechnological applications of polymeric nanofiber platforms loaded with diverse bioactive materials [J]. Polymers, 2021, 13(21): 3734.
- [64] WANG D C, CLARK J R, LEE R, et al. Development of antimicrobial Nitric oxide-releasing fibers [J]. Pharmaceutics, 2021, 13(9): 1445.
- [65] DOUGLASS M, HOPKINS S, PANDEY R, et al. *S*-Nitrosoglutathione-based Nitric oxide-releasing nanofibers exhibit dual antimicrobial and antithrombotic activity for biomedical applications [J]. Macromolecular Bioscience, 2021, 21(1): 2000248.
- [66] GARG A, SHAH K, CHAUHAN C S, et al. Ingenious nanoscale medication delivery system: nanogel [J]. Journal of Drug Delivery

- Science and Technology, 2024, 92: 105289.
- [67] ARNFAST L, MADSEN C G, JORGENSEN L, et al. Design and processing of nanogels as delivery systems for peptides and proteins [J]. Therapeutic Delivery, 2014, 5(6): 691-708.
- [68] KANG E B, LEE G B, IN I, et al. pH-sensitive fluorescent hyaluronic acid nanogels for tumor-targeting and controlled delivery of Doxorubicin and Nitric oxide [J]. European Polymer Journal, 2018, 101: 96-104.
- [69] YIN Y, HU B, YUAN X, et al. Nanogel: a versatile nano-delivery system for biomedical applications [J]. Pharmaceutics, 2020, 12(3): 290.
- [70] HUANG Q, YANG Z, TAO X, et al. Sprayable chitosan nanogel with Nitric oxide to accelerate diabetic wound healing through bacteria inhibition, biofilm eradication and macrophage polarization [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 254: 127806.
- [71] ZHOU X, WANG H, ZHANG J, et al. Functional poly(ϵ -caprolactone)/chitosan dressings with Nitric oxide-releasing property improve wound healing [J]. Acta Biomaterialia, 2017, 54: 128-137.
- [72] XU L C, MEYERHOFF M E, SIEDLECKI C A. Blood coagulation response and bacterial adhesion to biomimetic polyurethane biomaterials prepared with surface texturing and Nitric oxide release [J]. Acta Biomaterialia, 2019, 84: 77-87.
- [73] ZHANG J, ZHANG G, WANG Y, et al. L-Arginine carboxymethyl cellulose hydrogel releasing Nitric oxide to improve wound healing [J]. European Polymer Journal, 2023, 189: 111940.
- [74] GUO W, HAO J, WANG M, et al. Polypyrrole hydrogel with near-infrared light-driven Nitric oxide release and photothermal activities for rapid synergistic sterilization and infected wound therapy [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 677: 132411.
- [75] GREGG S T, YUAN Q, MORRIS R E, et al. Functionalised solids delivering bioactive Nitric oxide gas for therapeutic applications [J]. Materials Today Communications, 2017, 12: 95-105.
- [76] NARIN G, ALBAYRAK Ç B, ÜLKÜ S. Antibacterial and bactericidal activity of Nitric oxide-releasing natural zeolite [J]. Applied Clay Science, 2010, 50(4): 560-568.
- [77] 江湖, 苏虎, 周春丽, 等. 一氧化氮在果蔬保鲜中的应用研究进展 [J]. 食品科技, 2010, 35(1): 63-65, 71.
- [78] 刺槿熙, 臧明伍, 刘贺, 等. 二萜类化合物在肉类食品保鲜防腐中的应用研究进展 [J]. 食品科学, 2024, 45(13): 282-291.
- [79] LEE S H, KIM H Y. Analysis of quality and color properties according to the gas composition (Modified atmosphere packaging) of pork sous-vide ham preserved in natural brine [J]. Food Science of Animal Resources, 2023, 43(4): 580-593.
- [80] SKIBSTED L H. Nitric oxide and quality and safety of muscle based foods [J]. Nitric Oxide, 2011, 24(4): 176-183.
- [81] LIU R, WARNER R D, ZHOU G, et al. Contribution of Nitric oxide and protein S-nitrosylation to variation in fresh meat quality [J]. Meat Science, 2018, 144: 135-148.
- [82] WANG L L, DU R S, LI J, et al. The potential mediation of Nitric oxide in the activation of Mitochondrion-dependent apoptosis and yak meat tenderness during postmortem aging [J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101131.
- [83] LIU R, YANG L, YANG T, et al. Effect of Nitric oxide treatment on pork meat quality, microstructure, and total bacterial count during postmortem aging [J]. Meat Science, 2022, 190: 108806.
- [84] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022[M]. Rome: FAO, 2022.
- [85] 檀茜倩, 裴建博, 崔方超, 等. 水产品中致病与腐败菌的群体感应抑制剂研究进展 [J]. 食品科学, 2023, 44(19): 270-278.
- [86] JIANG H, LI Y, XU J, et al. Effect of exogenous Nitric oxide on *Enterocytozoon hepatopenaei* copy numbers and immunity of *Exopalaemon carinicauda* [J]. Aquaculture Research, 2023, 2023: 1-7.
- [87] WANG Z C, YAN Y, NISAR T, et al. Influence of postmortem treatment with Nitric oxide on the muscle color and color stability of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets [J]. Nitric Oxide, 2018, 76: 122-128.
- [88] WANG Z C, YAN Y, SU P, et al. Treatments of tilapia (*Oreochromis niloticus*) using Nitric oxide for quality improvement: establishing a potential method for large-scale processing of farmed fish [J]. Nitric Oxide, 2018, 77: 19-25.
- [89] 易阳, 张名位. 我国主要热带水果的干燥和贮藏保鲜技术研究进展 [J]. 食品科学, 2010, 31(13): 331-336.
- [90] CORPAS F J, PALMA J M. Nitric oxide on/off in fruit ripening [J]. Plant Biology, 2018, 20(5): 805-807.
- [91] 罗丽真, 邓雨正, 廖伟彪. 一氧化氮在延缓农产品采后衰老中的作用机制 [J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2023, 39(7): 933-943.
- [92] 高名月, 赵政阳, 王燕, 等. 气调贮藏对瑞雪苹果的保鲜效果与果皮褐变机制的初探 [J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(4): 123-129.
- [93] 牛锐敏, 许泽华, 王春良. 一氧化氮对“宁冠”苹果的保鲜效应 [J]. 北方园艺, 2013(21): 147-150.
- [94] 王济瀚, 李富军, 张新华, 等. 苹果冷藏期间果肉褐变机制及控制研究进展 [J]. 果树学报, 2023, 40(3): 566-576.
- [95] 曹晓蒙, 杜国荣, 赵鹏涛, 等. 冷藏保鲜技术对苹果香气的影响 [J]. 中国果菜, 2022, 42(4): 1-9, 33.
- [96] ZHANG Z W, LIU H, LI H, et al. Beneficial effects of Sodium nitroprusside on the aroma, flavors, and anthocyanin accumulation in blood orange fruits [J]. Foods, 2022, 11(15): 2218.
- [97] ZHENG X, HU B, SONG L, et al. Changes in quality and defense resistance of kiwifruit in response to Nitric oxide treatment during storage at room temperature [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 222: 187-192.
- [98] WANG B, JIANG H, BI Y, et al. Preharvest multiple sprays with Sodium nitroprusside promote wound healing of harvested muskmelons by activation of phenylpropanoid metabolism [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 158: 110988.
- [99] WANG B, LI Z, HAN Z, et al. Effects of Nitric oxide treatment on lignin biosynthesis and texture properties at wound sites of muskmelons [J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130193.
- [100] 郑秋丽, 王清, 高丽朴, 等. 蔬菜保鲜包装技术的研究进展 [J]. 食品科学, 2018, 39(3): 317-323.

- [101] ISLAM M, DURIE I, RAMADAN R, et al. Exploitation of Nitric oxide donors to control bacterial adhesion on ready-to-eat vegetables and dispersal of pathogenic biofilm from polypropylene [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(7): 3078-3086.
- [102] WANG X, YANG Z, CUI J, et al. Nitric oxide made a major contribution to the improvement of quality in button mushrooms (*Agaricus bisporus*) by the combined treatment of Nitric oxide with 1-MCP [J]. Foods, 2022, 11(19): 3147.
- [103] DAI Y, XIE H, ZHAO X, et al. The effect of sodium nitroprusside treatment on storage ability of fresh-cut potato [J]. Foods, 2023, 12(1): 221.
- [104] COSER W, STEFFENS C A, LUGARESI A, et al. Treatment of 'Baigent' apple fruit with Nitric oxide in controlled atmosphere storage reduces decay and physiological disorders [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 196: 112159.
- [105] GENG B, HUANG D, ZHU S. Regulation of Hydrogen sulfide metabolism by Nitric oxide inhibitors and the quality of peaches during cold storage [J]. Antioxidants, 2019, 8(9): 401.
- [106] GHEYSARBIGI S, MIRDEHGHAN S H, GHASEMNEZHAD M, et al. The inhibitory effect of Nitric oxide on enzymatic browning reactions of in-package fresh pistachios (*Pistacia vera* L.) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 159: 110998.
- [107] WANG Y, LUO Z, KHAN Z U, et al. Effect of Nitric oxide on energy metabolism in postharvest banana fruit in response to chilling stress [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 108: 21-27.
- [108] HAN L, WANG Z, WATKINS C B, et al. The regulatory mechanisms of delayed senescence of Nitric oxide treatment of hyacinth beans [J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 207: 112592.