



纳米种子处理技术: 提高作物气候韧性的有效途径

康 召, 赵丽娟

Nano-enabled seed treatment technology: an efficient strategy to enhance climate resilience of crops

KANG Zhao and ZHAO Lijuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20230641>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同类型水稻品种产量形成对微纳米气泡响应的差异

Effect of micro-nano bubbles on the yield of different rice types

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(11): 1893-1901

全球重要农业文化遗产的粮食与生计安全评估框架

Assessment framework of food and livelihood security in Globally Important Agricultural Heritage Systems

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(9): 1330-1338

纳米零价铁(nZVI)对蚯蚓-微生物-土壤生态系统的毒性效应研究

Effects of nano-zero-valent iron (nZVI) on earthworm-bacteria-soil systems

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(10): 1722-1732

气候变化对四川盆地主要粮食作物生产潜力的影响

Impact of climate change on potential productivities of main grain crops in the Sichuan Basin

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(11): 1661-1672

气候变化对安徽省两熟制粮食作物物候期及周年气候资源分配与利用的影响

Effects of climate change on phenophases and annual climate resources distribution and utilization of major food crops under a double-cropping system in Anhui Province

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(2): 355-365

粮食安全视角下的环京津地区耕地生态补偿量化研究

Quantitative study on cultivated land ecological compensation in the area around Beijing and Tianjin from the perspective of grain security

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(7): 1052-1059



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20230641

康召, 赵丽娟. 纳米种子处理技术: 提高作物气候韧性的有效途径[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(5): 745-754
KANG Z, ZHAO L J. Nano-enabled seed treatment technology: an efficient strategy to enhance climate resilience of crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(5): 745-754

纳米种子处理技术: 提高作物气候韧性的有效途径*

康 召, 赵丽娟**

(南京大学环境学院污染控制与资源化重点实验室 南京 210023)

摘要: 气候变化背景下, 极端天气频发, 作物将越来越多地暴露在高温、干旱和洪涝等非生物逆境条件下。同时, 气候变化导致作物遭受病虫害等生物胁迫的频率和强度增加。非生物和生物胁迫的共同作用下, 粮食减产严重, 威胁全球粮食安全。提高作物自身的气候韧性是减少产量损失的关键。种子处理是提高种子质量(抗逆性、产量、品质)的有效途径。纳米材料具有小尺寸效应, 且具有独特的物理化学、光电特性和催化活性。越来越多的证据表明, 纳米种子处理技术在提高作物抗逆性和抗病性方面展现出巨大潜力。本文针对纳米种子处理技术的研究进展、分子机理和市场现状进行了综述, 发现纳米种子处理通过参与或调控萌发初期的代谢和转录过程, 既能促进种子萌发、提高种子活力, 还能增强作物逆境韧性。同时, 纳米种子处理技术具有操作简单、成本低和环境友好的特点, 在减少农业化学品使用、促进可持续农业发展方面极具潜力, 是提高作物气候韧性的有效途径。纳米种子处理技术极有可能是种子处理行业新的赛道, 提早布局将会提高我国种子处理企业的国际竞争力。本文旨在探讨新的种子处理技术, 以期为提高作物气候韧性、保障我国粮食安全提供新的技术路径, 同时也为提高我国种子处理行业竞争力提供新的视角和策略。

关键词: 纳米技术; 气候韧性; 纳米种子处理; 粮食安全

中图分类号: S351.1; TB383.1

Nano-enabled seed treatment technology: an efficient strategy to enhance climate resilience of crops*

KANG Zhao, ZHAO Lijuan**

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Climate change has increased the frequency and intensity of extreme weather events. Therefore, crops are increasingly exposed to a variety of abiotic stresses, such as heat, cold, drought, and floods. In addition, climate change has led to an increase in the frequency and intensity of biotic stresses, such as pathogens and pests, in crops. Under the combined action of abiotic and biotic stresses, a reduction in grain yield is a serious threat to global food security. Improving the climatic resilience of crops is critical for reducing yield losses. Seed treatment is an effective way to improve seed quality (e.g., by increasing stress resistance, yield, and nutritional quality of crops). Nanomaterials with unique physicochemical, electrical, and catalytic properties are used as seed-treatment agents. In recent decades, nano-enabled seed treatment approaches have shown great potential for improving abiotic stress tolerance and disease resistance in crops. In this review, the research progress, molecular mechanisms, and current market status of nano-enabled seed treatments are discussed. Nano-enabled seed treatment was found to not only improve the germination rate and accelerate germination speed, but also enhance resilience to abiotic and biotic stresses. When nanomaterials interact with seeds, their small size

* 中央高校基本科研业务费专项资金(0211-14380206)资助

** 通信作者: 赵丽娟, 主要研究方向为纳米技术的环境影响与农业应用。E-mail: Ljzhao@nju.edu.cn

康召, 主要研究方向为纳米种子处理提高水稻的抗逆、抗病。E-mail: 502022250015@smail.nju.edu.cn

收稿日期: 2023-11-02 接受日期: 2024-01-11

* This study was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (0211-14380206).

** Corresponding author, E-mail: Ljzhao@nju.edu.cn

Received Nov. 2, 2023; accepted Jan. 11, 2024

enables them to cross biological barriers and enter the seeds quickly, and the catalytic properties allow them to participate in and regulate cellular metabolic processes. Meanwhile, nano-enabled seed treatment is a simple, low cost, and environmentally friendly new technology, which has great potential to reduce the use of agricultural chemicals and promote sustainable agriculture. In addition, this is an effective method of improving the climate resilience of crops. Nano-enabled seed treatment technology is likely to be a new strategy in the seed treatment industry. This early layout will improve the international competitiveness of seed treatment enterprises in our country. Taken together, this review aims to provide farmers, policymakers, and other researchers with a comprehensive perspective on the current nano-enabled seed treatment research and technology, as well as a new perspective and strategy for improving the competitiveness of China's seed treatment industry.

Keywords: Nanotechnology; Climate resilience; Nano-enabled seed treatment; Food security

仓廩实,天下安。我国历来高度重视粮食安全问题,将其视为关系到国家安全和社会稳定的重要因素。然而,农业是“靠天吃饭”的产业,农业对气候高度敏感。近年来,全球气候系统的不稳定性正在加剧,极端天气发生的频率和强度均不断增加。2022年,热浪袭击了全球包括中国、印度、欧洲、非洲、美洲等多个国家和地区。2023年夏天,热浪再次来袭,全球6月和7月气温均破历史最高记录^[1]。气候变化下,作物遭受高温、低温、干旱、洪涝等非生物逆境的频率大大增加,造成产量损失,严重威胁粮食安全^[2]。以干旱为例,从1983年到2009年,全球约3/4的作物收获面积(4.4亿hm²)遭受干旱灾害,累计损失约1660亿美元^[3]。气候变化背景下,作物遭受病虫害的频率亦随之增加。据预测,气候变化将推动病原体的进化和传播,并通过影响病原体与作物之间的互作,使得作物发生病虫害的危险增加,进一步威胁粮食安全^[4]。

提高作物自身内在的抗逆性和抗病性,即提高作物的气候韧性(climate resilience),是减少产量损失的关键。种子是作物生命周期的起点,发芽期是作物整个生命周期中最为关键的一个阶段。极端温度、干旱等非生物逆境下,种子萌发受到抑制,而减慢的发芽速度使得种子在土壤中与各种病原菌接触的时间延长,增加感染病害的风险。因此,气候变化背景下亟需寻求能够在逆境下提高种子发芽速度、提高种子活力和出苗整齐度的技术^[5]。种子处理(seed treatment)被广泛定义为“任何能提高种子质量的处理方法”^[6]。然而,当前广泛使用的种子处理产品大多以农药为主,具有持久性毒性,对生态环境和非靶向生物造成严重威胁。同时,基于农药的种子处理产品不能提高作物自身的抗逆性和抗病性。因此,当前亟需革命性的新种子处理技术的出现,以一种可持续的方式提高作物的逆境韧性,减少气候变化导致的产量损失。

近年来,纳米技术(nanotechnology)的迅速发展

使得具有小尺寸、独特物理化学光电特性和催化活性的纳米材料(nanomaterials)在解决农业可持续性方面展现出巨大潜力^[7-8]。越来越多的证据表明,用纳米材料进行种子处理,即基于纳米的种子处理技术(nano-enabled seed treatment),在加速种子萌发和出苗、提高种子和幼苗的抗逆性和抗病性等方面均有良好表现。同时,纳米种子处理技术具有操作简单、成本低和环境友好的特点,是极富潜力的提高作物气候韧性的新技术。本文简要介绍了种子处理的发展历史和现状,重点讨论了纳米种子处理技术在提高作物逆境韧性的表现以及纳米种子处理技术提高作物逆境韧性的内在机理,系统分析了纳米种子处理技术相较于当前基于农药的种子处理技术的优势。本文旨在探讨新的种子处理技术,以期为提高作物气候韧性、保障我国粮食安全提供新的技术路径,同时也为提高我国在种子处理行业的竞争力提供新的视角和策略。

1 种子处理的历史及现状

种子处理被广泛定义为“任何能提高种子质量的处理方法”^[6]。本文将现有的种子处理技术分为两种类型。一种是基于引发的种子处理(priming-based seed treatment),旨在提高种子发芽速度、活力及抗逆性;另一种是基于农药的种子处理(pesticide-based seed treatment),指利用成膜剂或黏合剂包裹农药、化肥等活性成分形成种衣剂,以防病为目的。

基于引发的种子处理,本质上是通过在种子萌发过程中诱导代谢和转录的重编程,促进种子萌发和抗逆^[9]。基于引发的种子处理历史(图1)可追溯至几千年前^[10-11]。古希腊植物学之父Theophrastus(公元前372年—公元前287年)发现播种前将黄瓜(*Cucumis sativus*)种子浸泡在水中能够提高种子萌发速度^[10]。罗马博物学家编纂的百科全书中提到,将黄瓜种子浸泡在粪水中能提高发芽率^[12]。在中国,种子处理的历史可以追溯至汉朝(公元前202年—公元

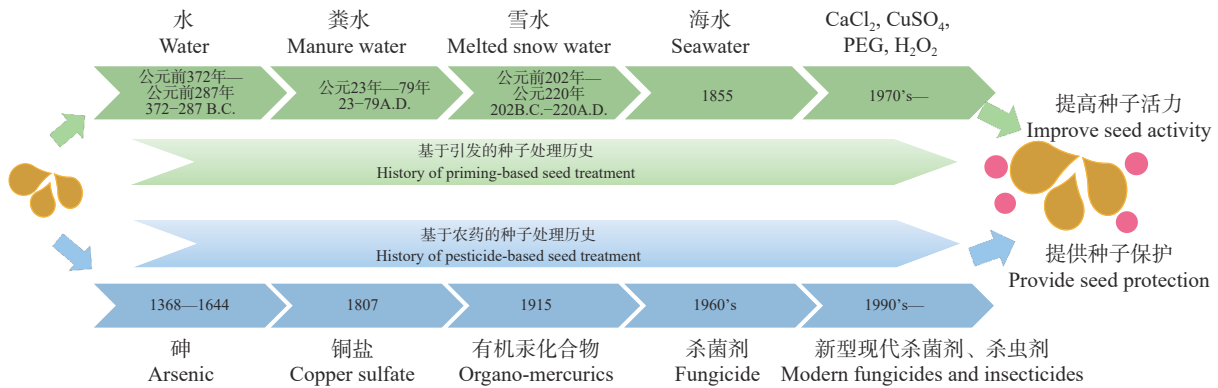


图1 种子处理历史示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the history of seed treatment

220年)。据中国最早农学书籍《汜胜之书》记载,将种子预先浸泡在雪水中可提高作物产量和抗旱性^[13]。我国另一部传统农学书籍《齐民要术》中记载,水稻(*Oryza sativa*)种子经雨水处理可以提高种子发芽速度^[14]。还有文献发现,在唐朝(公元618年—907年),农民将水稻种子浸泡在煮熟的骨头和粪便中,可以保护种子和幼苗免受多种害虫和病原体的侵害^[15]。随后,法国农学家发现用水浸泡谷物种子可有效提高作物性能^[11]。1855年,英国生物学家发现,将生菜(*Lactuca sativa*)和芹菜(*Apium graveolens*)种子浸泡在海水中能提高种子发芽率^[16]。近几百年来,随着现代化学的发展,其他化合物如CaCl₂、水杨酸(SA)、赤霉素酸(GA)、乙烯、硒、硫酸铜、聚乙二醇(PEG)、过氧化氢(H₂O₂)和生物制剂等相继被发现能够提高种子质量和活力^[17]。1973年,Heydecker创造了“种子引发(seed priming)”一词,并将高分子量聚乙二醇(PEG)应用于种子处理^[18]。从那时起,种子引发被农业种子公司作为一种提高种子活力的工具。种子引发不但可以实现种子快速发芽和均匀出苗,还能促进作物生长和提高产量。此外,相比有利的发芽条件,在不利的条件下,种子引发对植物生长的促进效果更佳^[19]。

基于农药的种子处理历史(图1)相对较短,约有几百年^[20]。早在明朝(公元1368—1644年),我国的《农政全书》记载了用砷处理小麦(*Triticum aestivum*)种子可提高其抗病性^[21]。17世纪中期,英国农民使用盐水来控制小麦腥黑穗病^[22]。1807年,硫酸铜被用来控制黑穗病。20世纪20年代,有机汞化合物开始被用作拌种剂,以控制种传病害^[23]。从20世纪60年代起,内吸性杀菌剂(如噻苯唑、萎锈灵等)被研制出来防治种传病害^[24]。20世纪70年代,用于控制空气传播疾病的内吸性杀菌剂(如三唑醇、乙

嘧啶)诞生^[25]。20世纪90年代,新型现代杀菌剂和杀虫剂的引入,为种子处理技术的发展提供了更广泛的机会。然而,基于农药的种子处理功能主要是防病,在提高作物自身抗逆方面表现甚微^[26-27]。

值得注意的是,在当前的种子处理市场,基于农药的种子处理产品占主导地位,但是在种子表面涂有杀菌剂或杀虫剂形成种衣剂会对土壤和非靶向生物造成严重的不利影响^[26]。新烟碱(neonicotinoids)类药物被广泛用作种子处理杀虫剂,其活性化合物在整个植物组织中系统表达,可以存在于授粉昆虫摄入的花蜜和花粉^[28]。近年来,新烟碱类种子处理杀虫剂对蜜蜂等传粉媒介的致死性影响和非致死性影响引起了广泛关注,促使欧盟成员国全面禁止使用新烟碱类药物^[29]。除此之外,种子内生菌作为建立植物内生菌群的基础,能为宿主植物的生长发育和植物保护提供许多益处,但在种子表面涂覆杀菌剂会对其构成威胁^[30]。传统的基于农药的种子处理剂多是有机农药,具有持久性毒性^[31]。此外,许多种子包衣产品的关键成分是黏合剂,通常是聚合物,而大多数聚合物含有微塑料。在播种过程中,这种包衣产品会导致微塑料和粉尘向环境释放,对非靶向生物构成威胁,造成环境污染和生态风险^[32]。

基于农药的种子处理仅仅为种子提供保护以预防病虫害,并没有增强种子内在质量,实现种子和幼苗对高温、干旱和病原体的耐受性^[31]。同时,尽管基于引发的种子处理在提高种子活力和作物逆境韧性方面具有优势,然而大多停留在实验室研究阶段,并没有大规模商业化应用。在气候变化的情况下,农作物遭受生物(如病原体)和非生物胁迫(如极端温度、干旱、洪涝)的频率和程度大大增加。总的来说,种子处理技术和产品需要革命性的创新来应对气候变化。因此,亟需环境友好和低成本种子处

理技术来提高作物抗逆性和抗病性,以应对气候变化进而减少产量损失。

2 极富潜力的纳米种子处理技术

如前文所述,目前商业化的种子处理剂在提高种子活力和预防病虫害方面是两条不相交的平行线,亟需可以同时满足两种需求的处理方式,基于纳米材料的种子引发技术就是其一。“纳米材料”(NPs)是指一维小于 100 nm 的材料^[33]，“纳米颗粒”是指至少有 2 个维度小于 100 nm 的纳米材料。一方面,纳米材料的小尺寸使其能够相对容易地穿透生物屏障,进入到种子内部。另一方面,纳米材料具有优异的物理化学性质、光电特性和类酶的催化活性^[34-35],使其在与植物细胞相互作用的过程中可调控基因的表达和蛋白活性,从而调控植物细胞内诸多代谢过程。近 5 年的文献资料显示,纳米种子处理既能促进种子萌发、提高种子活力,还能增强作物对非生物和生物逆境的抗性。

2.1 纳米种子处理促进种子萌发

较慢的种子发芽过程经常使植物暴露于不利环境和土传病害中,实现快速发芽对农业产出至关重要^[36]。有证据表明,纳米种子处理可以促进种子发芽,提高幼苗活力。例如,Guha 等^[37]研究发现,纳米零价铁 (nZVI, 20 mg·L⁻¹) 种子处理诱导活性氧 (ROS) 水平升高,从而提高水稻种子活力和发芽率。同样的,Prerna 等^[38]研究发现,纳米微量营养元素铁 (α -Fe₂O₃, 25 mg·L⁻¹, 15~20 nm) 能引发水稻种子 ROS 含量增加,促进种子萌发。此外,将纳米材料应用于其他作物种子,如氧化锌纳米颗粒 (ZnO NPs, 10 mg·L⁻¹, 40 nm) 处理菜豆 (*Phaseolus vulgaris*)^[39],多壁碳纳米管 (MWCNTs, 70~90 mg·L⁻¹, 13~14 nm) 处理小麦^[40],铁纳米粒子 (Fe-NPs, 20~160 mg·L⁻¹, 19~30 nm) 处理西瓜 (*Citrullus lanatus*)^[41],氧化锌纳米颗粒 (ZnO NPs, 750~1250 mg·L⁻¹, 35~40 nm) 处理辣椒 (*Capsicum annum*)^[42],均明显提高了种子发芽率和幼苗活力。

2.2 纳米种子处理提高种子对非生物逆境抗性

逐渐恶劣的环境条件,如盐、干旱、高温、低温和重金属胁迫等,会降低种子发芽率和幼苗活力,极大地影响种子发育和作物产量^[5]。因此,寻求有效的方法提高作物对非生物逆境的耐性至关重要。经纳米种子处理后,种子和幼苗会增强抗氧化系统维持 ROS 稳态以保护种子免受氧化损伤,并增强防御通路实现作物对不利条件的适应能力。

在阻碍作物正常生长发育的逆境条件中,盐胁迫是世界范围内最主要的非生物逆境之一^[43]。Khan 等^[44]研究发现,经纳米二氧化铈 [PNC, 0.1 mg·L⁻¹, (8.5±0.2 nm)] 处理后,油菜 (*Brassica napus*) 种子的抗氧化酶活性增强、ROS 水平降低,并通过维持 ROS 稳态和 Na/K 比提高其耐盐性。Ye 等^[45]研究发现,锰纳米颗粒 (Mn NPs, 0.1~1.0 mg·L⁻¹, 50 nm) 引发促进了辣椒种子根系伸长,改变了锰、钠和钙等营养元素的分配,提高了其耐盐性。与此类似,Wang 等^[46]研究发现,ZnO NPs (50 mg·L⁻¹, <50 nm) 引发激活了小麦种子的抗氧化系统,增加了盐胁迫下叶片的光合电子传递速率,并提高了其耐盐性。

干旱也是农作物生产中的主要胁迫源,正影响着全球超过 1/3 的农田,严重阻碍了作物生长并降低作物生产力^[47]。大量研究表明,不同纳米颗粒的纳米处理提高了小麦的抗旱性。Rai-Kalal 等^[48]研究发现,经过二氧化硅纳米颗粒 (SiO₂ NPs, 15 mg·L⁻¹, 20~30 nm) 引发的小麦种子抗氧化酶含量增加,并通过维持光合参数和生化平衡提高了其对干旱胁迫的耐受性。此外,Rai-Kalal 等^[49]还发现,经过 ZnO NPs (10 mg·L⁻¹) 引发的小麦通过减少 ROS 的产生增强了其抗旱能力。Noor 等^[50]研究发现,生物合成 Fe₂O₃-NPs (0.6~1.2 mg·L⁻¹) 可以提高干旱胁迫下小麦种子的发芽率。纳米引发增强水稻抗旱性的能力也得到证实。例如,Waqas Mazhar 等^[51]研究发现,干旱胁迫下,水稻种子经 ZnO NPs (25 mg·L⁻¹, 20~30 nm) 引发后,增加了作物产量。

此外,金属毒性也是阻碍植物生长的非生物胁迫之一。在锰胁迫下,对向日葵 (*Helianthus annuus*) 种子进行纳米硫磺颗粒 (SNPs, 0.0125~0.2 mg·L⁻¹, 23 nm) 引发,降低了其 ROS 含量和氧化损伤程度,并提高了过氧化氢酶 (CAT) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性^[52]。镉 (Cd) 胁迫下,二氧化钛纳米颗粒 (TiO₂-NPs, 0~160 mg·L⁻¹, <100 nm) 种子处理上调了芫荽 (*Coriandrum sativum*) 幼苗中的抗氧化酶活性,降低了 ROS 和 MDA 含量,从而缓解 Cd 胁迫并改善了作物生长情况^[53]。

如前文所述,纳米种子处理能有效提高作物对非生物逆境的抗性。然而,大多数研究集中在盐和干旱胁迫,少数研究提及极端温度的耐受性。在俄罗斯、乌克兰和加拿大等国家的小麦生产地区,无霜期的延长导致了生长季节的延长。农户倾向于提前播种来避免谷物灌浆期间的干旱和高温胁迫,但提前播种会使种子暴露于低温和霜冻环境中。因此,

探索纳米种子处理技术来提高小麦种子和幼苗的耐寒性十分必要。

2.3 纳米种子处理提高作物的抗病性

全球变暖导致土壤中潜在植物病原体的相对丰度增加^[54]。病原体感染往往会导致作物产量降低、开花提前和代谢产物积累等生理变化。有学者发现, 纳米种子处理不仅可以实现直接杀菌, 还可通过调控防御基因来提高作物对病原体的抵抗能力。Siddaiah 等^[55]研究发现, 壳聚糖纳米颗粒 (CNP, 250 mg·L⁻¹) 种子处理增强了珍珠粟 (*Pennisetum glaucum*) 的先天免疫系统, 提高了苯丙氨酸解氨酶、过氧化物酶和多酚氧化酶基因的表达, 以及病程相关蛋白 PR1 和 PR5 的更快、更高地表达, 进而实现了对霜霉病的有效控制。Khan 等^[56]研究发现, SiO₂ NPs (100~200 mg·L⁻¹, 5~15 nm) 作为种子引发剂, 可激活甜菜 (*Beta vulgaris*) 种子的抗氧化防御系统, 有效控制甜菜根病害。Shang 等^[57]研究发现, 水稻种子经硫化铜纳米颗粒 (CuS NPs, 50 mg·L⁻¹) 处理后, 提高了地上部水杨酸 (SA) 和茉莉酸 (JA) 的含量, 可实现对藤仓赤霉菌 (*Gibberella fujikuroi*) 的有效控制。稻瘟病是重要的水稻疾病。Yan 等^[58]最近的研究发现, Ag NPs (40 mg·L⁻¹, 20~37 nm) 种子引发增强了水

稻对稻瘟病菌 (*Magnaporthe oryzae*) 的抵抗力, 与水引发种子相比, 水稻幼苗病斑面积显著减小 59%。

值得一提的是, 一些纳米材料本身就是优异的杀菌剂, 如 Ag NPs 具有广谱抗菌特性, 可以直接消灭种子表面的病原体^[59-60]。最新研究表明, SiO₂ NPs 也是一种绿色高效纳米杀菌剂, 可有效防治马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 晚疫病^[61]。因此, 一些纳米材料能同时充当纳米免疫刺激剂、纳米调节剂、纳米农药的多重功能。

综上所述及表 1 所示, 纳米种子处理是一种极具前景的种子处理技术, 既能够提高农业生态系统的气候韧性, 又可通过减少农业化学品的使用, 促进可持续农业发展和环境保护。

3 纳米种子处理的机理

纳米种子处理虽操作简单, 但内在机理极其复杂。深入了解纳米种子处理背后的分子机制是推动这一创新技术持续应用的基础。种子萌发首先发生吸胀作用, 种子吸水后, 使得种皮膨胀。在此过程中, 纳米颗粒的尺寸很小, 能够相对容易地穿透种皮进入种子内部。进入种子内部的纳米颗粒, 由于其本身的催化活性, 会在细胞内发生各种表面化学反应,

表 1 纳米种子处理在作物生理和植物保护方面的积极影响
Table 1 Positive effect of nano-enabled seed treatment on crop physiology and plant protection

纳米材料 Nano material	作物种类 Plant type	浓度 Concentration (mg·L ⁻¹)	引发时间 Trigger time (h)	效应 Effect	参考文献 Reference
纳米银 Ag NPs	玉米 <i>Zea mays</i>	40	24	提高玉米对多种非生物胁迫的耐受性 Enhance maize tolerance to multiple abiotic stresses	[62]
纳米银 Ag NPs	白菜 <i>Brassica campestris</i>	20, 40, 80	15	提高发芽速度和产量, 增强营养品质 Improve germination speed and crop yield, and enhance nutritional quality	[63]
纳米氧化锌 ZnO NPs	羽扇豆 <i>Lupinus termis</i>	20, 40, 60	12	改变总酚含量, 提高抗氧化酶活性和盐胁迫抵抗能力 Change total phenols, and improve antioxidant enzyme activity, and salt stress resistance	[64]
纳米氧化锌 ZnO NPs	小麦 <i>Triticum aestivum</i>	5, 10, 15, 20	6, 12, 18, 24	提高发芽速度和光合性能 Increase germination rate and photosynthetic performance	[65]
纳米二氧化钛 TiO ₂ NPs	玉米 <i>Z. mays</i>	40, 60, 80	24	提高种子活力、抗氧化酶活性和盐胁迫抵抗能力 Improve seed vigor, antioxidant enzyme activity and salt stress resistance	[66]
纳米二氧化硅 SiO ₂ NPs	菜豆 <i>Phaseolus vulgaris</i>	100, 200, 300	4	促进种子萌发和幼苗生长, 提高盐胁迫抵抗能力 Promote seed germination and seedling growth, and improve salt stress resistance	[67]
硅纳米颗粒 Si NPs	小麦 <i>T. aestivum</i>	300, 600, 900	20	调节抗氧化酶和渗透调节物质的积累以缓解干旱胁迫 Regulate the accumulation of antioxidant enzymes and osmotic adjustment substances to alleviate drought stress	[68]
氧化锰纳米颗粒 MnO NPs	西瓜 <i>Citrullus lanatus</i>	10, 20, 40, 80	14	改变幼苗中叶绿素含量和抗氧化活性, 提高作物生产力 Change chlorophyll content and antioxidant activity in seedlings and improve crop productivity	[69]
纳米氧化镧 La ₂ O ₃ NMs	黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	20, 50, 100, 200	4	提高黄瓜产量, 有效防治黄瓜枯萎病 Increase cucumber yield and suppress cucumber wilt	[70]
硒纳米颗粒 Se NPs	番茄 <i>Solanum lycopersicum</i>	100	4	触发潜在防御机制, 增强对番茄晚疫病的抗性 Trigger potential defense mechanisms, and enhance resistance to tomato late blight disease	[71]

NPs: nano-particles.

例如,生成或淬灭 ROS,或调控通道蛋白、转运蛋白,与受体发生配位反应,激活信号通路,进而参与或调控萌发初期的代谢和转录过程^[72]。阐明纳米种子处理的内在机制,尚需回答以下科学问题:纳米颗粒如何进入种子?纳米材料在细胞内部的界面反应,纳米颗粒诱导种子内部的分子变化是什么?分子变化与性状(如更快发芽、抗逆性提高、产量增加)之间的联系是什么?

Kasote 等^[41]使用透射电子显微镜(TEM)观察到 Fe-NPs (19~30 nm)在引发过程中吸附在西瓜(*Citrus lanatus*)种皮上,并缓慢移至种子胚乳。Naseer 等^[73]通过 TEM 和 X 射线能谱(EDX)证实了引发后种子内部存在 Fe-NPs (5~15 mg·L⁻¹, 10~80 nm)。Yan 等^[58]的研究也证实,Ag NPs (40 mg·L⁻¹, 15~30 nm)在浸种过程中可进入水稻种子内部,且主要富集在水稻胚中,其次是胚乳。这些结果表明,纳米颗粒可以穿透种皮进入种子内部,但纳米颗粒从种子表面向种子内部运输的机制还需要进一步研究。

纳米种子处理过程中,纳米颗粒可能通过触发 ROS 爆发来激活防御反应。ROS 在种子休眠和萌发过程中起重要作用。Guha 等^[37]对 ROS 的调控机制进行了初步探讨,发现 20 mg·L⁻¹纳米级零价铁(nZVI)引发能够调控胞内 ROS 水平并重新编程代谢活动,促进种子萌发和幼苗生长。Sharma 等^[74]发现 ZnO NPs (20 mg·L⁻¹, 40 nm)引发能显著提高水稻种子的抗氧化酶(如 SOD、CAT、APX)活性。Kasote 等^[41]研究发现,Fe-NPs 引发可以调节西瓜幼苗的抗氧化能力和相关防御激素。这些结果表明,纳米种子处理可以调节 ROS 稳态,随后刺激抗氧化防御系统(如抗氧化酶和抗氧化剂)。目前,很少有研究从分子水平探讨纳米种子处理增强作物抗逆的机制。An 等^[75]利用转录组学研究了 CeO₂ NPs (500 mg·L⁻¹, 1.8±0.3 nm)引发增强植物耐盐胁迫能力的分子机制。他们发现,与非纳米引发对照相比,纳米引发处理中差异表达的基因与盐胁迫下 ROS 通路和离子稳态有

关。他们推测 ROS 和 Ca²⁺信号通路可能在抗逆性中起关键作用。

已有研究表明,在纳米种子处理提高作物抗病性的机理方面,NMs 可通过激发作物的免疫反应,诱导代谢和转录重编程,从而增强对病原体的抵抗能力。Cao 等^[76]研究发现,硫纳米颗粒(SNP, 30~100 mg·L⁻¹, 30 nm)种子处理可提高对番茄枯萎病的抗性。此外,CuS NPs (50 mg·L⁻¹)引发可有效控制水稻恶苗病的发生^[57]。CuS NPs 通过调控水杨酸(SA)和茉莉酸(JA)等物质的含量来增强水稻对恶苗病菌(*Gibberella fujikuroi*)感染的防御机制。以上研究结果表明,纳米材料很可能通过触发信号分子和植物激素的上调,激活防御和免疫系统,从而提高植物的抗病能力。

目前研究大多停留在发现纳米种子处理提高作物抗逆和抗病能力的表型,研究其潜在机理的文章很少。引发阶段代谢和转录的重编程,使种子为随后的非生物和生物逆境做“准备”,以提高其在逆境中的存活能力^[77]。因此,了解生理、代谢、转录和蛋白质水平上的分子变化是阐明其潜在机制的基础(图 2)。上述文献对机理的探讨,主要通过“纳米种子处理”前后代谢组和转录组的变化来研究。但“纳米种子处理”为什么会产生信号分子,这些过程是如何调控的?以及纳米材料与细胞界面是如何相互作用的?这些问题均有待于进一步研究。基于上述文献,本研究做出以下猜测:“纳米种子处理”是以纳米颗粒为刺激剂触发种子产生“胁迫记忆”或“免疫记忆”^[58],赋予种子和幼苗更强的抗逆和抗病能力。然而这种记忆的持续时长和规律,以及是否能够跨代传递均有待于进一步研究。

4 当前全球种子处理市场现状及纳米种子处理的未来

在过去的 20~25 年里,多种因素推动了种子处理市场的快速发展。随着相对昂贵的杂交种子和转基因

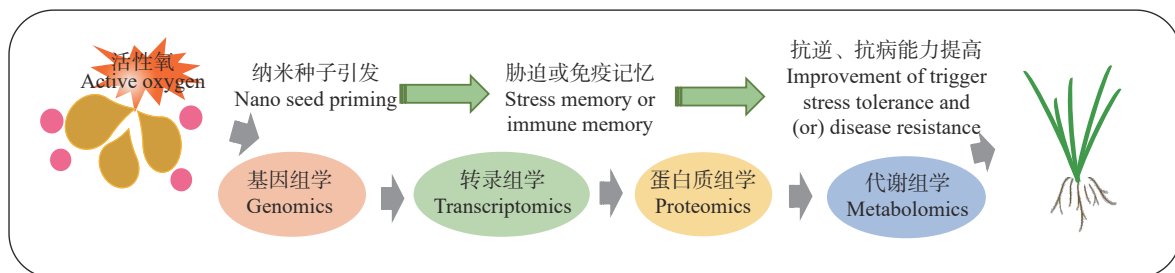


图 2 纳米种子处理提高对非生物胁迫和病原体耐受性的机制

Fig. 2 Mechanisms for nano-enabled seed treatment to increase the tolerance to abiotic stresses and pathogens

因种子采用率的不断提高, 种子公司和农民越来越多地投资于种子处理产品, 以保护和储存优质种子。政府出台的一些政策法规也推动着种子处理市场的发展。此外, 预处理种子的“种后即忘”特性也是一个令人信服的推动因素^[78]。在多种因素的共同作用下, 全球种子处理市场的价值不断提升, 据 Markets and Markets (M&M) 预测, 全球种子处理市场规模将从2022年的61亿美元增长到2027年的92亿美元, 预测期内的年复合成长率高达8.3%。当前, 国际种子处理市场长期被大的跨国公司所垄断, 如 Syngenta International AG、Bayer Crop Science AG、BASF SE 等。然而, 这些公司所生产的产品主要活性成分仍然是化学品(详情见网站资源附件: <http://www.ecoagri.ac.cn/cn/article/doi/10.12357/cjea.20230641>)。

北美是全球最大的种子处理市场, 其次分别是南美、欧洲和亚太地区。据 Mordor Intelligence 的报告数据, 北美的化学种子处理市场在2016年达19亿美元, 其中美国占据了91%的市场份额^[79]。在美国, 几乎100%的玉米(*Zea mays*)和花生(*Arachis hypogaea*)都经过了种子处理, 其次是棉花(*Gossypium hirsutum*)、马铃薯、小麦和大豆(*Glycine max*)^[80]。全国问卷调查数据显示, 法国93%的大田作物都经过了种子处理。由此可见, 欧美等发达国家或地区极为重视种子处理。与欧洲、美国等发达国家或地区相比, 我国的种子处理行业起步较晚, 产品、技术和配套服务相对滞后, 农民种子处理意识不强。种子处理产品质量评价标准的落后及不完善使得产品质量参差不齐, 严重影响了种子处理行业的健康发展。一些发达国家制定了专门的法规来规范种子处理的商业化和销售。然而, 在大多数发展中国家, 种子处理产品被视为常规农用化学品。例如, 在我国, 玉米、棉花等杂交种子主要由种子企业包膜, 其他种子则基本由农民或渠道零售商包膜, 其较低的经营效率制约了行业的快速发展。与此同时, 我国注册的种子处理化学活性成分大多都是通用的, 缺乏独立创新。

如前文所述, 种子引发已被证明是增强植物抗逆性的有效方法。但长期以来, 种子引发被作为一种基础研究而非应用研究^[81]。尽管大量研究提供了种子引发对各类作物积极影响的证据, 但在商业规模上, 种子引发产品占比较小。目前, 国际市场相继出现了少量种子引发产品。其中, Take Off ST[®]、EasyPrime、EasyDormex、Emergis[®]、Tempo[®]、SPLIT-KOTE[®] SPECIAL 和 PROMOTOR[™] 等产品均提高了

种子发芽率, 促进种子更快、更均匀地出苗。EasyDormex、Tempo[®]、Thermocure[™] 和 SPLITKOTE[®] SPECIAL 等产品降低了种子发芽过程中对温度或光照的敏感性, 专门解决了种子的热休眠或光休眠问题。在提高作物气候韧性的“种子引发”产品方面, 一些处于技术前沿的公司已经领先于其他公司。这些产品通常使用信号分子来触发应激反应。然而, 激素等信号分子存在成本高、易降解和化学不稳定等问题。此外, 它们在提高作物抗病能力方面的作用非常有限。

由此可见, 无论是基于农药的种子处理剂, 还是基于引发的种子处理剂, 我国在技术和市场占有率上均不占优势。鉴于这些差距, 我们可以寻求更有效、更经济、更环保的颠覆性技术, 实现跨越式发展^[26]。纳米种子处理技术作为一种新技术, 极有可能是种子处理行业的变革者。

5 总结与展望

气候变化背景下, 提高作物的气候韧性对于减少产量损失至关重要。如本文所述, 纳米种子处理在提高抗逆和抗病方面极具潜力。尤为重要的是, 纳米种子处理技术极其适合我国国情。1) 我国是自然灾害发生频率最高的国家, 迫切需要能够提高作物抗逆能力的新技术, 以保障粮食安全。2) 立足于大国小农的国情农情, 需要为小农业者提供成本低的纳米种子处理技术, 以保障作物稳产并提高小农业者的经济收入。Acharya 等^[82]计算出纳米银引发西瓜种子的成本约为 53.1~88.65 ¥·hm⁻²。Zhou 等^[63]估算纳米银引发白菜种子的成本约为 7.95~13.65 ¥·hm⁻²。由此可见, 纳米种子处理技术操作简单, 成本相对低廉, 对于小农业者来说, 是一种可负担得起并可行的技术。随着纳米种子处理基础科学研究的深入, 一些成本更加低廉的纳米种子处理剂, 如纳米二氧化硅、铜基纳米材料和铁基纳米材料等, 将会进一步降低成本。3) 我国农药使用量过高, 生态环境遭到严重破坏。纳米种子处理技术可提高种子质量和作物气候韧性, 从而减少了高毒、高残留传统农药的使用, 有助于减污降碳。4) 纳米种子处理技术具有环境友好性。与农药、化肥等传统农用化学品对比, 纳米种子处理剂的优势是具有低毒性和较低的环境风险。此外, 与其他施用方式相比(如叶面喷施和土壤施用), 纳米种子处理的施用方式(浸种)还确保了更低的纳米材料环境暴露风险。然而, 考虑到纳米材料本身对环境的潜在影响, 纳米种子处

理剂应用之前的重要一环是环境评估。因此,尚需更多证据表明纳米种子处理技术的环境友好性。5) 国际种子处理市场长期由跨国公司垄断。纳米种子处理技术极有可能是种子处理行业新的赛道,提早布局将会提高我国种子处理企业的国际竞争力。总之,纳米种子处理技术极具前景,在尚未大规模应用之前,我国需在此领域提前布局,推进纳米种子处理的基础研究,加速纳米种子处理技术从实验室研究到真正商业化应用的步伐。

文中附件见网站资源附件: <http://www.ecoagri.ac.cn/cn/article/doi/10.12357/cjea.20230641>。

参考文献 References

- [1] SANDERSON K. June's record-smashing temperatures — in data[J]. *Nature*, 2023, 619: 232–233
- [2] HASEGAWA T, SAKURAI G, FUJIMORI S, et al. Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs[J]. *Nature Food*, 2021, 2: 587–595
- [3] KIM W, IIZUMI T, NISHIMORI M. Global patterns of crop production losses associated with droughts from 1983 to 2009[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, 58(6): 1233–1244
- [4] SINGH B K, DELGADO-BAQUERIZO M, EGIDI E, et al. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2023, 21: 640–656
- [5] REED R C, BRADFORD K J, KHANDAY I. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate[J]. *Heredity*, 2022, 128: 450–459
- [6] PAPARELLA S, ARAÚJO S S, ROSSI G, et al. Seed priming: state of the art and new perspectives[J]. *Plant Cell Reports*, 2015, 34(8): 1281–1293
- [7] FRACETO L F, GRILLO R, DE MEDEIROS G A, et al. Nanotechnology in agriculture: which innovation potential does it have?[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2016, 4: 20
- [8] MAGHSOODI M R, LAJAYER B A, HATAMI M, et al. Challenges and opportunities of nanotechnology in plant-soil mediated systems: beneficial role, phytotoxicity, and phyto-extraction[M]//*Advances in Phytonanotechnology*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 379–404
- [9] BRUCE T J A, MATTHES M C, NAPIER J A, et al. Stressful “memories” of plants: evidence and possible mechanisms[J]. *Plant Science*, 2007, 173(6): 603–608
- [10] F E. Theophrastus: enquiry into plants, and minor works on odours and weather signs[J]. *Nature*, 1917, 99: 282
- [11] EVENARI M. Seed physiology: its history from antiquity to the beginning of the 20th century[J]. *The Botanical Review*, 1984, 50(2): 119–142
- [12] GAIUS P S. *Naturalis Historia*[M]. Princeton: Harvard University Press, 1949
- [13] 氾胜之. 氾胜之书[M]. 北京: 学苑音像出版社, 2004
- FAN S Z. *The Book of Fanshengzhi*[M]. Beijing: Academy Audiovisual Press, 2004
- [14] 贾思勰. 齐民要术[M]. 北京: 团结出版社, 1996
- JIA S X. *Important Arts for the People's Welfare*[M]. Beijing: United Press, 1996
- [15] 陆威仪. 世界性的帝国: 唐朝[M]. 北京: 中信出版社, 2016
- LEWIS M E. *China's Cosmopolitan Empire: the Tang Dynasty*[M]. Beijing: Citic Press, 2016
- [16] BLACK M. Darwin and seeds[J]. *Seed Science Research*, 2009, 19(4): 193–199
- [17] SRIVASTAVA A K, SURESH KUMAR J, SUPRASANNA P. Seed ‘primeomics’: plants memorize their germination under stress[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2021, 96(5): 1723–1743
- [18] HEYDECKER W, HIGGINS J, GULLIVER R L. Accelerated germination by osmotic seed treatment[J]. *Nature*, 1973, 246: 42–44
- [19] PARERA C A, CANTLIFFE D J. *Presowing Seed Priming*[M]. Horticultural Reviews. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1994: 109–141
- [20] NETTLES R, WATKINS J, RICKS K, et al. Influence of pesticide seed treatments on rhizosphere fungal and bacterial communities and leaf fungal endophyte communities in maize and soybean[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 102: 61–69
- [21] 徐光启. 农政全书[M]. 北京: 中华书局, 1956
- XU G Q. *A Complete Treatise on Agriculture*[M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 1956
- [22] MAUDE R B. *Seedborne Diseases and Their Control: Principles and Practice*[M]. CAB International, 1996
- [23] PATRA M, SHARMA A. Mercury toxicity in plants[J]. *The Botanical Review*, 2000, 66(3): 379–422
- [24] EDGINGTON L V. Systemic fungicides: a perspective after 10 years[J]. *Plant Disease*, 1980, 64(1): 19
- [25] BRENT K J, HOLLOMON D W. *Fungicide Resistance in Crop Pathogens: How Can It be Managed?*[M]. Brussels: GIFAP, 1995
- [26] LAMICHHANE J R. Parsimonious use of pesticide-treated seeds: an integrated pest management framework[J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(11): 1070–1073
- [27] RUSSELL P E. A century of fungicide evolution[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2005, 143(1): 11–25
- [28] GODFRAY H C J, BLACQUIÈRE T, FIELD L M, et al. A restatement of the natural science evidence base concerning neonicotinoid insecticides and insect pollinators[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2014, 281(1786): 20140558
- [29] DOUGLAS M R, TOOKER J F. Large-scale deployment of seed treatments has driven rapid increase in use of neonicotinoid insecticides and preemptive pest management in US field crops[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(8): 5088–5097
- [30] AYESHA M S, SURYANARAYANAN T S, NATARAJA K N, et al. Seed treatment with systemic fungicides: time for review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 654512
- [31] LAMICHHANE J R, YOU M P, LAUDINOT V, et al. Revisiting sustainability of fungicide seed treatments for field

- crops[J]. *Plant Disease*, 2020, 104(3): 610–623
- [32] DEVARREWAERE W, FOQUÉ D, HEIMBACH U, et al. Quantitative 3D shape description of dust particles from treated seeds by means of X-ray micro-CT[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(12): 7310–7318
- [33] BAIG N, KAMMAKAKAM I, FALATH W. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges[J]. *Materials Advances*, 2021, 2(6): 1821–1871
- [34] KHAN I, SAEED K, KHAN I. Nanoparticles: properties, applications and toxicities[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, 12(7): 908–931
- [35] AI Y J, HU Z N, LIANG X P, et al. Recent advances in nanozymes: from matters to bioapplications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(14): 2110432
- [36] SINGH V K, SINGH R, TRIPATHI S, et al. Seed priming: state of the art and new perspectives in the era of climate change[M]//*Climate Change and Soil Interactions*. Amsterdam: Elsevier, 2020: 143–170
- [37] GUHA T, DAS H, MUKHERJEE A, et al. Elucidating ROS signaling networks and physiological changes involved in nanoscale zero valent iron primed rice germination *sensu stricto*[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2021, 171: 11–25
- [38] PRERNA D I, GOVINDARAJU K, TAMILSELVAN S, et al. Influence of nanoscale micro-nutrient α -Fe₂O₃ on seed germination, seedling growth, translocation, physiological effects and yield of rice (*Oryza sativa*) and maize (*Zea mays*)[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 162: 564–580
- [39] SAVASSA S M, DURAN N M, RODRIGUES E S, et al. Effects of ZnO nanoparticles on *Phaseolus vulgaris* germination and seedling development determined by X-ray spectroscopy[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2018, 1(11): 6414–6426
- [40] JOSHI A, KAUR S, DHARAMVIR K, et al. Multi-walled carbon nanotubes applied through seed-priming influence early germination, root hair, growth and yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(8): 3148–3160
- [41] KASOTE D M, LEE J H J, JAYAPRAKASHA G K, et al. Seed priming with iron oxide nanoparticles modulate antioxidant potential and defense-linked hormones in watermelon seedlings[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(5): 5142–5151
- [42] KUMAR G D, RAJA K, NATARAJAN N, et al. Invigouration treatment of metal and metal oxide nanoparticles for improving the seed quality of aged chilli seeds (*Capsicum annum* L.)[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 242: 122492
- [43] ISAYENKOV S V, MAATHUIS F J M. Plant salinity stress: many unanswered questions remain[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 80
- [44] KHAN M N, LI Y H, KHAN Z, et al. Nanoceria seed priming enhanced salt tolerance in rapeseed through modulating ROS homeostasis and α -amylase activities[J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2021, 19(1): 276
- [45] YE Y Q, COTA-RUIZ K, HERNÁNDEZ-VIEZCAS J A, et al. Manganese nanoparticles control salinity-modulated molecular responses in *Capsicum annum* L. through priming: a sustainable approach for agriculture[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(3): 1427–1436
- [46] WANG Z S, LI H, LI X N, et al. Nano-ZnO priming induces salt tolerance by promoting photosynthetic carbon assimilation in wheat[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 66(9): 1259–1273
- [47] OSAKABE Y, OSAKABE K, SHINOZAKI K, et al. Response of plants to water stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 86
- [48] RAI-KALAL P, TOMAR R S, JAJOO A. Seed nanoprimering by silicon oxide improves drought stress alleviation potential in wheat plants[J]. *Functional Plant Biology: FPB*, 2021, 48(9): 905–915
- [49] RAI-KALAL P, TOMAR R S, JAJOO A. H₂O₂ signaling regulates seed germination in ZnO nanoprimered wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds for improving plant performance under drought stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, 189: 104561
- [50] NOOR R, YASMIN H, ILYAS N, et al. Comparative analysis of iron oxide nanoparticles synthesized from ginger (*Zingiber officinale*) and cumin seeds (*Cuminum cyminum*) to induce resistance in wheat against drought stress[J]. *Chemosphere*, 2022, 292: 133201
- [51] WAQAS MAZHAR M, ISHTIAQ M, HUSSAIN I, et al. Seed nano-priming with Zinc Oxide nanoparticles in rice mitigates drought and enhances agronomic profile[J]. *PLoS One*, 2022, 17(3): e0264967
- [52] RAGAB G, SAAD-ALLAH K. Seed priming with greenly synthesized sulfur nanoparticles enhances antioxidative defense machinery and restricts oxidative injury under manganese stress in *Helianthus annuus* (L.) seedlings[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2021, 40(5): 1894–1902
- [53] SARDAR R, AHMED S, YASIN N A. Titanium dioxide nanoparticles mitigate cadmium toxicity in *Coriandrum sativum* L. through modulating antioxidant system, stress markers and reducing cadmium uptake[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 292: 118373
- [54] DELGADO-BAQUERIZO M, GUERRA C A, CANO-DÍAZ C, et al. The proportion of soil-borne pathogens increases with warming at the global scale[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10: 550–554
- [55] SIDDAIAH C N, PRASANTH K V H, SATYANARAYANA N R, et al. Chitosan nanoparticles having higher degree of acetylation induce resistance against pearl millet downy mildew through nitric oxide generation[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 2485
- [56] KHAN M R, SIDDIQUI Z A. Use of silicon dioxide nanoparticles for the management of *Meloidogyne incognita*, *Pectobacterium betavascularum* and *Rhizoctonia solani* disease complex of beetroot (*Beta vulgaris* L.)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 265: 109211
- [57] SHANG H P, MA C X, LI C Y, et al. Copper sulfide nanoparticles suppress *Gibberella fujikuroi* infection in rice (*Oryza sativa* L.) by multiple mechanisms: contact-mortality, nutritional modulation and phytohormone regulation[J].

- Environmental Science: Nano*, 2020, 7(9): 2632–2643
- [58] YAN X, CHEN S, PAN Z Y, et al. AgNPs-triggered seed metabolic and transcriptional reprogramming enhanced rice salt tolerance and blast resistance[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(1): 492–504
- [59] KIM S W, JUNG J H, LAMSAL K, et al. Antifungal effects of silver nanoparticles (AgNPs) against various plant pathogenic fungi[J]. *Mycobiology*, 2012, 40(1): 53–58
- [60] WEN H, SHI H B, JIANG N, et al. Antifungal mechanisms of silver nanoparticles on mycotoxin producing rice false smut fungus[J]. *iScience*, 2023, 26(1): 105763
- [61] CHEN S L, GUO X P, ZHANG B T, et al. Mesoporous silica nanoparticles induce intracellular peroxidation damage of *Phytophthora infestans*: a new type of green fungicide for late blight control[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(9): 3980–3989
- [62] CHEN S, LIU H L, YANGZONG Z, et al. Seed priming with reactive oxygen species-generating nanoparticles enhanced maize tolerance to multiple abiotic stresses[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(48): 19932–19941
- [63] ZHOU X D, JIA X R, ZHANG Z H, et al. AgNPs seed priming accelerated germination speed and altered nutritional profile of Chinese cabbage[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 808: 151896
- [64] ABDEL LATEF A H, ABU ALHMAD M F, ABDEL FATAH K E. The possible roles of priming with ZnO nanoparticles in mitigation of salinity stress in lupine (*Lupinus termis*) plants[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2017, 36(1): 60–70
- [65] RAI-KALAL P, JAJOO A. Priming with zinc oxide nanoparticles improve germination and photosynthetic performance in wheat[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 160: 341–351
- [66] SHAH T, LATIF S, SAEED F, et al. Seed priming with titanium dioxide nanoparticles enhances seed vigor, leaf water status, and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) under salinity stress[J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2021, 33(1): 101207
- [67] ALSAEEDI A H, EL-RAMADY H, ALSHAAL T, et al. Engineered silica nanoparticles alleviate the detrimental effects of Na⁺ stress on germination and growth of common bean (*Phaseolus vulgaris*)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(27): 21917–21928
- [68] RAZA M A S, ZULFIQAR B, IQBAL R, et al. Morpho-physiological and biochemical response of wheat to various treatments of silicon nano-particles under drought stress conditions[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 2700
- [69] KASOTE D M, LEE J H J, JAYAPRAKASHA G K, et al. Manganese oxide nanoparticles as safer seed priming agent to improve chlorophyll and antioxidant profiles in watermelon seedlings[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(4): 1016
- [70] LUO X, WANG Z Y, WANG C X, et al. Nanomaterial size and surface modification mediate disease resistance activation in cucumber (*Cucumis sativus*)[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(5): 4871–4885
- [71] JOSHI S M, DE BRITTO S, JOGAI AH S. Myco-engineered selenium nanoparticles elicit resistance against tomato late blight disease by regulating differential expression of cellular, biochemical and defense responsive genes[J]. *Journal of Biotechnology*, 2021, 325: 196–206
- [72] SEN A, PUTHUR J T. Seed priming-induced physiochemical and molecular events in plants coupled to abiotic stress tolerance: an overview[M]//Priming-Mediated Stress and Cross-Stress Tolerance in Crop Plants. Amsterdam: Elsevier, 2020: 303–316
- [73] NASEER M, ZHU Y, LI F M, et al. Nano-enabled improvements of growth and colonization rate in wheat inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 295: 118724
- [74] SHARMA D, AFZAL S, SINGH N K. Nanoprimering with phytosynthesized zinc oxide nanoparticles for promoting germination and starch metabolism in rice seeds[J]. *Journal of Biotechnology*, 2021, 336: 64–75
- [75] AN J, HU P G, LI F J, et al. Emerging investigator series: molecular mechanisms of plant salinity stress tolerance improvement by seed priming with cerium oxide nanoparticles[J]. *Environmental Science: Nano*, 2020, 7(8): 2214–2228
- [76] CAO X S, WANG C X, LUO X, et al. Elemental sulfur nanoparticles enhance disease resistance in tomatoes[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(7): 11817–11827
- [77] GROUP P A P, CONRATH U, BECKERS G J M, et al. Priming: getting ready for battle[J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions: MPMI*, 2006, 19(10): 1062–1071
- [78] SIRCHIO K, SUTTON A. Syngenta professional products focuses chemical technology on new applications to enhance the quality of life[J]. *CHIMIA*, 2007, 61(1/2): 17
- [79] DESAMANGALAM A. China seed treatment market size and share analysis[EB/OL]. Mordor Intelligence, [2023-6]. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/china-seed-treatment-market>
- [80] WHITE K E, HOPPIN J A. Seed treatment and its implication for fungicide exposure assessment[J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2004, 14(3): 195–203
- [81] BECKERS G J, CONRATH U. Priming for stress resistance: from the lab to the field[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2007, 10(4): 425–431
- [82] ACHARYA P, JAYAPRAKASHA G K, CROSBY K M, et al. Nanoparticle-mediated seed priming improves germination, growth, yield, and quality of watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 5037