

· 专题论坛 ·

## 工程纳米材料对高等植物生长影响的研究进展

陈娟妮, 朱云松, 宋锟, 丁伟\*

西南大学植物保护学院, 天然产物农药研究室, 重庆 400716

**摘要** 由于纳米尺寸效应和卓越的物理化学性质, 工程纳米材料(ENMs)广泛应用于生产和生活的各个领域。在农业生产领域, ENMs对高等植物生物及生态效应的风险评估备受关注。为全面认识和了解ENMs对生态系统中高等植物的影响, 该文综述了农业中常用的几种ENMs (主要包括金属、金属氧化物和碳基纳米材料)对高等植物生长的影响及作用机制, 探讨了ENMs对植物生物学效应的主要影响因素, 包括植物种类和生长介质及ENMs粒径、形状、表面特性、浓度和处理时间。同时, 从真实土壤环境、长期低剂量效应和植物吸收转运等方面对ENMs与高等植物互作研究进行了展望, 以期ENMs在农业生产上的高效利用提供参考依据。

**关键词** 工程纳米材料, 高等植物, 促进作用, 生理毒性, 影响因素

陈娟妮, 朱云松, 宋锟, 丁伟 (2023). 工程纳米材料对高等植物生长影响的研究进展. 植物学报 58, 813–830.

工程纳米材料(engineered nanomaterials, ENMs)是指二维尺寸至少1个维度小于100 nm的一类人工合成材料, 主要包括碳基纳米材料(如碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)、石墨烯、富勒烯(fullerene, C60)和炭黑)、金属及其氧化物纳米材料(如零价金属纳米材料(AgNPs和CuNPs等)、金属氧化物纳米材料(ZnONPs、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs和CuONPs等)和量子点(CdSe和CdTe等)) (West and Halas, 2003)。纳米材料的小尺寸效应(如纳米尺寸、高比表面和可控的表面化学)使ENMs产生优越的光学、热学和物理特性。这些特性使ENMs在各个行业领域(包括日化、抗菌剂、遮光剂及运动器材等)均显示出广泛的应用潜力(West and Halas, 2003; 陈娟妮等, 2021)。据美国Project on Emerging Nanotechnologies网站统计, 目前全球有明确标注的纳米产品已达几千种, 主要产地为中国、欧洲和美国, 涉及的纳米材料包括碳纳米材料、金属及其氧化物纳米材料等, 特别是CNTs, 仅美国CNano公司的年产量就达500 t(庄文等, 2016)。中国产业调研网发布的《2017–2022年中国纳米材料行业发展现状调研与发展趋势分析报告》显示, 在节约能

源和资源方面, 纳米材料在农业、能源、环境、资源和水处理等领域发挥重要作用, 尤其是农业领域(汪玉洁等, 2016; 陈娟妮等, 2019)。例如, 纳米材料作为肥料, 可控释放植物生长调节物质; 利用纳米材料检测病原菌和防治植物病虫害; 通过向土壤中加入纳米材料进行土壤修复以及肥药运输等(李晶等, 2020) (图1)。然而, 张海等(2013)研究发现, 大量的ENMs以残余废弃物残渣(焚烧炉飞尘及底渣, 废水处理装置产生的固体污泥)等形式暴露在环境中, 对生态系统产生了巨大的负面效应。高等植物是生态系统中的初级生产者, 扮演着极其重要的角色。环境中的工程纳米材料废弃物不易降解, 通过转运会累积残留在土壤、水生态系统和高等植物体中, 势必对高等植物的生长产生显著的影响(Rico et al., 2011; 曹际玲等, 2016)。ENMs对高等植物的生物学效应可直接影响生态系统的健康、稳定以及可持续发展(Rico et al., 2011)。

目前, 科研人员对ENMs的生物学效应研究主要包括不同条件下ENMs对植物的毒性机制及从生物体角度分析ENMs在环境系统中所扮演的角色。这些

收稿日期: 2022-06-22; 接受日期: 2022-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(No.32001934)、西南大学大学生创新创业训练计划(No.S202210635214)和中国烟草总公司重庆市公司科技项目(No.B20211NY1316)

\* 通讯作者。E-mail: dingw@swu.edu.cn

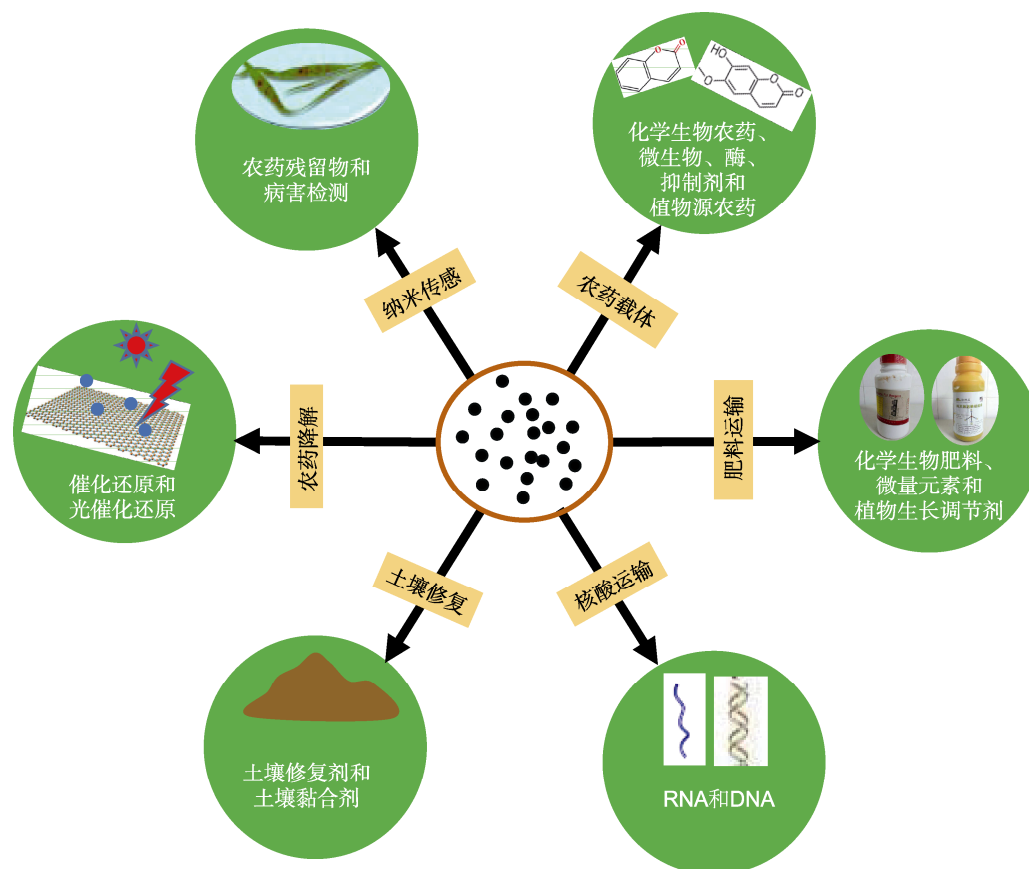


图1 工程纳米材料在农业中的潜在应用

Figure 1 Potential applications of engineered nanomaterials (ENMs) in agriculture

研究虽然在一定程度上提升了纳米生物学效应及毒性研究的理论价值,但是相关研究结果往往存在诸多矛盾。原因在于ENMs自身的物理化学性质差异(如成分、形状、表面涂层和电荷),或者培养基质、处理方法和植物种类等不同,导致它们在环境中的稳定性和生物相容性也不同,进而影响ENMs与植物之间的互作(Zuverza-Mena et al., 2017)。

为全面了解ENMs与高等植物之间的互作机制和评估ENMs的环境行为及其可能存在的风险,本文全面综述了国内外近几年最重要的几种ENMs对植物生长的影响,重点阐述这几种ENMs对植物生长的正面促进和负面毒性效应,探讨了ENMs对植物生物学效应的主要影响因素,并对ENMs的环境效应及其对高等植物的作用机制进行了展望,以期ENMs作为肥料、纳米传感器和杀菌剂等应用于农业领域提供参考依据。

## 1 纳米材料对植物生长的促进效应

### 1.1 碳纳米管

根据石墨烯的片层数,碳纳米管可分为单壁碳纳米管(single-wall carbon nanotubes, SWCNTs)、双壁碳纳米管(double-wall carbon nanotubes, DWCNTs)和多壁碳纳米管(multi-wall carbon nanotubes, MWCNTs)。多数研究中,依据植物种类不同,CNTs表现出不同的生物学效应(Servin et al., 2015; Vithanage et al., 2017)。Khodakovskaya等(2009)研究发现,10–40  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  MWCNTs (低浓度)水培暴露可显著促进番茄(*Solanum lycopersicum*)、大豆(*Glycine max*)、玉米(*Zea mays*)、大麦(*Hordeum vulgare*)、小麦(*Triticum aestivum*)和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)的种子萌发和生长,使幼苗鲜重升高2.5倍。这一方面可能是因为MWCNTs刺穿种皮,刺激了编码细胞分裂和

逆境相关基因(如病原菌诱导基因以及水通道*LeAqp2*和*LeAqp1*)的表达上调,从而导致植株水分吸收增强(Khodakovskaya et al., 2011; Lahiani et al., 2013);另一方面,可能是CNTs通过诱导水分和必需营养元素(Ca和Fe)的吸收效率促进番茄和玉米植株的生长发育(Villagarcia et al., 2012a, 2012b; Tiwari et al., 2014)。另外, Khodakovskaya等(2011, 2013)和Mondal等(2011)采用变性梯度凝胶电泳和系统发育分析发现,在土壤暴露条件下, MWCNTs可通过调节番茄植株根际土壤微生物群落结构(如影响变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes)的相对丰度),最终促进番茄植株的生长发育。

## 1.2 二氧化钛纳米粒子

研究二氧化钛纳米粒子(titanium dioxide nanoparticle,  $\text{TiO}_2\text{NPs}$ )对植物生物学效应的方法主要包括叶面喷施和土壤混施。Zheng等(2005)研究发现2.5%  $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 不仅可提高菠菜(*Spinacia oleracea*)种子的萌发率,而且能显著增强菠菜幼苗的光合作用,使植株鲜重、干重和叶绿素含量分别增加63%、76%和28%。这种促进效应通常与植株体内二磷酸核酮糖羧化酶的活性增强有关。 $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 通过诱导酶二级结构发生变化,一方面增强 $\text{Mg}^{2+}$ -ATP酶和叶绿体偶联因子(CF1)-ATP酶的活性,提高光吸收和转换效率,促进二氧化碳同化,以利于植物生长(Hong et al., 2005; Gao et al., 2006);另一方面加快植株体内的氮代谢,增强硝酸还原酶等相关酶活性,加速植株吸收转化硝酸盐和无机氮为有机氮(如蛋白质和叶绿素)的代谢过程,进而促进植物生长(Yang et al., 2006)。2014年, Haghghi和da Silva (2014)系统调查了 $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 对番茄、洋葱(*Allium cepa*)和萝卜(*Raphanus sativus*)3种蔬菜种子萌发率的影响,发现 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 水培暴露可以提高番茄以及洋葱种子的萌发率;且 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 暴露可以使萝卜种子的萌发率达到100%,表明 $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 暴露对3种蔬菜种子的萌发均具有促进作用,可以作为蔬菜种子萌发的诱导剂。Tumburu等(2015)对拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)进行了类似研究,发现 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 暴露可提高拟南芥种子的萌发率,且诱导一系列与生物过程(如氧化还原反应和氧化应激防御过程)相关的基因表达量发生显著变化,表明外界胁迫可能激活植株的防

御机制,诱导其它代谢过程,最终促进植物的生长发育。另外,兰丽贞等(2018)研究发现, $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 在水培暴露条件下能增强拟南芥根系的活力,并被根系吸收,转运至地上部,在叶内富集。上述研究结果表明,叶面喷施 $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 增强植物光合作用的机制主要有3种:(1)增强光化学反应中的光吸收作用;(2)激发生物化学反应中的酶活性;(3)激活防御系统,阻止脂质过氧化和氧自由基等抑制光合作用的因子,最终促进二氧化碳同化和氮代谢。

$\text{TiO}_2\text{NPs}$ 不仅能促进植物的生长,还能极大地缓解逆境胁迫对植物的损伤。Mohammadi等(2013)研究表明,在低温( $4^\circ\text{C}$ )胁迫下,低浓度( $<10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )  $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 暴露可显著增强鹰嘴豆(*Cicer arietinum*)抗性和感性植株根系的通透性,使电解质的泄露减弱。 $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 也可诱导冷敏感基因型鹰嘴豆产生更多的过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ ),降低耐低温基因型植株(光合作用性能增强)体内 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的含量。热胁迫后, $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 暴露可显著增强1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(ribulose-1,5-diphosphatecarboxylase, Rubisco)活性。随着植物体内 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量的减少,与光合作用相关的CaLRubisco、CaSRubisco和Cachlorophyll/b-binding蛋白基因转录水平升高,植物在逆境胁迫下的生存能力增强。在此条件下,与敏感型植株相比,抗性植株的磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(phosphoenolpyruvate carboxylase, PEPC)活性也增强,表明鹰嘴豆可能通过不同机制(如苹果酸途径)提高能量的使用效率。因此,暴露在 $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 条件下,鹰嘴豆可能通过调节低温抵抗力和改变物质代谢途径来响应温度胁迫(Hasanpour et al., 2015)。

另外,低浓度( $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )  $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 暴露可以显著增强亚麻(*Linum usitatissimum*)的耐旱性和蚕豆(*Vicia faba*)的耐盐性,且2种作物的叶绿素和胡萝卜素含量均显著增加。这些结果表明,外源增施最佳浓度的 $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 能适当改善逆境对植株的损害,提高植株的抗性(Aghdam et al., 2016; Abdel et al., 2018)。同样地,增施0.02%  $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 可显著降低干旱对小麦的损伤,使小麦株高、穗重、穗数、种子数、最终产量、生物量、面筋和淀粉含量均有所提高。这是因为 $\text{TiO}_2\text{NPs}$ 诱导抗氧化酶活性增强,从而相对提高小麦植株的活性氧(reactive oxygen species, ROS)清除能力,及时阻止ROS过度积累导致的氧化应激对植

物细胞造成的氧化损伤。此外,植物细胞中脯氨酸和可溶性糖含量的增加可有效调节干旱胁迫下植物细胞内的渗透平衡(Khalofah et al., 2021)。可见,缺水条件下,在田间适量补施TiO<sub>2</sub>NPs可缓解干旱胁迫。

### 1.3 氧化锌纳米粒子

Tarafdar等(2014)比较了生物合成的氧化锌纳米粒子(zinc oxide nanoparticles, ZnONPs)和常规ZnO对植物生长的影响,发现ZnONPs暴露下,杂交狼尾草(*Pennisetum americanum*)幼苗的茎长、干重、叶绿素和水溶性蛋白含量分别增长10.8%、12.0%、18.4%和19.9%;同时,一些关键酶,如碱性磷酸酶、脱氢酶和植酸酶的活性增强,分别升高了76.9%、21%和322.2%。研究发现,高浓度(1 000 mg·L<sup>-1</sup>) ZnONPs暴露显著促进花生(*Arachis hypogaea*)的种子萌发和植株生长;后续田间实验,相比土壤混施,叶面喷施ZnONPs使花生植株豆荚数增加29.5%,但具体促进机制尚不清楚(Prasad et al., 2012)。

Raliya和Tarafdar (2013)利用烟曲霉菌(*Aspergillus fumigatus* TFR-8)胞外分泌物生物合成ZnONPs,且叶面喷施后发现10 mg·L<sup>-1</sup> ZnONPs显著促进鹰嘴豆的各项生理和发育指标,包括生物量(27.1%)、茎长(31.5%)、根长(66.3%)、根面积(73.5%)、叶绿素含量(276.2%)、总可溶性叶蛋白含量(27.1%)、根际微生物数量(11%–14%)以及种子成熟后的胶质含量(7.5%)。同时,成熟种子中酸性磷酸酶、碱性磷酸酶和植酸酶的活性分别比对照提高73.5%、48.7%和72.4%。当ZnONPs浓度升高至20–100 mg·L<sup>-1</sup>时,可显著提高番茄的光合作用,同时诱导一系列与元素转运、C/N代谢等相关基因的上调表达,特别是在缺Fe条件下,ZnONPs可显著增加番茄叶片糖和氨基酸含量,使叶片Fe累积量增加12.2% (Sun et al., 2020)。ZnONPs在大田暴露条件下也可作为刺激物,改善水稻(*Oryza sativa*)的产量和对元素(N、K和Zn)的吸收,促进植株光合色素和蛋白质合成,降低丙二醛(MDA)的含量,缓解膜过氧化作用,增强超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性,抵御氧化胁迫对植株产生的毒害(Burman et al., 2013; Elshayb et al., 2021)。ZnONPs还可通过改善植株氮转运和总氮含量、调节抗性相关蛋白、抗氧化酶活性以及稳定光合色素等增强植株的盐和干旱胁迫的耐受能力(Alharby

et al., 2016; Venkatachalam et al., 2017; Rizwan et al., 2019)。ZnONPs的这种增强效应归根结底在于降低植物体内ROS和脂质过氧化水平,及提高抗氧化酶、SOD和POD活性。

### 1.4 铁基纳米粒子

Alidoust和Isoda (2013)采用叶面喷施和土壤施用法研究了Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs和柠檬酸包被的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs对大豆生长的影响,发现叶面喷施Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs可显著促进大豆根系生长和光合作用,这是因为叶面施肥增大了大豆叶片的气孔开放度,使光合速率增高。与土壤施用相比,叶面喷施柠檬酸包被的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs对大豆的促进作用更显著,可能是因为土壤添加会导致Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs释放的铁离子过度沉淀,从而使植株对铁元素的吸收量减少。Almeelbi和Bezbaruah (2014)研究表明,一些功能磷酸化修饰的铁基纳米粒子(Iron-based nanoparticle)可使菠菜的生物量提高4倍。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>NPs也能被小麦、水稻和玉米吸收,促进植株根系和地上部生长,且诱导植物的抗性酶活性增强(Iannone et al., 2016),尤其在缺铁条件下,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>NPs可通过降低植株氧化压力和调节植物激素水平缓解环境胁迫,提高水稻叶片的叶绿素含量和Fe吸收,可见Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>NPs具有发展为农业安全性铁肥的潜力(Yan et al., 2020; Li et al., 2021)。

另外,研究人员最近发现,20 mg·L<sup>-1</sup> γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs可以显著促进玉米根系的伸长,使根系活力提高39.6%,同时纳米粒子能通过质外体途径从表皮转运至内皮,最终积累在液泡中(Jeyasubramanian et al., 2016)。而20 mg·L<sup>-1</sup> Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs暴露下,可被柑橘(*Citrus reticulata*)和菠菜吸收,并增强植株自身的饱和磁化强度,进而提高铁元素的吸收速率,最终使柑橘叶绿素含量增加126.4%,果实产量增高。但是,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs被植物根系吸收后易发生团聚甚至堵塞维管束,不能被转运至茎和叶(Elshayb et al., 2021);且随着处理浓度的增加,植株叶绿素含量降低,MDA含量显著增加(Li et al., 2016, 2017)。

## 2 纳米粒子对植物的毒性效应

### 2.1 碳纳米管

多壁碳纳米管(MWCNTs)的生物学效应主要取决于

植物种类、处理浓度和植物生长的培养基等因素。在种子萌发阶段, 碳纳米管(CNTs)可吸附在种皮上, 堵塞营养物质和水分子吸收通道, 抑制种子萌发和植物生长(Servin et al., 2015; Vithanage et al., 2017)。Begum和Fugetsu (2012)及Begum等(2012)研究发现,  $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  MWCNTs在水培条件下暴露15天, 可显著抑制水稻、黄瓜(*Cucumis sativus*)、红苋菜(*Amaranthus tricolor*)和生菜(*Lactuca sativa*)的生长, 损害植株根系, 破坏叶片的形态结构, 并诱导植株体内产生ROS。Ke等(2021)研究也发现, MWCNTs可诱导拟南芥代谢抗氧化分子物质及MDA和ROS产生, 造成较强的氧化损伤(其主要毒性机制)。有研究表明, MWCNTs的植物毒性与氧化应激相关的微量营养素内稳态紊乱有关(Zaytseva and Neumann, 2016)。当大豆幼苗暴露于 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  MWCNTs下, 其胚根尖会积累大量的MWCNTs, 这些纳米材料对Zn和Cu表现出较强的吸附性, 阻碍Zn从子叶向幼苗转运, 最终诱导植物产生氧化应激。与此类似, Stampoulis等(2009)研究发现, 西葫芦(*Cucurbita pepo*)暴露在 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  MWCNTs下, 生物产量降低60%, 但种子萌发率不受影响。Yang等(2021)研究了MWCNTs对拟南芥的影响, 发现MWCNTs处理后拟南芥根系的伸长和叶片发育均受到严重抑制, 转录组数据显示MWCNTs抑制植物生长素信号和光合作用, 而活性氧和毒素代谢及植物对病原体的响应增强以对抗MWCNTs诱导的氧化应激。高剂量SWCNTs会导致玉米光合作用受损, 降低质子动力产生和玉米黄质含量, 减缓非光化学猝灭产生(Velikova et al., 2021)。低剂量( $40\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) MWCNTs暴露也会使芥菜(*Brassica juncea*)和黑绿豆(*Phaseolus mungo*)表现出明显的纳米毒性, 即根毛数量和长度均明显下降(Ghosh et al., 2010)。

## 2.2 石墨烯

石墨烯(graphene)是一种由碳原子组成的六角型蜂巢晶格状平面薄膜, 是目前已知的世界上最薄、最坚硬且导电性最好的纳米材料, 主要包括氧化石墨烯(graphene oxide, GO)和还原型氧化石墨烯(reduced graphene oxide, rGO)。石墨烯对植物生长的影响也随着处理浓度的不同而有所变化, 并且依赖植物的种类和处理时间。Begum等(2011)研究发现, 500–

$2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 石墨烯在琼脂培养基暴露条件下, 可以抑制甘蓝(*B. oleracea* var. *capitata*)、茄子(*Solanum melongena*)、红苋菜和生菜根茎的生长, 降低其生物量合成, 并诱导ROS产生, 最终导致细胞死亡。Anjum等(2013)研究发现, 蚕豆对GO的敏感性以及耐受性取决于植物细胞内的谷胱甘肽(glutathione, GSH)氧化还原系统。高浓度( $1\ 600\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )和低浓度( $100\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) GO暴露均降低蚕豆还原型谷胱甘肽含量和还原型/氧化型谷胱甘肽含量比率(GSH/GSSG), 增强GSH的氧化性, 导致蚕豆对GO的敏感性降低, 种子萌发和根系生长被显著抑制, 膜渗透性增强。GO对植物细胞的毒性机制主要源于其诱导产生的ROS和扰乱细胞生物学代谢过程, 包括降低抗氧化酶活性、抑制碳水化合物和氨基酸合成、改变脂肪酸的比例和氮代谢途径(Hu et al., 2014)。Liu等(2015)研究发现, 随着GO暴露浓度( $5\text{--}200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的增加, 其对水稻种子萌发的抑制作用增强, 且种子萌发的生理指标(根长、茎长、不定根数、根鲜重、地上部鲜重和根冠比)均显著受到影响。GO与烟草(*Nicotiana tabacum*)根系接触时, 能穿透细胞壁, 导致根尖细胞受损, 使烟草生物产量降低(Chakravarty et al., 2015; Zhang et al., 2015a)。Zhang等(2016)研究石墨烯对小麦的影响时发现, 在水培暴露条件下, 高浓度( $1\ 500\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )石墨烯对小麦生长的抑制机制非常复杂。它抑制根毛的发育, 但不影响叶片的生长, 主要原因在于石墨烯诱导植物体产生氧化压力。小麦与石墨烯孵育30天后, 生物产量和叶绿素含量均显著降低, 并且光合作用受到抑制, 体内多种大量和微量元素(N、K、Ca、Fe、Zn和Cu)含量降低, 造成营养失衡。另外, 一些石墨烯复合物也会对植物产生纳米毒性。例如, 氮掺杂石墨烯量子点(nitrogen-doped graphene quantum dots, NGQDs)可被拟南芥根摄取, 通过维管束运输至主根生长方向, 使根尖小柱细胞中淀粉粒的积累减少, 生长素外排载体PIN3表达量降低, 进而干扰拟南芥主根根尖生长素的分布(叶青等, 2022)。rGO则可通过破坏光系统II (PSII)的活性, 直接抑制豌豆(*Pisum sativum*)的光合作用, 这在很大程度上与其诱导的氧化应激有关(Chen et al., 2019)。

## 2.3 银纳米粒子

银纳米粒子(Ag nanoparticles, AgNPs)对植物的毒性

效应体现在植物生长发育的各个时期,尤其是种子萌发和幼苗生长阶段。AgNPs已被证实抑制水稻、玉米、油菜(*B. campestris*)、小麦、番茄和高粱(*Sorghum bicolor*)等种子的萌发和幼苗生长(Yin et al., 2011; Thuesombat et al., 2014; Matras et al., 2022)。有研究表明,AgNPs暴露可使绿豆(*P. radiates*)和高粱幼苗生长率仅为20%和47%,且AgNPs对绿豆和高粱的EC<sub>50</sub>值分别为13和26 mg·L<sup>-1</sup>(Lee et al., 2012)。Krishnaraj等(2012)研究表明,AgNPs暴露对牛藤草(*Hyssopus officinalis*)的形态结构无影响,但损伤其根、茎和叶的组织结构。Musante和White(2012)比较了AgNPs和大颗粒Ag暴露对植物的生理毒性,发现AgNPs不仅降低南瓜(*C. moschata*)的生物量积累,且使其蒸腾速率下降66%–84%。值得注意的是,AgNPs对南瓜的纳米毒性显著大于大颗粒Ag,这主要因为AgNPs具有较强的银离子释放能力(银溶液的4.4–10倍),游离银离子浓度是决定AgNPs生理毒性的主要因素(Yin et al., 2011)。然而,在有些植物体内,AgNPs释放出较少的游离Ag<sup>+</sup>,此时毒性效应源自纳米粒子本身。例如,叶面喷施AgNPs后,随着植物体内纳米粒子的累积,植株生长受到显著抑制,主要原因在于AgNPs暴露降低了叶片气孔导度、CO<sub>2</sub>同化速率和光系统II(PSII)光化学效率,从而抑制光合作用。另外,AgNPs抑制植株体内的抗氧化酶(如过氧化氢酶(catalase, CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX))活性,最终导致细胞死亡(Larue et al., 2014; Vishwakarma et al., 2017; Falco et al., 2020)。

## 2.4 氧化锌纳米粒子

目前,氧化锌纳米粒子(ZnO nanoparticles, ZnONPs)对植物的影响研究主要集中在植物毒性效应方面。迄今,已评估了ZnONPs对小麦、玉米、水稻、水芹(*Oenanthe clecumbens*)、黄瓜、番茄和大豆等多种植物的毒性。García-Gómez等(2018)通过向土壤施加不同浓度的ZnONPs,发现玉米、小麦和大豆的光合色素、MDA含量及ROS产生等均受到负性影响。Salehi等(2021)研究发现,与土壤施加ZnONPs相比,叶面喷施对菜豆(*P. vulgaris*)植株的生长抑制和毒性胁迫效应更大,可诱导植物脂质过氧化和蛋白质降解,甚至导致抗氧化代谢产物和蛋白质代谢紊乱,及光合作用下降。ZnONPs的纳米毒性与其释放的Zn<sup>2+</sup>

直接相关,特别是在根系部位。Wan等(2019)通过转录组学分析,发现ZnONPs不但抑制根伸长区表皮细胞微丝的重排,还通过物理作用和转录调控破坏细胞壁组织和结构,从而显著抑制拟南芥主根的生长,但对根系分生组织细胞的毒性作用更强。

Lv等(2021)研究也发现,ZnONPs对玉米根部的毒性很大程度上源自其释放的游离金属离子。ZnONPs能够迅速进入并沉积在植物根茎液泡中,发生价态转化(为Zn<sup>2+</sup>),直接危害植物生长。Lin和Xing(2008)在水培系统中发现,ZnONPs对黑麦草(*Lolium perenne*)表现出较强的纳米毒性,使黑麦草生物量显著降低,根尖萎缩,根表皮和皮层细胞高度空泡化或塌陷。然而,他们认为ZnONPs对植物的毒性与营养液或根际溶解的锌离子并无直接关系,而与其和细胞的直接接触相关。Zhang等(2015b)通过扫描电镜和透射电镜观察,发现ZnONPs被黑麦草吸收后转运至根内皮层和中柱的外质体与原生质体,这也可能与纳米毒性有关,黄瓜和水稻中也存在此毒性机制。郭敏(2016)从生长、产量和品质3方面评价了ZnONPs在植物中的毒性,发现ZnONPs在水培暴露条件下,可增强水稻幼苗对Zn的吸收,从而抑制幼苗生长、诱导氧化胁迫、损伤植株生理功能和物质合成;导致玉米植株净光合作用降低12%,产量降低49%,气孔导度下降,且改变玉米籽粒中的元素分配,影响玉米品质。

## 2.5 二氧化钛纳米粒子

大量研究表明,二氧化钛纳米粒子(TiO<sub>2</sub> nanoparticles, TiO<sub>2</sub>NPs)暴露也产生毒性,进而抑制植物的光合作用。Song等(2012)研究发现,TiO<sub>2</sub>NPs可以插入浮萍(*Lemna minor*)的叶绿体,参与催化氧化-还原反应,随后加速电子传输和氧的析出,降低叶绿素含量,抑制光合作用。此外,Frazier等(2014)研究发现,TiO<sub>2</sub>NPs暴露可显著抑制烟草根系生长和生物量的积累,且极低剂量(0.1%) TiO<sub>2</sub>NPs暴露可干扰植株体内与生长调控和逆境耐受力相关RNA(20–22 nt)的表达。当TiO<sub>2</sub>NPs暴露于土壤,可降低小麦13%生物产量,且显著减弱土壤酶活性,这些毒性机制与损伤植物细胞遗传物质相关(Du et al., 2011)。Pakrashi等(2014)研究表明,极低剂量(2–4 mol·L<sup>-1</sup>)的小尺寸(15 nm) TiO<sub>2</sub>NPs暴露可导致洋葱和烟草细胞染色体畸形断裂,细胞核起泡,破坏细胞膜的完整性,诱导

细胞ROS产生和MDA含量增加,从而导致细胞不能正常分裂增殖,阻碍植物根系生长。玉米植株也表现类似的毒性特征。

另外, TiO<sub>2</sub>NPs附着在植物根系表面,堵塞细胞壁孔径,导致植株根系导水率下降,从而抑制植株的蒸腾作用。Asli和Neumann (2009)研究发现,高剂量(1 000 mg·L<sup>-1</sup>) TiO<sub>2</sub>NPs水培暴露条件下,可引起玉米根系细胞孔径从6.6 nm下降至3.0 nm,从而阻碍细胞膜蛋白(如信号受体和膜吸收转运蛋白)通道。Gao等(2013)研究表明,叶面喷施0.1% TiO<sub>2</sub>NPs可降低长序榆(*Ulmus elongata*)的净光合速率,这种抑制作用并非由气孔受限所致,而是因为同位素氮元素含量降低,可是植物对金属元素(Mg、K和Mn)的吸收并未受到任何影响。Waani等(2021)研究了高浓度(750 mg·kg<sup>-1</sup>) TiO<sub>2</sub>NPs在叶片喷施、灌根和土壤混施暴露下,对水稻和土壤微生物的影响,发现在上述3种暴露条件下TiO<sub>2</sub>NPs显著抑制水稻植株和土壤微生物生长,并诱导植株产生大量H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>及脂质过氧化,造成叶片细胞膜损伤,表明TiO<sub>2</sub>NPs在土壤暴露下存在潜在的生态风险,可能引发多种生物学效应。

## 2.6 二氧化铯纳米粒子

二氧化铯纳米粒子(cesium dioxide nanoparticles, CeO<sub>2</sub>NPs)被吸收后,植物表现出不同的生物学效应。庄文等(2016)研究表明, CeO<sub>2</sub>NPs暴露可抑制莴苣(*Lactuca sativa*)幼苗根系的伸长,且这种生理毒性可能影响其下一代的正常生长发育。例如,当番茄植株接触低剂量(10 mg·L<sup>-1</sup>) CeO<sub>2</sub>NPs时,其第2代种子萌发率下降,幼苗长势偏弱,蒸腾作用明显减弱;但有意思的是,处理后的2代幼苗根毛发达,可更好地吸收Ce元素(Wang et al., 2013)。另外,高浓度(1 000 mg·kg<sup>-1</sup>) CeO<sub>2</sub>NPs暴露可抑制植株的逆境胁迫响应,原因在于根部累积了高浓度Ce(III) (是CeO<sub>2</sub>NPs产生生理毒性的一个重要原因) (Gui et al., 2015)。CeO<sub>2</sub>NPs还可扰乱植株的抗氧化防御系统。Rico等(2013a, 2013b)研究发现, CeO<sub>2</sub>NPs在水培暴露条件下,对水稻幼苗形态无影响,但显著降低其茎和根部的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量,及脂肪酸和木质素等大分子物质含量,增强植株体内的电解质泄露和脂质过氧化,改变氧化酶活性和自由巯基水平,损伤细胞膜。而暴露于2 000 mg·L<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub>NPs下,玉米、番茄和黄瓜种

子的萌发率显著降低,分别下降30%、30%和20%,且紫花苜蓿和番茄的根伸长也显著受到抑制(López-Moreno et al., 2010)。

## 2.7 铜基纳米粒子

铜基纳米粒子(copper-based nanoparticles, CuONPs)对植物的毒害是诱导植株体内产生大量的ROS。大量ROS破坏植物的组织细胞,尤其是损伤植物根系,使氧化防御系统中的抗氧化酶相关基因表达显著上调(Nair and Chung, 2014a; Nair et al., 2014)。CuONPs还可通过物理损伤和生理生化破坏影响植物细胞。Shi等(2014)研究发现, CuONPs显著抑制海州香薰(*Elsholtzia splendens*)和拟南芥的生长,且在叶和根细胞内及根尖表面沉积,导致根尖细胞排列紊乱,细胞壁连接断裂,细胞壁微纤维间的系索松动,细胞黏附性被破坏,细胞壁木葡聚糖和酯化果胶含量降低,根毛区肿胀,严重损害植株的根系结构,这与可溶性Cu<sup>2+</sup>的释放有一定关系(Nie et al., 2020)。另外, CuONPs在MS培养基暴露下,可显著降低拟南芥的生物产量和植株叶绿素含量,抑制其主根根系伸长并促进侧根形成,导致根系向地性失衡,继而对植株造成一定的损害(Nair et al., 2014)。组织学染色发现, CuONPs水培暴露可诱导根部木质素逐渐沉积,抑制根系生长,阻碍脱落酸和吲哚乙酸合成,降低植株对微量元素(B、Mo、Mn、Mg和Zn)的吸收,最终抑制大豆、绿豆、传统棉花(*Gossypium* spp.)和转基因棉花的生长(Nair and Chung, 2014a, 2014b; Nair et al., 2014; Nie et al., 2020)。CuNPs作为农业肥料或者农药也具有潜在的健康和环境风险。100 mg·L<sup>-1</sup> CuNPs暴露可降低辣椒(*Capsicum annuum*)的生物量和叶绿素含量,提高H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>浓度(60%)和脂质过氧化水平(27%),表明CuNPs可诱导氧化应激和损害植物细胞的细胞膜完整性(Tabatabaee et al., 2021)。

## 3 工程纳米材料对植物生物学效应的影响因素

### 3.1 植物种类

Servin等(2015)研究发现,工程纳米材料(ENMs)对植物的生物学效应依据植物种类的不同而异,并且很大程度上由植物的遗传多样性决定。有研究表明,

CeO<sub>2</sub>NPs暴露可使玉米、番茄和黄瓜种子萌发率降低,且显著抑制紫花苜蓿和番茄的根伸长,但却极大地刺激黄瓜和玉米根系的生长(López-Moreno et al., 2010)。另外,CeO<sub>2</sub>NPs在水培暴露下,显著抑制莴苣幼苗根系的伸长,但对小麦、黄瓜和菠菜无毒性作用,原因是CeO<sub>2</sub>NPs被根系吸收后,Ce(IV)转换为Ce(III),而莴苣对Ce(III)的敏感特性导致CeO<sub>2</sub>-NPs对其表现出较强的生理毒性,体现了物种特异性(Ma et al., 2010b; 庄文等, 2016)。

工程纳米材料的生物学效应除与遗传多样性有关外,还与植物的生理结构(包括种子大小、叶片、木质部和根系结构等)存在一定的关系(Yang et al., 2017)。多数情况下,ENMs(如AgNPs、CuONPs、CNTs和GO)对双子叶植物的生理毒性强于单子叶植物,主要由二者的叶片和根系结构差异所致(Begum et al., 2012)。双子叶植物叶片面积较大,可吸收更多的ENMs,并积累在植物细胞中,特别是叶面喷施ENMs对植物的纳米毒性更强。再者,双子叶植物有一个较大的主根和由主根发育而来的几个较小的侧根,ENM直接接触主根,毒性较大,而单子叶植物仅有许多小根,无主根,故毒性较小(Lee et al., 2008)。

除叶片和根系外,种子大小也是植物响应ENMs的一个重要因素。不同种类植物的种子大小各不相同。Cañas等(2008)研究发现,SWCNTs水培暴露显著抑制番茄、甘蓝、胡萝卜(*Daucus carota*)和生菜的根系伸长,却促进洋葱和黄瓜的生长;而MWCNT暴露对大豆无毒性作用,却显著抑制生菜、红苋菜、黄瓜和水稻根系的生长(Begum et al., 2012),原因是在种子萌发阶段,小种子(如番茄和生菜)的表面积比体积值比大种子(如黄瓜和大豆)高很多,因此种子较小的植物对ENMs的响应更敏感。此外,种皮的厚度也显著影响ENMs与植物的相互作用。在种子萌发阶段,相对于黄瓜的薄种皮,玉米的厚种皮可减缓ZnONPs对胚根伸长的抑制作用,并阻碍约一半的Zn进入植株根系和胚乳(Zhang et al., 2015b)。

### 3.2 工程纳米材料的粒径和形态

工程纳米材料(ENMs)(如TiO<sub>2</sub>NPs、ZnONPs、CuONPs、CeO<sub>2</sub>NPs和AgNPs)对植物生长的影响与自身粒径大小密切相关。通常粒径较小的ENMs更容易被植物根或叶吸收,其从根(叶)转运至叶(根)的效

率也较高,从而表现出更强的抑制或者促进效应(Thuesombat et al., 2014; Quah et al., 2015; 庄文等, 2016; Falco et al., 2020)。此外,小粒径ENMs具有较大的表面积,可诱导植物产生新的根孔特性,增强植物对水分、矿物质和养分的吸收,从而促进植物的生长(Raliya et al., 2015)。然而,小尺寸ENMs还可有效地与植物细胞互作,产生更多的ROS,加重细胞的损伤(Yang et al., 2017),表明ENMs的粒径对植物生物学效应的影响机制非常复杂。另外,小粒径ENMs(如CuONPs和ZnONPs)在不同暴露介质中,自身释放的游离金属离子与其较高的生物毒性均有直接关系。粒径9 nm的ZnONPs在水培系统中,对玉米的生物毒性显著高于粒径40 nm的ZnONPs,主要因为粒径较小的ZnONPs能迅速被玉米根系吸收,并在根茎液泡中大量积累,然后通过小泡转化为Zn<sup>2+</sup>,损伤组织结构(Lv et al., 2021)。而CuONPs在土壤暴露可导致大豆植株吸收大量释放的Cu<sup>2+</sup>,引发根系自由基偶联和/或抗氧化酶活性增强,导致根系快速木质化和大豆产量降低(Yusefi-Tanha et al., 2020)。

植物对ENMs的吸收与植物细胞结构和纳米材料的粒径相关。植物细胞壁的孔径通常为3–8 nm,厚度为5–20 nm(Carpita and Gibeaut, 1993)。粒径小于细胞壁孔径的ENMs可通过并到达质膜,而较大粒径的ENMs不易进入植物细胞,无法被吸收和转运,纳米毒性相对减弱。例如,粒径3 nm的TiO<sub>2</sub>NPs能被拟南芥吸收并被转运至根和叶的特定亚细胞位置(Kurepa et al., 2010),而粒径25 nm的TiO<sub>2</sub>NPs不能穿透细胞壁,纳米颗粒只能团聚在玉米根系表面,阻碍根系对水分和营养物质的吸收和转运,从而抑制植物的生长发育(Asli and Neumann, 2009)。

工程纳米粒子的形态在植物响应ENMs过程中起重要作用。Syu等(2014)研究发现,十面体((45±5) nm)、三角形((47±7) nm)和球状((8±2) nm) AgNPs对拟南芥生长产生不同的毒害作用。十面体AgNPs对植物生长的促进作用最强,而球状AgNPs对植物生长无任何促进作用,但有利于花青素的积累和诱导Cu/Zn超氧化物歧化酶活性增强。Xiang等(2015)研究发现,球形、柱状和六边形棒状ZnONPs危害白菜(*B. rapa* var. *glabra*)幼苗的生长(柱状和球形的生物毒性大于棒状),原因是其产生游离羟基(·OH)及锌在根或地上部的生物积累。

### 3.3 工程纳米材料的表面特性

表面功能基团也影响ENMs对植物的生物学效应, 原因是表面功能基团可导致ENMs的分散性发生变化, 而分散性直接决定ENMs在植物体内的吸收和转运, 改变其对土壤-植物系统的影响, 进而影响其生物学效应。例如, 功能化和非功能化MWCNTs均能促进植株的生长, 且这种促进作用与MWCNTs的纯度和分散性有关, 分散性越好, 则对植株的促进作用越强(Villagarcia et al., 2012b; Lahiani et al., 2013)。羧基化MWCNTs可延迟番茄的早期生长和开花(Jordan et al., 2020)。含氧功能基团多壁碳纳米管(OMWCNTs)在极低浓度( $2.3 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ )下可调控水通道蛋白基因的表达, 促进芥菜的种子萌发和幼苗生长(Khodakovskaya et al., 2011; Mondal et al., 2011); 而高浓度OMWCNTs显著抑制芥菜植株的发芽率和干物质的重量(Hao et al., 2016)。与对照(未经FeCo-CNTs处理)相比, FeCo-CNTs处理可使水稻组织中的Fe含量增加, 但生物量(鲜重)无差异, 而30和50  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Fe-CNTs暴露时, 铁纳米线可以引起CNTs结构发生改变, 进而显著降低水稻的生物产量(Hao et al., 2016)。

相对于纳米毒性较强的AgNPs, 聚乙烯吡咯烷包覆的AgNPs (PVP-AgNPs)对11种湿地植物种子的萌发均无影响, 而阿拉伯树胶包覆的AgNPs (GA-AgNPs)显著降低3种植物种子的萌发率, 原因是土壤中存在一种共配体, 它导致包被了聚乙烯吡咯烷的纳米颗粒释放 $\text{Ag}^+$ 的生物有效性以及毒性降低(Yin et al., 2012)。与GO的毒性效应相比, 一些功能化GO(如水合带状石墨烯(hydrated graphene ribbon, HGR)和氨基化GO)可提高小麦种子的发芽率并促进根系的生长和分化, HGR的无序层结构在此过程中发挥了关键作用(Hu and Zhou, 2014)。Chen等(2018)研究推测, 氨基的引入降低了GO的表面电阻率, 提高了电导率, 激活了植物细胞的生物活性, 继而诱导GO对植物生长的促进效应。

工程纳米材料的表面电荷也会显著影响其在植物体内的生物活性、穿透性和易位性(Rastogi et al., 2017)。Matras等(2022)采用柠檬酸三钠(trisodium citrate, TCSB)、单宁酸(tannic acid, TA)和半胱胺盐酸盐(cysteamine hydrochloride, CHSB)制备了3种AgNPs, 发现带正电的CHSB-AgNPs对单子叶(普通

小麦和高粱)和双子叶(花椰菜(*B. oleracea* var. *botrytis*)和白芥菜(*Sinapis alba*))植物幼苗生长的毒性大于带负电的TCSB-AgNPs和TA-AgNPs, 原因是CHSB-AgNPs的尺寸最小, 更容易穿透植物细胞膜, 干扰细胞的代谢活动。可见, ENMs的表面特性诱导的生物学效应机制非常复杂, 主要取决于ENMs的种类、表面功能基团和表面电荷等。

### 3.4 工程纳米材料的浓度和处理时间

多数研究中, ENMs对高等植物的影响呈现时间和剂量效应。例如, 低浓度( $<100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) MWCNTs暴露促进植物的生长; 而当浓度较高( $500\text{--}2\ 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )时, 其对植物则产生负面作用(Begum and Fugetsu, 2012; Begum et al., 2012; Lahiani et al., 2013)。Liu等(2015)和Cheng等(2016)研究了GO对种子萌发和幼苗生长的剂量效应, 发现低浓度( $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) GO水培暴露显著提高水稻和油菜幼苗根系的生长量和地上部干重; 当处理浓度达到 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 植物鲜重和茎长急剧降低, 而当处理浓度达到100和 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 2种植物所有形态学指标均受到明显抑制。

Pakrashi等(2014)研究发现, 极低剂量( $2\text{--}4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )的 $\text{TiO}_2$ NPs可抑制洋葱、烟草和玉米根系的生长; 而高浓度( $10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )的 $\text{TiO}_2$ NPs暴露对植物无明显毒性, 原因是高浓度 $\text{TiO}_2$ NPs容易发生团聚和沉淀, 不利于植株吸收(Ghosh et al., 2010), 但是这种剂量效应并非完全绝对。Anjum等(2013)研究发现, 100、200和 $1\ 600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  GO能显著抑制蚕豆的发芽率和根伸长, 而400和 $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  GO显著促进种子萌发, 降低 $\text{H}_2\text{O}_2$ 产生及脂质和蛋白质的氧化水平, 增强 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的分解及抗坏血酸过氧化物酶(APX)和过氧化氢酶(CAT)活性, 增加脯氨酸含量和种子的相对含水量, 促进蚕豆植株生长。此外, Zhang等(2016)研究发现, 小麦长期(30天)接触石墨烯会导致其叶片变形和发黄, 短期(24或48小时)接触石墨烯对其叶片则无明显影响。

### 3.5 植物的生长介质

在不同环境条件下, 工程纳米材料具有不同的物理化学性质, 故其对植物的生物学效应与植株的生长介质紧密相关。与水培条件相比, 琼脂介质可极大程度地缓解CuONPs对小麦的生理毒性, 原因是琼脂介质中

的CuONPs分散性强,溶出的Cu<sup>2+</sup>浓度显著低于水相(金盛杨等,2010)。砂性土壤中,CuONPs和ZnONPs可显著抑制小麦根系和地上部生长,因为砂质土中的纳米颗粒能快速溶解金属离子,且溶解速度与其对应的微米金属氧化物一致(Dimkpa et al., 2012)。与之相反, Lee等(2012)研究了琼脂培养基中AgNPs对农作物的生理毒性,发现其显著抑制绿豆和高粱的生长,但当用土壤处理后,植株幼苗的根茎生长未受到明显影响。这是因为相对于水培基质,在土壤环境中,ENMs不仅会发生溶解和团聚等化学变化,而且土壤颗粒对可溶性ENMs释放的金属离子具有吸附作用,致使植株对ENMs的生物利用度降低,从而导致其毒性降低(孙耀琴等,2016)。

此外,土壤复杂的理化性质(如土壤质地(Joško and Oleszczuk, 2013; Zhang et al., 2017b)、pH值(Watson et al., 2015; Schlich and Hund-Rinke, 2015)、含水量(Joško, 2019)、离子强度和有机质含量(Zhang et al., 2015a; Majumdar et al., 2016))也影响ENMs的稳定性及其在植物体内的吸收、转运和生物可利用性。其中,土壤pH值是影响可溶性金属离子类纳米粒子毒性效应的关键因子。一般情况下,相对于碱性土壤,ENMs在酸性土壤中的毒性效应更强,这是由于酸性土壤中,可溶性ENMs的金属离子溶出速度和移动性增强(Watson et al., 2015)。另外,土壤离子强度和有机质含量对ENMs在土壤中的团聚状态有特定的影响。例如,腐殖酸等物质可吸附于纳米粒子的表面,阻碍ENMs的团聚,提高生物利用度(Majumdar et al., 2016);而有些介质使纳米结构的流动性减弱,从而降低其生物利用度(Hotze et al., 2010; Yang et al., 2017)。Zhang等(2017a)研究了100和500 mg·kg<sup>-1</sup> CeO<sub>2</sub>NPs在不同介质中对萝卜生长的影响,发现用2种浓度的CeO<sub>2</sub>NPs处理后,粉质壤土(约含(2.21±0.04)%土壤有机质)中萝卜的贮藏根生物量显著高于砂质壤土(约含(11.87±0.56)%土壤有机质)。同样,CeO<sub>2</sub>NPs在琼脂(Cui et al., 2014)、盆栽混合土壤(Zhang et al., 2015a)和沙子(Zhang et al., 2017a) 3种不同介质暴露下,对生菜幼苗表现出不同程度的毒性。因此,工程纳米粒子在农业生产应用中需根据土壤特性对其进行改性,以提高其生物利用度及减轻对植物的毒害。

## 4 结论与展望

由于ENMs具有优越的物理化学性质,其在农业领域中的应用日益广泛,如调节植物的生长发育、改良农业土壤环境和防治病虫害。环境中ENMs大量残留必然会对周围生态环境产生影响。因此,探究纳米材料在环境中的生态效应,特别是对高等植物的生物学效应及进行风险评估已成为当前纳米材料研究的核心内容。综合分析国内外有关ENMs对高等植物生长影响的研究可为纳米材料的多方位生态效应评估提供大量可靠数据和参考依据。尽管已有研究证实,ENMs对植物可产生不同程度的影响且作用机制复杂,但仍有许多科学问题需深入探究。例如,ENMs一方面可通过降低种子萌发率、诱导细胞产生活性氧、增强细胞膜透性和直接损伤根系等毒性效应抑制植物的生长发育;另一方面又可通过增强光合作用、提高根系活力、增加水分吸收和提高代谢酶活性等促进植物的生长(图2)。但是,二者(ENMs和植物)之间的相互作用受多种因素影响,如植物种类、纳米颗粒尺寸和浓度及植物生长介质。目前,多数研究仅针对单一影响因素,未考虑各种因素综合作用下,纳米材料对植物的影响。ENMs在生态环境中的行为规律及对植物的毒性和有益作用研究尚处于起步阶段,有许多问题需深入探索,重点包括以下几方面。

### 4.1 在田间自然土壤环境下,研究ENMs对植物的生物学效应

目前,多数研究未在植物生长的真实土壤环境中进行,且缺乏大田实验数据和实际应用效果的支撑。基质和土壤环境的有机质含量、离子强度和pH值差异等均会导致纳米材料表现出不同的生物学效应(Le Van et al., 2016; Yang et al., 2017)。土壤的微生态是植物生长的重要环境因子,在植物的生长发育、抗病和抗虫过程中发挥重要作用。因此,未来研究应尽可能在大田自然土壤中进行,结合土壤营养供给和根际微生态效应,探讨纳米材料与植物的互作机制,全面揭示纳米材料的生物学效应。

### 4.2 采用组学技术研究ENMs对植物的长期生物学效应

目前,大部分研究关注高剂量ENMs短期暴露对植物

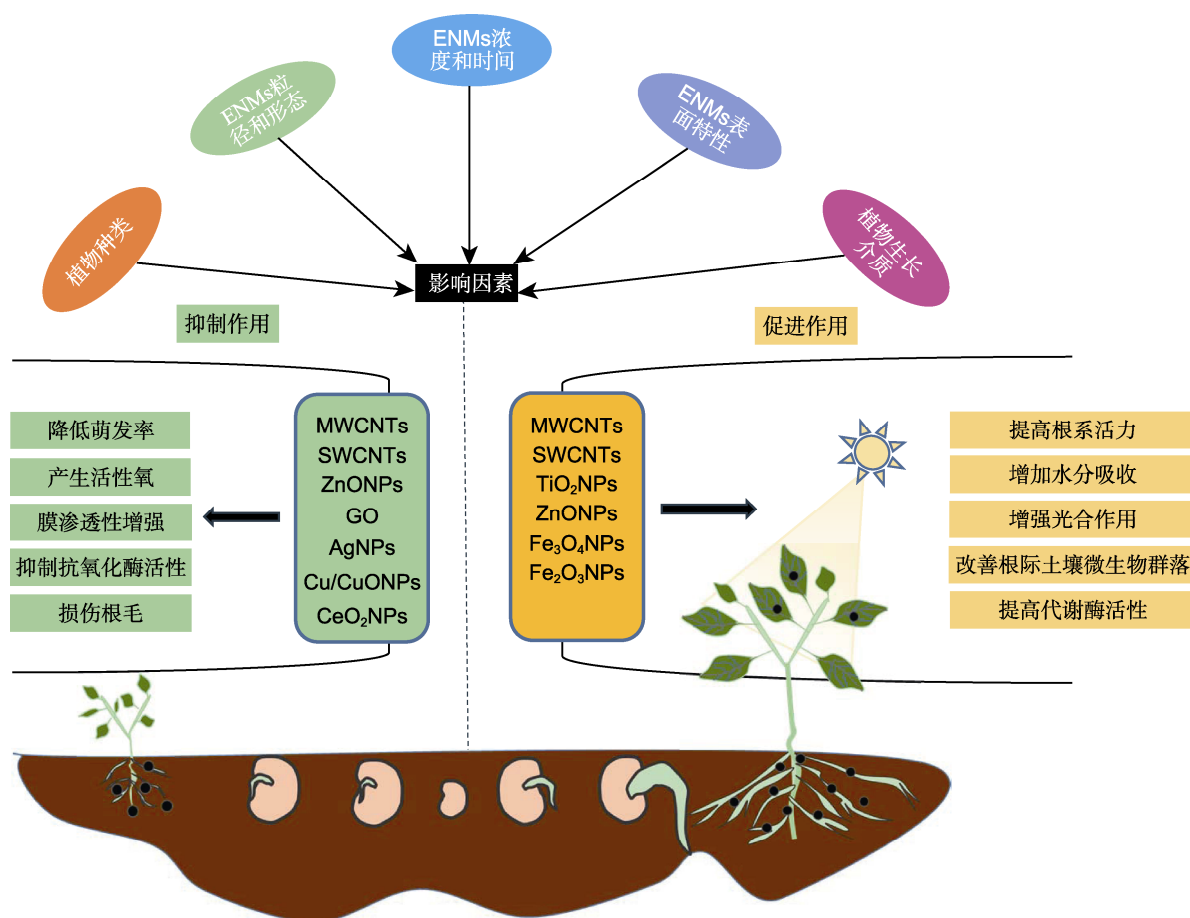


图2 工程纳米材料对植物的生物效应、影响因素及作用机制

ENMs: 工程纳米材料; MWCNTs: 多壁碳纳米管; SWCNTs: 单壁碳纳米管; ZnONPs: 氧化锌纳米粒子; GO: 氧化石墨烯; AgNPs: 银纳米粒子; Cu/CuONPs: 铜基纳米粒子; CeO<sub>2</sub>NPs: 二氧化铯纳米粒子; TiO<sub>2</sub>NPs: 二氧化钛纳米粒子; Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>NPs: 氧化铁纳米粒子; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs: 铁基纳米粒子

Figure 2 Biological effects, influencing factors and interaction mechanisms of engineered nanomaterials in plants

ENMs: Engineered nanomaterials; MWCNTs: Multi-wall carbon nanotubes; SWCNTs: Single-wall carbon nanotubes; ZnONPs: Zinc oxide nanoparticles; GO: Graphene oxide; AgNPs: Ag nanoparticles; Cu/CuONPs: Copper-based nanoparticles; CeO<sub>2</sub>NPs: Cesium dioxide nanoparticles; TiO<sub>2</sub>NPs: Titanium dioxide nanoparticles; Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>NPs: Iron oxide nanoparticles; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>NPs: Iron-based nanoparticles

生长的影响。然而环境中的ENMs未必能达到高剂量浓度, 因此应加强低剂量ENMs长期暴露对植物的生物学效应研究。当植物长期暴露在低剂量ENMs环境下, 会发生什么变化? 其子代生长是否会受到影响? 植物在基因和代谢水平上会发生什么变化? 这些方面研究相对较少, 亟待加强。后续, 我们需利用先进的分子生物学技术, 从基因组学、蛋白质组学和代谢组学水平解析纳米材料对植物物质合成、代谢及防御系统等的影 响, 为筛选抗性品种和评估纳米材料生态效应提供重要理论依据。

#### 4.3 研究ENMs在植物体内的吸收、转运和积累

为提高工程纳米材料在农业领域的有效利用, 探讨ENMs在植物(特别是维管植物)体内的行为特性非常必要。原因是一方面维管植物在生态系统中具有重要地位; 另一方面ENMs与土壤、空气和水生态系统密切相关, 并通过食物链的生物积累构成高等物种的主要暴露途径。众所周知, ENMs可通过叶面和根系被植物吸收, 进而在植物体内运输。但ENMs吸收-迁移的动态过程及其相关机制还需针对不同种类植物、不同纳米材料和不同生长介质等进行系统研究(Miralles

et al., 2012)。但采取何种有效方法示踪ENMs在植物体内的吸收和转运是目前面临的重大难题。采用单一技术不足以得到有效且可信的研究结果,采用荧光标记法、X射线显微镜和能量过滤式透射电镜等多种先进技术,观察ENMs在不同植物细胞内(或土壤环境中)的运输和积累情况(Ma et al., 2010a),明确ENMs在植物体内吸收、转运及改变植物生理生化过程的机制,进而从分子水平揭示ENMs对高等植物的生物学效应,对阐明ENMs的环境生态效应具有重要意义。

## 参考文献

- 曹际玲, 冯有智, 林先贵 (2016). 人工纳米材料对植物-微生物影响的研究进展. 土壤学报 **53**, 1–11.
- 陈娟妮, 蔡璘, 李石力, 杨亮, 丁伟 (2019). 纳米技术在植物病害防控中应用的研究进展. 植物保护学报 **46**, 142–150.
- 陈娟妮, 鲁梅, 丁伟 (2021). 纳米氧化锌对烟草疫霉菌的抑菌作用研究. 植物医生 **34**(2), 34–40.
- 郭敏 (2016). 典型人工纳米材料对水稻的植物毒性研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南大学. pp. 1–70.
- 金盛杨, 王玉军, 汪鹏, 李连祯, 周东美 (2010). 不同培养基中纳米氧化铜对小麦毒性的影响. 生态毒理学报 **5**, 842–848.
- 兰丽贞, 赵群芬 (2012). 纳米TiO<sub>2</sub>在拟南芥中的富集、转运及对其生长和生理的影响. 环境科学学报 **38**, 837–846.
- 李晶, 郭亮, 崔海信, 崔博, 刘国强 (2020). 纳米农药在植物中的吸收转运研究进展. 植物学报 **55**, 513–528.
- 孙耀琴, 申聪聪, 葛源 (2016). 典型纳米材料的土壤微生物效应研究进展. 生态毒理学报 **11**(5), 2–13.
- 汪玉洁, 陈日远, 刘厚诚, 宋世威, 孙光闻 (2017). 纳米材料在农业上的应用及其对植物生长和发育的影响. 植物生理学报 **53**, 933–942.
- 叶青, 闫晓燕, 陈慧泽, 冯金林, 韩榕 (2022). 氮掺杂石墨烯量子点对拟南芥主根生长方向的影响. 植物学报 **57**, 623–634.
- 张海, 彭程, 杨建军, 施积炎 (2013). 金属型纳米颗粒对植物的生态毒理效应研究进展. 应用生态学报 **24**, 885–892.
- 庄文, 陈青, 周凤霞 (2016). 水环境中工程纳米颗粒物的生态毒理学机理及理想模式生物的筛选. 生态学报 **36**, 5956–5966.
- Abdel Latef AAH, Srivastava AK, El-sadek MSA, Kordrostami M, Tran LSP (2018). Titanium dioxide nanoparticles improve growth and enhance tolerance of broad bean plants under saline soil conditions. *Land Degrad Dev* **29**, 1065–1073.
- Aghdam MTB, Mohammadi H, Ghorbanpour M (2016). Effects of nanoparticulate anatase titanium dioxide on physiological and biochemical performance of *Linum usitatissimum* (Linaceae) under well-watered and drought stress conditions. *Braz J Bot* **39**, 139–146.
- Alharby HF, Metwali EMR, Fuller MP, Aldhebiani AY (2016). The alteration of mRNA expression of SOD and GPX genes, and proteins in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) under stress of NaCl and/or ZnO nanoparticles. *Saudi J Biol Sci* **23**, 773–781.
- Alidoust D, Isoda A (2013). Effect of  $\gamma$ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on photosynthetic characteristic of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.): foliar spray versus soil amendment. *Acta Physiol Plant* **35**, 3365–3375.
- Almeelbi T, Bezbaruah A (2014). Nanoparticle-sorbed phosphate: iron and phosphate bioavailability studies with *Spinacia oleracea* and *Selenastrum capricornutum*. *ACS Sustain Chem Eng* **2**, 1625–1632.
- Anjum NA, Singh N, Singh MK, Shah ZA, Duarte AC, Pereira E, Ahmad I (2013). Single-bilayer graphene oxide sheet tolerance and glutathione redox system significance assessment in faba bean (*Vicia faba* L.). *J Nanopart Res* **15**, 1770.
- Asli S, Neumann PM (2009). Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant Cell Environ* **32**, 577–584.
- Begum P, Fugetsu B (2012). Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes on red spinach (*Amaranthus tricolor* L.) and the role of ascorbic acid as an antioxidant. *J Hazard Mater* **243**, 212–222.
- Begum P, Ikhtiar R, Fugetsu B (2011). Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce. *Carbon* **49**, 3907–3919.
- Begum P, Ikhtiar R, Fugetsu B, Matsuoka M, Akasaka T, Watari F (2012). Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes assessed by selected plant species in the seedling stage. *Appl Surf Sci* **262**, 120–124.
- Burman U, Saini M, Praveen-Kumar (2013). Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicol Environ Chem* **95**, 605–612.
- Cañas JE, Long M, Nations S, Vadan R, Dai L, Luo MX, Ambikapathi R, Lee EH, Olszyk D (2008). Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environ Toxicol Chem* **27**, 1922–1931.

- Carpita NC, Gibeaut DM** (1993). Structural models of primary cell walls in flowering plants: consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth. *Plant J* **3**, 1–30.
- Chakravarty D, Erande MB, Late DJ** (2015). Graphene quantum dots as enhanced plant growth regulators: effects on coriander and garlic plants. *J Sci Food Agric* **95**, 2772–2778.
- Chen JN, Yang L, Li SL, Ding W** (2018). Various physiological response to graphene oxide and amine-functionalized graphene oxide in wheat (*Triticum aestivum*). *Molecules* **23**, 1104.
- Chen LY, Wang CL, Yang SN, Guan S, Zhang QQ, Shi MY, Yang ST, Chen CY, Chang XL** (2019). Chemical reduction of graphene enhances *in vivo* translocation and photosynthetic inhibition in pea plants. *Environ Sci Nano* **6**, 1077–1088.
- Cheng F, Liu YF, Lu GY, Zhang XK, Xie LL, Yuan CF, Xu BB** (2016). Graphene oxide modulates root growth of *Brassica napus* L. and regulates ABA and IAA concentration. *J Plant Physiol* **193**, 57–63.
- Cui D, Zhang P, Ma YH, He X, Li YY, Zhang J, Zhao YC, Zhang ZY** (2014). Effect of cerium oxide nanoparticles on asparagus lettuce cultured in an agar medium. *Environ Sci Nano* **1**, 459–465.
- Dimkpa CO, McLean JE, Latta DE, Manangón E, Britt DW, Johnson WP, Boyanov MI, Anderson AJ** (2012). CuO and ZnO nanoparticles: phytotoxicity, metal speciation, and induction of oxidative stress in sand-grown wheat. *J Nanopart Res* **14**, 1125.
- Du WC, Sun YY, Ji R, Zhu JG, Wu JC, Guo HY** (2011). TiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles negatively affect wheat growth and soil enzyme activities in agricultural soil. *J Environ Monit* **13**, 822–828.
- Elshayb OM, Farroh KY, Amin HE, Atta AM** (2021). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: fortification for rice grain yield and nutrients uptake enhancement. *Molecules* **26**, 584.
- Falco WF, Scherer MD, Oliveira SL, Wender H, Colbeck I, Lawson T, Caires ARL** (2020). Phytotoxicity of silver nanoparticles on *Vicia faba*: evaluation of particle size effects on photosynthetic performance and leaf gas exchange. *Sci Total Environ* **701**, 134816.
- Frazier TP, Burklew CE, Zhang BH** (2014). Titanium dioxide nanoparticles affect the growth and microRNA expression of tobacco (*Nicotiana tabacum*). *Funct Integr Genomics* **14**, 75–83.
- Gao FQ, Hong FS, Liu C, Zheng L, Su MY, Wu X, Yang F, Wu C, Yang P** (2006). Mechanism of nano-anatase TiO<sub>2</sub> on promoting photosynthetic carbon reaction of spinach. *Biol Trace Elem Res* **111**, 239–253.
- Gao JG, Xu GD, Qian HH, Liu P, Zhao P, Hu Y** (2013). Effects of nano-TiO<sub>2</sub> on photosynthetic characteristics of *Ulmus elongata* seedlings. *Environ Pollut* **176**, 63–70.
- García-Gómez C, Obrador A, González D, Babin M, Fernández MD** (2018). Comparative study of the phytotoxicity of ZnO nanoparticles and Zn accumulation in nine crops grown in a calcareous soil and an acidic soil. *Sci Total Environ* **644**, 770–780.
- Ghodake G, Seo YD, Park D, Lee DS** (2010). Phytotoxicity of carbon nanotubes assessed by *Brassica juncea* and *Phaseolus mungo*. *J Nanoelectron Optoe* **5**, 157–160.
- Ghosh M, Bandyopadhyay M, Mukherjee A** (2010). Genotoxicity of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles at two trophic levels: plant and human lymphocytes. *Chemosphere* **81**, 1253–1262.
- Gui X, Zhang ZY, Liu ST, Ma YH, Zhang P, He X, Li YY, Zhang J, Li HF, Rui YK, Liu LM, Cao WD** (2015). Fate and phytotoxicity of CeO<sub>2</sub> nanoparticles on lettuce cultured in the potting soil environment. *PLoS One* **10**, e0134261.
- Haghighi M, da Silva JAT** (2014). The effect of N-TiO<sub>2</sub> on tomato, onion, and radish seed germination. *J Crop Sci Biotechnol* **17**, 221–227.
- Hao Y, Yu FF, Lv RT, Ma CX, Zhang ZT, Rui YK, Liu LM, Cao WD, Xing BS** (2016). Carbon nanotubes filled with different ferromagnetic alloys affect the growth and development of rice seedlings by changing the C:N ratio and plant hormones concentrations. *PLoS One* **11**, e0157264.
- Hasanpour H, Maali-Amir R, Zeinali H** (2015). Effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on metabolic limitations to photosynthesis under cold in chickpea. *Russ J Plant Physiol* **62**, 779–787.
- Hong FS, Zhou J, Liu C, Yang F, Wu C, Zheng L, Yang P** (2005). Effect of nano-TiO<sub>2</sub> on photochemical reaction of chloroplasts of spinach. *Biol Trace Elem Res* **105**, 269–279.
- Hotze EM, Phenrat T, Lowry GV** (2010). Nanoparticle aggregation: challenges to understanding transport and reactivity in the environment. *J Environ Qual* **39**, 1909–1924.
- Hu XG, Lu KC, Mu L, Kang J, Zhou QX** (2014). Interactions between graphene oxide and plant cells: regulation of cell morphology, uptake, organelle damage, oxidative effects and metabolic disorders. *Carbon* **80**, 665–676.
- Hu XG, Zhou QX** (2014). Novel hydrated graphene ribbon

- unexpectedly promotes aged seed germination and root differentiation. *Sci Rep* **4**, 3782.
- Iannone MF, Groppa MD, de Sousa ME, van Raap MBF, Benavides MP** (2016). Impact of magnetite iron oxide nanoparticles on wheat (*Triticum aestivum* L.) development: evaluation of oxidative damage. *Environ Exp Bot* **131**, 77–88.
- Jeyasubramanian K, Thoppey UUG, Hikku GS, Selvakumar N, Subramania A, Krishnamoorthy K** (2016). Enhancement in growth rate and productivity of spinach grown in hydroponics with iron oxide nanoparticles. *RSC Adv* **6**, 15451–15459.
- Jordan JT, Oates RP, Subbiah S, Payton PR, Singh KP, Shah SA, Green MJ, Klein DM, Cañas-Carrell JE** (2020). Carbon nanotubes affect early growth, flowering time and phytohormones in tomato. *Chemosphere* **256**, 127042.
- Joško I** (2019). Copper and zinc fractionation in soils treated with CuO and ZnO nanoparticles: the effect of soil type and moisture content. *Sci Total Environ* **653**, 822–832.
- Joško I, Oleszczuk P** (2013). Influence of soil type and environmental conditions on ZnO, TiO<sub>2</sub> and Ni nanoparticles phytotoxicity. *Chemosphere* **92**, 91–99.
- Ke MJ, Ye YZ, Zhang ZY, Gillings M, Qu Q, Xu NH, Xu LS, Lu T, Wang JD, Qian HF** (2021). Synergistic effects of glyphosate and multiwall carbon nanotubes on *Arabidopsis thaliana* physiology and metabolism. *Sci Total Environ* **769**, 145156.
- Khalofah A, Kilany M, Migdadi H** (2021). Phytostimulatory influence of *Comamonas testosteroni* and silver nanoparticles on *Linum usitatissimum* L. under salinity stress. *Plants* **10**, 790.
- Khodakovskaya M, Dervishi E, Mahmood M, Xu Y, Li ZR, Watanabe F, Biris AS** (2009). Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano* **3**, 3221–3227.
- Khodakovskaya MV, de Silva K, Nedosekin DA, Dervishi E, Biris AS, Shashkov EV, Galanzha EI, Zharov VP** (2011). Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions. *Proc Natl Acad Sci USA* **108**, 1028–1033.
- Khodakovskaya MV, Kim BS, Kim JN, Alimohammadi M, Dervishi E, Mustafa T, Cernigla CE** (2013). Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small* **9**, 115–123.
- Krishnaraj C, Jagan EG, Ramachandran R, Abirami SM, Mohan N, Kalaichelvan PT** (2012). Effect of biologically synthesized silver nanoparticles on *Bacopa monnieri* (Linn.) Wettst. plant growth metabolism. *Process Biochem* **47**, 651–658.
- Kurepa J, Paunesku T, Vogt S, Arora H, Rabatic BM, Lu JJ, Wanzer MB, Woloschak GE, Smalle JA** (2010). Uptake and distribution of ultrasmall anatase TiO<sub>2</sub> alizarin red S nanoconjugates in *Arabidopsis thaliana*. *Nano Lett* **10**, 2296–2302.
- Lahiani MH, Dervishi E, Chen JH, Nima Z, Gaume A, Biris AS, Khodakovskaya MV** (2013). Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops. *ACS Appl Mater Interfaces* **5**, 7965–7973.
- Larue C, Castillo-Michel H, Sobanska S, Cécillon L, Bureau S, Barthès V, Ouedane L, Carrière M, Sarret G** (2014). Foliar exposure of the crop *Lactuca sativa* to silver nanoparticles: evidence for internalization and changes in Ag speciation. *J Hazard Mater* **264**, 98–106.
- Le Van N, Ma CX, Shang JY, Rui YK, Liu ST, Xing BS** (2016). Effects of CuO nanoparticles on insecticidal activity and phytotoxicity in conventional and transgenic cotton. *Chemosphere* **144**, 661–670.
- Lee WM, An YJ, Yoon H, Kweon HS** (2008). Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): plant agar test for water-insoluble nanoparticles. *Environ Toxicol Chem* **27**, 1915–1921.
- Lee WM, Kwak JI, An YJ** (2012). Effect of silver nanoparticles in crop plants *Phaseolus radiatus* and *Sorghum bicolor*: media effect on phytotoxicity. *Chemosphere* **86**, 491–499.
- Li JL, Hu J, Ma CX, Wang YQ, Wu C, Huang J, Xing BS** (2016). Uptake, translocation and physiological effects of magnetic iron oxide ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles in corn (*Zea mays* L.). *Chemosphere* **159**, 326–334.
- Li JL, Hu J, Xiao L, Gan QL, Wang YQ** (2017). Physiological effects and fluorescence labeling of magnetic iron oxide nanoparticles on citrus (*Citrus reticulata*) seedlings. *Water Air Soil Poll* **228**, 52.
- Li MS, Zhang P, Adeel M, Guo ZL, Chetwynd AJ, Ma CX, Bai TH, Hao Y, Rui YK** (2021). Physiological impacts of zero valent iron, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles in rice plants and their potential as Fe fertilizers. *Environ Pollut* **269**, 116134.
- Lin DH, Xing BS** (2008). Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environ Sci Technol* **42**, 5580–5585.

- Liu SJ, Wei HM, Li ZY, Li S, Yan H, He Y, Tian ZH (2015). Effects of graphene on germination and seedling morphology in rice. *J Nanosci Nanotechnol* **15**, 2695–2701.
- López-Moreno ML, de la Rosa G, Hernández-Viezcas JA, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL (2010). X-ray absorption spectroscopy (XAS) corroboration of the uptake and storage of CeO<sub>2</sub> nanoparticles and assessment of their differential toxicity in four edible plant species. *J Agric Food Chem* **58**, 3689–3693.
- Lv ZY, Sun HD, Du W, Li RY, Mao H, Kopittke PM (2021). Interaction of different-sized ZnO nanoparticles with maize (*Zea mays*): accumulation, biotransformation and phytotoxicity. *Sci Total Environ* **796**, 148927.
- Ma XM, Geiser-Lee J, Deng Y, Kolmakov A (2010a). Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: phytotoxicity, uptake and accumulation. *Sci Total Environ* **408**, 3053–3061.
- Ma YH, Kuang LL, He X, Bai W, Ding YY, Zhang ZY, Zhao YL, Chai ZF (2010b). Effects of rare earth oxide nanoparticles on root elongation of plants. *Chemosphere* **78**, 273–279.
- Majumdar S, Peralta-Videa JR, Trujillo-Reyes J, Sun YP, Barrios AC, Niu GH, Flores-Margez JP, Gardea-Torresdey JL (2016). Soil organic matter influences cerium translocation and physiological processes in kidney bean plants exposed to cerium oxide nanoparticles. *Sci Total Environ* **569–570**, 201–211.
- Matras E, Gorczyca A, Pocięcha E, Przemieniecki SW, Oćwieja M (2022). Phytotoxicity of silver nanoparticles with different surface properties on monocots and dicots model plants. *J Soil Sci Plant Nutr* **22**, 1647–1664.
- Miralles P, Church TL, Harris AT (2012). Toxicity, uptake, and translocation of engineered nanomaterials in vascular plants. *Environ Sci Technol* **46**, 9224–9239.
- Mohammadi R, Maali-Amiri R, Abbasi A (2013). Effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on chickpea response to cold stress. *Biol Trace Elem Res* **152**, 403–410.
- Mondal A, Basu R, Das S, Nandy P (2011). Beneficial role of carbon nanotubes on mustard plant growth: an agricultural prospect. *J Nanopart Res* **13**, 4519–4528.
- Musante C, White JC (2012). Toxicity of silver and copper to *Cucurbita pepo*: differential effects of nano and bulk-size particles. *Environ Toxicol* **27**, 510–517.
- Nair PMG, Chung IM (2014a). A mechanistic study on the toxic effect of copper oxide nanoparticles in soybean (*Glycine max* L.) root development and lignification of root cells. *Biol Trace Elem Res* **162**, 342–352.
- Nair PMG, Chung IM (2014b). Impact of copper oxide nanoparticles exposure on *Arabidopsis thaliana* growth, root system development, root lignification, and molecular level changes. *Environ Sci Pollut Res Int* **21**, 12709–12722.
- Nair PMG, Kim SH, Chung IM (2014). Copper oxide nanoparticle toxicity in mung bean (*Vigna radiata* L.) seedlings: physiological and molecular level responses of *in vitro* grown plants. *Acta Physiol Plant* **36**, 2947–2958.
- Nie GL, Zhao J, He R, Tang YL (2020). CuO nanoparticle exposure impairs the root tip cell walls of *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Water Air Soil Poll* **231**, 324.
- Pakrashi S, Jain N, Dalai S, Jayakumar J, Chandrasekaran PT, Raichur AM, Chandrasekaran N, Mukherjee A (2014). *In vivo* genotoxicity assessment of titanium dioxide nanoparticles by *Allium cepa* root tip assay at high exposure concentrations. *PLoS One* **9**, e87789.
- Prasad TNKV, Sudhakar P, Sreenivasulu Y, Latha P, Munaswamy V, Reddy KR, Sreeprasad TS, Sajanlal PR, Pradeep T (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *J Plant Nutr* **35**, 905–927.
- Quah B, Musante C, White JC, Ma XM (2015). Phytotoxicity, uptake, and accumulation of silver with different particle sizes and chemical forms. *J Nanopart Res* **17**, 277.
- Raliya R, Nair R, Chavalmane S, Wang WN, Biswas P (2015). Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics* **7**, 1584–1594.
- Raliya R, Tarafdar JC (2013). ZnO nanoparticle biosynthesis and its effect on phosphorous-mobilizing enzyme secretion and gum contents in cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *Agric Res* **2**, 48–57.
- Rastogi A, Zivcak M, Sytar O, Kalaji HM, He XL, Mbarki S, Brestic M (2017). Impact of metal and metal oxide nanoparticles on plant: a critical review. *Front Chem* **5**, 78.
- Rico CM, Hong J, Morales MI, Zhao LJ, Barrios AC, Zhang JY, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL (2013a). Effect of cerium oxide nanoparticles on rice: a study involving the antioxidant defense system and *in vivo* fluorescence imaging. *Environ Sci Technol* **47**, 5635–5642.
- Rico CM, Majumdar S, Duarte-Gardea M, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *J Agric Food Chem* **59**, 3485–3498.
- Rico CM, Morales MI, McCreary R, Castillo-Michel H, Barrios AC, Hong J, Tafoya A, Lee WY, Varela-Rami-

- rez A, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL** (2013b). Cerium oxide nanoparticles modify the antioxidative stress enzyme activities and macromolecule composition in rice seedlings. *Environ Sci Technol* **47**, 14110–14118.
- Rizwan M, Ali S, Ali B, Adrees M, Arshad M, Hussain A, ur Rehman MZ, Waris AA** (2019). Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere* **214**, 269–277.
- Salehi H, De Diego N, Rad AC, Benjamin JJ, Trevisan M, Lucini L** (2021). Exogenous application of ZnO nanoparticles and ZnSO<sub>4</sub> distinctly influence the metabolic response in *Phaseolus vulgaris* L. *Sci Total Environ* **778**, 146331.
- Schlich K, Hund-Rinke K** (2015). Influence of soil properties on the effect of silver nanomaterials on microbial activity in five soils. *Environ Pollut* **196**, 321–330.
- Servin A, Elmer W, Mukherjee A, de la Torre-Roche R, Hamdi H, White JC, Bindraban P, Dimkpa C** (2015). A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *J Nanopart Res* **17**, 92.
- Shi JY, Peng C, Yang YQ, Yang JJ, Zhang H, Yuan XF, Chen YX, Hu TD** (2014). Phytotoxicity and accumulation of copper oxide nanoparticles to the Cu-tolerant plant *Elytzhia splendens*. *Nanotoxicology* **8**, 179–188.
- Song G, Gao Y, Wu H, Hou WH, Zhang CY, Ma HQ** (2012). Physiological effect of anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles on *Lemna minor*. *Environ Toxicol Chem* **31**, 2147–2152.
- Stampoulis D, Sinha SK, White JC** (2009). Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants. *Environ Sci Technol* **43**, 9473–9479.
- Sun LL, Wang YB, Wang RL, Wang RT, Zhang P, Ju Q, Xu J** (2020). Physiological, transcriptomic, and metabolomic analyses reveal zinc oxide nanoparticles modulate plant growth in tomato. *Environ Sci Nano* **7**, 3587–3604.
- Syu YY, Hung JH, Chen JC, Chuang HW** (2014). Impacts of size and shape of silver nanoparticles on *Arabidopsis* plant growth and gene expression. *Plant Physiol Biochem* **83**, 57–64.
- Tabatabaee S, Iranbakhsh A, Shamili M, Ardebili ZO** (2021). Copper nanoparticles mediated physiological changes and transcriptional variations in microRNA159 (miR159) and mevalonate kinase (MVK) in pepper; potential benefits and phytotoxicity assessment. *J Environ Chem Eng* **9**, 106151.
- Tarafdar JC, Raliya R, Mahawar H, Rathore I** (2014). Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agric Res* **3**, 257–262.
- Thuesombat P, Hannongbua S, Akasit S, Chadchawan S** (2014). Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. 'KDML 105') seed germination and seedling growth. *Ecotox Environ Safe* **104**, 302–309.
- Tiwari DK, Dasgupta-Schubert N, Cendejas LMV, Villegas J, Montoya LC, García SEB** (2014). Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: enhancement of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (*Zea mays*) and implications for nanoagriculture. *Appl Nanosci* **4**, 577–591.
- Tumburu L, Andersen CP, Rygielwicz PT, Reichman JR** (2015). Phenotypic and genomic responses to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles in *Arabidopsis germinants*. *Environ Toxicol Chem* **34**, 70–83.
- Velikova V, Petrova N, Kovács L, Petrova A, Koleva D, Tsonev T, Taneva S, Petrov P, Krumova S** (2021). Single-walled carbon nanotubes modify leaf micromorphology, chloroplast ultrastructure and photosynthetic activity of pea plants. *Int J Mol Sci* **22**, 4878.
- Venkatachalam P, Priyanka N, Manikandan K, Ganeshbabu I, Indiraarulsevi P, Geetha N, Muralikrishna K, Bhattacharya RC, Tiwari M, Sharma N, Sahi SV** (2017). Enhanced plant growth promoting role of phytochemicals coated zinc oxide nanoparticles with P supplementation in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Plant Physiol Biochem* **110**, 118–127.
- Villagarcia H, Dervishi E, de Silva K, Biris AS, Khodakovskaya MV** (2012a). Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants. *Small* **8**, 2328–2334.
- Villagarcia H, Dervishi E, de Silva K, Biris AS, Khodakovskaya MV** (2012b). Bioresponse to nanotubes: surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants. *Small* **8**, 2327–2327.
- Vishwakarma K, Shweta, Upadhyay N, Singh J, Liu SL, Singh VP, Prasad SM, Chauhan DK, Tripathi DK, Sharma S** (2017). Differential phytotoxic impact of plant mediated silver nanoparticles (AgNPs) and silver nitrate (AgNO<sub>3</sub>) on *Brassica* sp. *Front Plant Sci* **8**, 1501.
- Vithanage M, Seneviratne M, Ahmad M, Sarkar B, Ok YS** (2017). Contrasting effects of engineered carbon nanotubes on plants: a review. *Environ Geochem Health* **39**, 1421–1439.
- Waani SPT, Irum S, Gul I, Yaqoob K, Khalid MU, Ali MA,**

- Manzoo U, Noor T, Ali S, Rizwan M, Arshad M** (2021). TiO<sub>2</sub> nanoparticles dose, application method and phosphorous levels influence genotoxicity in rice (*Oryza sativa* L.), soil enzymatic activities and plant growth. *Ecotoxicol Environ Saf* **213**, 111977.
- Wan JP, Wang RT, Wang RL, Ju Q, Wang YB, Xu J** (2019). Comparative physiological and transcriptomic analyses reveal the toxic effects of ZnO nanoparticles on plant growth. *Environ Sci Technol* **53**, 4235–4244.
- Wang Q, Ebbs SD, Chen YS, Ma XM** (2013). Trans-generational impact of cerium oxide nanoparticles on tomato plants. *Metallomics* **5**, 753–759.
- Watson JL, Fang T, Dimkpa CO, Britt DW, McLean JE, Jacobson A, Anderson AJ** (2015). The phytotoxicity of ZnO nanoparticles on wheat varies with soil properties. *Biometals* **28**, 101–112.
- West JL, Halas NJ** (2003). Engineered nanomaterials for biophotonics applications: improving sensing, imaging, and therapeutics. *Annu Rev Biomed Eng* **5**, 285–292.
- Xiang L, Zhao HM, Li YW, Huang XP, Wu XL, Zhai T, Yuan Y, Cai QY, Mo CH** (2015). Effects of the size and morphology of zinc oxide nanoparticles on the germination of Chinese cabbage seeds. *Environ Sci Pollut Res Int* **22**, 10452.
- Yan L, Li PY, Zhao XP, Ji R, Zhao LJ** (2020). Physiological and metabolic responses of maize (*Zea mays*) plants to Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Sci Total Environ* **718**, 137400.
- Yang F, Hong FS, You WJ, Liu C, Gao FQ, Wu C, Yang P** (2006). Influence of nano-anatase TiO<sub>2</sub> on the nitrogen metabolism of growing spinach. *Biol Trace Elem Res* **110**, 179–190.
- Yang J, Cao WD, Rui YK** (2017). Interactions between nanoparticles and plants: phytotoxicity and defense mechanisms. *J Plant Interact* **12**, 158–169.
- Yang ZM, Deng CH, Wu YP, Dai ZG, Tang Q, Cheng CH, Xu Y, Hu R, Liu C, Chen XJ, Zhang XY, Li AL, Xiong XH, Su JG, Yan A** (2021). Insights into the mechanism of multi-walled carbon nanotubes phytotoxicity in *Arabidopsis* through transcriptome and m6A methylome analysis. *Sci Total Environ* **787**, 147510.
- Yin LY, Cheng YW, Espinasse B, Colman BP, Auffan M, Wiesner M, Rose J, Liu J, Bernhardt ES** (2011). More than the ions: the effects of silver nanoparticles on *Lolium multiflorum*. *Environ Sci Technol* **45**, 2360–2367.
- Yin LY, Colman BP, McGill BM, Wright JP, Bernhardt ES** (2012). Effects of silver nanoparticle exposure on germination and early growth of eleven wetland plants. *PLoS One* **7**, e47674.
- Yusefi-Tanha E, Fallah S, Rostamnejadi A, Pokhrel LR** (2020). Particle size and concentration dependent toxicity of copper oxide nanoparticles (CuONPs) on seed yield and antioxidant defense system in soil grown soybean (*Glycine max* cv. 'Kowsar'). *Sci Total Environ* **715**, 136994.
- Zaytseva O, Neumann G** (2016). Phytotoxicity of carbon nanotubes is associated with disturbances of zinc homeostasis. *Eur Chem Bull* **5**, 238–244.
- Zhang M, Gao B, Chen JJ, Li YC** (2015a). Effects of graphene on seed germination and seedling growth. *J Nanopart Res* **17**, 78.
- Zhang P, Ma YH, Liu ST, Wang GH, Zhang JZ, He X, Zhang J, Rui YK, Zhang ZY** (2017a). Phytotoxicity, uptake and transformation of nano-CeO<sub>2</sub> in sand cultured romaine lettuce. *Environ Pollut* **220**, 1400–1408.
- Zhang P, Zhang RR, Fang XZ, Song TQ, Cai XD, Liu HJ, Du ST** (2016). Toxic effects of graphene on the growth and nutritional levels of wheat (*Triticum aestivum* L.): short- and long-term exposure studies. *J Hazard Mater* **317**, 543–551.
- Zhang RC, Zhang HB, Tu C, Hu XF, Li LZ, Luo YM, Christie P** (2015b). Phytotoxicity of ZnO nanoparticles and the released Zn(II) ion to corn (*Zea mays* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.) during germination. *Environ Sci Pollut Res Int* **22**, 11109–11117.
- Zhang WL, Musante C, White JC, Schwab P, Wang Q, Ebbs SD, Ma XM** (2017b). Bioavailability of cerium oxide nanoparticles to *Raphanus sativus* L. in two soils. *Plant Physiol Biochem* **110**, 185–193.
- Zheng L, Hong FS, Lu SP, Liu C** (2005). Effect of nano-TiO<sub>2</sub> on strength of naturally aged seeds and growth of spinach. *Biol Trace Elem Res* **104**, 83–91.
- Zuverza-Mena N, Martínez-Fernández D, Du WC, Hernandez-Viezcas JA, Bonilla-Bird N, López-Moreno ML, Komárek M, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL** (2017). Exposure of engineered nanomaterials to plants: insights into the physiological and biochemical responses- a review. *Plant Physiol Biochem* **110**, 236–264.

## Research Progress on the Effects of Engineered Nanomaterials on Higher Plant Growth

Juanni Chen, Yunsong Zhu, Kun Song, Wei Ding\*

*Laboratory of Natural Product Pesticide, College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400716, China*

**Abstract** Due to their nanoscale effects and excellent physicochemical properties, engineering nanomaterials (ENMs) have been increasingly applied in various fields during the last decade. The biological effects of these ENMs on higher plants and the risk assessment of their ecological effects have become research hotspots. To comprehensively understand the effects of ENMs on higher plants in ecosystems, this paper reviews the effects of several ENMs (metal nanomaterials, metal oxide nanomaterials, carbon-based nanomaterials) on the growth of higher plants and their mechanisms. These ENMs could inhibit plant growth by reducing the seed germination rate, inducing relative reactive oxygen production, enhancing cell membrane permeability and directly damaging roots and can also promote plant growth by enhancing photosynthesis, increasing root activity, strengthening water absorption and enhancing plant metabolic enzyme activity. The influencing factors of ENMs on plant biological effects were further analyzed, including plant species, nanomaterial size and shape, nanomaterial surface characteristics, nanomaterial concentration and treatment time, and plant growth medium. Finally, based on the real soil environment, long-term and low-dose effects, and plant absorption and transportation, we propose the future research associated with the interaction between ENMs and higher plants, aiming to provide a reference for the efficient use of ENMs in agricultural production.

**Key words** engineering nanomaterials, higher plant, positive effects, phytotoxic effect, influence factor

**Chen JN, Zhu YS, Song K, Ding W** (2023). Research progress on the effects of engineered nanomaterials on higher plant growth. *Chin Bull Bot* **58**, 813–830.

---

\* Author for correspondence. E-mail: dingw@swu.edu.cn

(责任编辑: 孙冬花)