

## 氧化石墨烯对玉米幼苗生长及生理特征的影响

赵琳, 宋瑞瑞, 吴琦, 吴希, 云振宇

引用本文:

赵琳, 宋瑞瑞, 吴琦, 等. 氧化石墨烯对玉米幼苗生长及生理特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1167-1173.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1104>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 土施纳米氧化锌对蚯蚓生理和黄瓜幼苗生长的影响

杨静雅, 符倩, 张皓月, 彭晴晴, 钟民正, 毛晖

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 525-534 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1077>

### 纳米硫对铅胁迫下油菜幼苗生长和铅积累的影响

原海燕, 刘清泉, 张永侠, 符佳豪, 王银杰, 孙玉明, 佟海英

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 517-524 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0798>

### 镉/铬胁迫对谷子幼苗生长和NADPH氧化酶及抗氧化酶体系的影响

田保华, 张彦洁, 张丽萍, 马晓丽, 金竹萍, 刘志强, 刘旦梅, 裴雁曦

农业环境科学学报. 2016(2): 240-246 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.02.005>

### 草坪基质添加碳纳米材料对高羊茅生长和蚯蚓生理的影响

王彦力, 白雪, 多立安, 赵树兰

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 773-778 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0851>

### 铈对蚕豆幼苗光合特性和呼吸代谢的毒害机理

刘泽伟, 赖金龙, 李俊柯, 丁峰, 张宇, 罗学刚

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1916-1924 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0390>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵琳, 宋瑞瑞, 吴琦, 等. 氧化石墨烯对玉米幼苗生长及生理特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1167–1173.

ZHAO Lin, SONG Rui-rui, WU Qi, et al. Effect of graphene oxide on seedling growth and physiological characteristics of maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1167–1173.



开放科学 OSID

# 氧化石墨烯对玉米幼苗生长及生理特征的影响

赵琳, 宋瑞瑞, 吴琦, 吴希, 云振宇\*

(中国标准化研究院农业食品标准化研究所, 北京 100191)

**摘要:**为探究氧化石墨烯(GO)对玉米幼苗生长及生理特征的影响,采用水培试验,使用不同浓度的GO处理玉米幼苗,测定了玉米幼苗的生长状态、根部形态、叶绿素含量、抗氧化酶活性及丙二醛(MDA)含量等指标。结果表明:在培养9 d后,GO处理对玉米幼苗的生长具有一定的抑制作用,且随着GO浓度的增加抑制作用逐渐增强,在200 mg·L<sup>-1</sup>浓度时,主根根长与根冠比分别较对照(不添加GO)降低了79.8%和65.9%;随着GO处理浓度的增加,叶绿素含量呈现先上升后下降的趋势;GO处理的玉米幼苗根系组织中超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性并未出现明显变化,过氧化氢酶(CAT)活性与MDA含量随着GO浓度的增加而升高,在200 mg·L<sup>-1</sup>浓度时,分别较对照升高了187.5%和335.6%。研究表明,GO处理对玉米幼苗产生一定程度的氧化胁迫,影响各项生理生化指标,进而促使根部形态变化并抑制玉米幼苗的生长发育,尤其是在GO高浓度时,抑制效应更加显著。

**关键词:**氧化石墨烯;玉米幼苗;生长;生理特征;氧化胁迫

中图分类号:S513 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)06-1167-07 doi:10.11654/jaes.2020-1104

## Effect of graphene oxide on seedling growth and physiological characteristics of maize

ZHAO Lin, SONG Rui-rui, WU Qi, WU Xi, YUN Zhen-yu\*

(Institute of Agriculture and Food Standardization, China National Institute of Standardization, Beijing 100191, China)

**Abstract:** To investigate the effects of graphene oxide (GO) on the growth and physiological characteristics of maize, maize seedlings were treated with different concentrations of GO in hydroponic experiments. The growth status, root morphology, chlorophyll content, antioxidant enzyme activity, and malondialdehyde (MDA) content of the maize seedlings were determined. After 9 days of culture, GO treatment significantly inhibited the growth of maize seedlings in a concentration-dependent manner. When the GO concentration was 200 mg·L<sup>-1</sup>, the main root length and the root/shoot ratio decreased by 79.8% and 65.9%, respectively. With increasing GO concentration, chlorophyll content increased initially and then decreased. No significant differences were observed for superoxide-dismutase or peroxidase activities, whereas catalase (CAT) activity and MDA content increased with increasing GO concentration. When the GO concentration was 200 mg·L<sup>-1</sup>, CAT activity and MDA content increased by 187.5% and 335.6%, respectively. These results indicated that GO treatment induced a certain degree of oxidative stress on maize seedlings, which affected various physiological and biochemical indices, thus promoting root morphological changes and inhibiting their growth and development. This inhibitory effect was more significant at high GO concentrations.

**Keywords:** graphene oxide; maize seedling; growth; physiological characteristics; oxidative stress

收稿日期:2020-09-21 录用日期:2021-01-29

作者简介:赵琳(1987—),男,河南新郑人,博士,副研究员,从事生物技术标准化研究。E-mail:zhaolin@cnis.ac.cn

\*通信作者:云振宇 E-mail:yunzy@cnis.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划“合成生物学”重点专项(2019YFA0906200);中央级公益性科研院所基本科研业务费(562018Y-5949);国家市场监督管理总局科技计划项目(2019MK118)

Project supported: National Key R&D Program of China(2019YFA0906200); The Fundamental Research Funds for Central Public Welfare Research Institutes(562018Y-5949); The Science and Technology Program of SAMR(2019MK118)

纳米材料因其结构单元小、表面积大,在机械、光学、化学及生物学等方面具有良好的特性,在能源、电子、新材料、生物医学、组织工程等领域被广泛应用。近年来,由于植物纳米组学的发展,纳米材料的研究和应用延伸至农业,如纳米肥料、纳米农药、纳米土壤改良产品等,纳米材料的大量生产、加工、运输及应用,导致其不可避免的进入了环境生态系统<sup>[1-2]</sup>,不同程度地释放并积累于土壤中,影响植物微生态环境,干扰正常的物质代谢过程<sup>[3-5]</sup>。因此,纳米材料对植物生长的影响逐渐成为一门新兴的农业研究方向。

石墨烯(Graphene)是一种由碳原子以sp<sup>2</sup>杂化方式形成的六角型呈蜂巢晶格的二维碳纳米材料,是由英国曼彻斯特大学物理学家安德烈·盖姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫采用微机械剥离法从石墨中分离出来的<sup>[6]</sup>。基于不同的功能基团,石墨烯又衍生出氧化石墨烯、磺化石墨烯、荧光石墨烯等<sup>[7]</sup>。由于石墨烯及其衍生材料具有优异的物理性质,在农业中的应用不断被挖掘,已经涉及到农药、肥料、吸附剂等方面<sup>[8-10]</sup>。氧化石墨烯(GO)是在石墨烯蜂窝状晶格结构的基础上,表面连接羧基、环氧基、羟基、羰基、酯基等含氧官能团,其具有较高的亲水性和表面活性,在催化、储能、过滤等方面具有广阔的应用空间<sup>[11-15]</sup>。随着GO的大量生产及在环保、农业生产等领域中的研究和应用,其废物最终会进入到土壤中,并随着地表径流和降水等水流在土壤中迁移,从而影响地下水、土壤微生物、土壤动物、土壤植物等<sup>[16-17]</sup>。

农作物的质量和安全与人体健康息息相关,因此GO的生物学效应得到了广泛关注,大量研究发现其对多种农作物的生长发育均有不同程度的影响。Chen等<sup>[18]</sup>研究了0~2 000  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度下GO对小麦幼苗萌发和生长的影响,结果表明在125  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和250  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度时,GO对小麦幼苗的根生长具有不同程度的促进作用,而当GO浓度在1 000  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 以上时,则对小麦幼苗的生长表现出明显的抑制作用,且抑制作用随着浓度的增加而增大,2 000  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度下小麦幼苗根部的表皮细胞和皮层细胞出现显著的崩解和疏松,大部分细胞破裂,且根表面吸附有石墨烯,对植物组织结构有显著损伤;Park等<sup>[19]</sup>研究发现适量的GO对拟南芥生长有积极的影响,可以增加根的长度和叶的数量,促进花芽的形成,同时GO还会影响西瓜的成熟度,增加西瓜的周长和糖分含量;还有研究发现GO能够促进甘蓝型油菜种子的萌发,

并显著影响幼苗的生长发育<sup>[20]</sup>。玉米是优良的粮食作物,其营养价值较高,在我国各个地区都有种植。GO是否对玉米的生长发育有影响,目前还没有确切的结论。本研究以玉米幼苗作为供试植物,检测分析了不同浓度的GO对玉米生长状态、光合作用及酶活力的影响,旨在为石墨烯材料的毒性评价、生态环境效应等提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究材料

GO分散液采购于江苏先丰纳米材料科技有限公司,为黑色或褐色液体,厚度为1~6层(TEM),片径0.5~5  $\mu\text{m}$ (TEM),浓度10  $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。玉米种子采购于北京大京九农业开发有限公司,品种为郑单958,种子发芽率大于90%。

### 1.2 试验处理

选择籽粒饱满、大小均匀的玉米种子于1 000 mL烧杯中,用H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>对种子消毒10 min,蒸馏水冲洗3遍,将种子放置到铺有湿润纱布的培养皿中发芽,每颗种子之间的距离约为3 cm,加水至玉米种子高度的1/2处,于室温黑暗条件下培养,90%的种子根长长到3~4 cm时,转移至1 000 mL的烧杯中水培,自然环境下培养24 h后分别转移至500 mL浓度为0(对照)、25、50、100、200  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的GO分散液中培养9 d,每种浓度GO溶液培养的玉米苗不少于8株,每个处理设3个重复。

### 1.3 生理指标的测量

将幼苗用GO处理9 d后,每个重复随机挑选5株幼苗用清水洗干净附着的GO,并用吸水纸轻轻擦干水分,测量主根根长、茎长和叶长,并测定根鲜质量和地上部分鲜质量。

### 1.4 电镜表征

取GO处理过的玉米幼苗的根部,用蒸馏水冲洗干净,再用pH7.2的磷酸缓冲液(PBS)冲洗3次,将根系分散于2.5%的戊二醛中,4℃下固定12 h,用PBS漂洗20 min完成固定,样品依次经过30%、50%、70%、80%、95%、100%的乙醇各20 min进行处理,再用浓度为100%的乙醇处理2次各20 min进行脱水,然后在乙醇:叔丁醇=1:1溶液处理20 min,纯叔丁醇30 min,再用纯叔丁醇重复1次,将样品放入-20℃的冰箱冷冻室30 min后,用冷冻干燥仪干燥样品约4 h,样品置于样品台上,喷金(120 s),用扫描电子显微镜观察(SEM,S-3400N,HITACHI,日本)。

## 1.5 生化指标测定

### 1.5.1 叶绿素含量测定

取叶片 0.2 g, 剪碎, 放置于 50 mL 离心管中, 加入 25 mL 95% 的乙醇, 封闭后避光放置 24 h 待叶片全部变白, 使用分光光度计检测 663、645 nm 处的吸光值 (A 值), 计算叶绿素 a (Ca)、叶绿素 b (Cb), 总叶绿素 (Ct) 的含量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 计算公式为:

$$\text{Ca} = (12.70A_{663} - 2.59A_{645}) \times V / 1\,000W$$

$$\text{Cb} = (22.88A_{645} - 4.67A_{663}) \times V / 1\,000W$$

$$\text{Ct} = (8.03A_{663} + 20.29A_{645}) \times V / 1\,000W$$

式中:  $A_{663}$ 、 $A_{645}$  分别为在波长 663、645 nm 处的吸光值;  $V$  为提取液的总体积, mL;  $W$  为叶片鲜质量, g。

### 1.5.2 酶活性测定

称取一定质量的根置于预冷的研钵中, 按 1:15 ( $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ) 的比例加入含有 1% ( $m/V$ ) 聚乙烯吡咯烷酮 (PVP) 和 0.2  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  乙二胺四乙酸 (EDTA) 的 PBS (pH 7.8) 溶液, 研磨至匀浆, 12 000  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、4  $^{\circ}\text{C}$  离心 30 min, 取上清液备用。

酶活性测定方法: 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑法, 过氧化氢酶 (CAT) 活性测定采用高锰酸钾滴定法, 过氧化物酶 (POD) 活性测定采用愈创木酚法。丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸法进行测定。

## 1.6 数据处理

所有试验结果以平均值  $\pm$  标准偏差表示。试验数据采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析, 作图软件为 Origin。

## 2 结果与分析

### 2.1 GO 对玉米幼苗生长的影响

从图 1 可以看出, GO 处理 9 d 后, 相对于对照组, 不同浓度 GO 处理的玉米幼苗根长、茎长和叶长均有不同程度的降低。GO 浓度为 25  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 玉米幼苗的总体生长减缓情况并不显著。而当 GO 浓度达到 50、100  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和 200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 玉米幼苗的主根根长相对于对照分别降低了 39.0%、67.6% 和 79.8%; 叶长分别降低了 15.9%、47.5% 和 49.0%。在 GO 浓度为 100  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和 200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 茎的伸长受到显著影响, 相对于对照分别降低 26.5% 和 32.0%。

同样, GO 处理 9 d 后玉米幼苗各部分的质量也呈现类似的变化 (图 2A)。尤其是根鲜质量, 随着 GO 浓度增加, 处理组相对于对照组依次有 39.3%、46.4%、71.4%、82.1% 的降低。根系生长受到抑制时, 根冠比

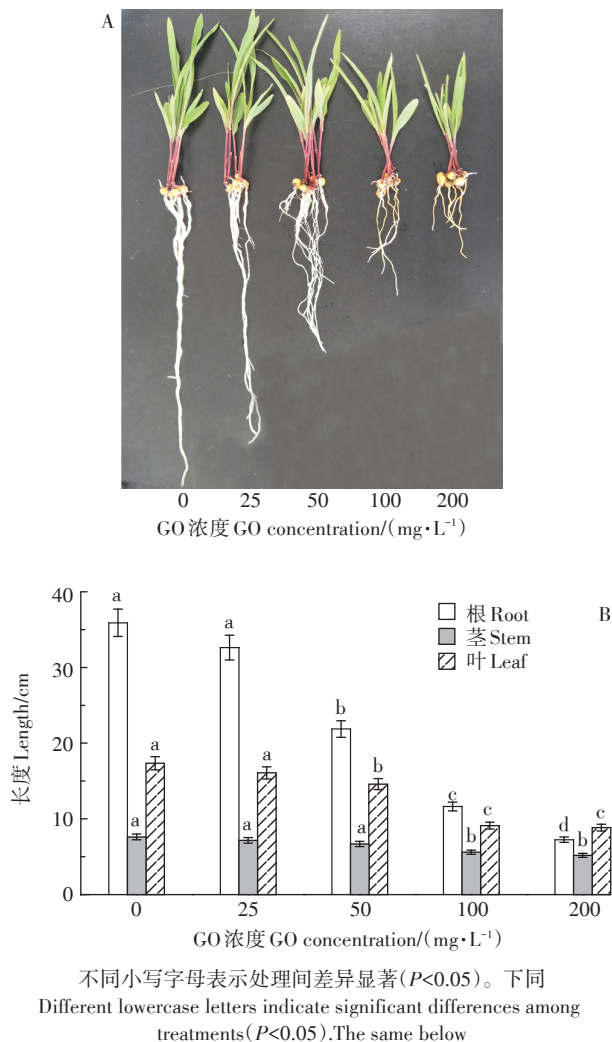


图 1 GO 处理对玉米幼苗根长、茎长与叶长的影响  
Figure 1 Effects of GO on maize seedling root length, stem length and leaf length

通常会表现出下降的趋势。如图 2B 所示, 在各浓度 GO 处理下, 玉米幼苗的根冠比与对照相比显著下降, 分别下降 29.3%、39%、53.7% 和 65.9%。这些结果表明 GO 在试验浓度范围内能抑制玉米幼苗的生长, 尤其在 GO 浓度超过 100  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 对玉米幼苗根部的生长抑制效果更加明显。

### 2.2 GO 对玉米幼苗根部形态的影响

使用 SEM 对玉米根系的表面结构进一步观察, 与对照组 (图 3A 和图 3B) 相比, 50  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  GO 处理 9 d 后, 玉米幼苗根尖未见明显结构变化 (图 3C), 成熟区部分表面光滑、有根毛 (图 3D), 总体上未见有明显损伤。而 200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  GO 处理组的玉米幼苗根尖部分有明显的结构变化, 根冠与分生区之间界限消失 (图 3E), 成熟区表面褶皱且破损, 出现明显的损伤痕

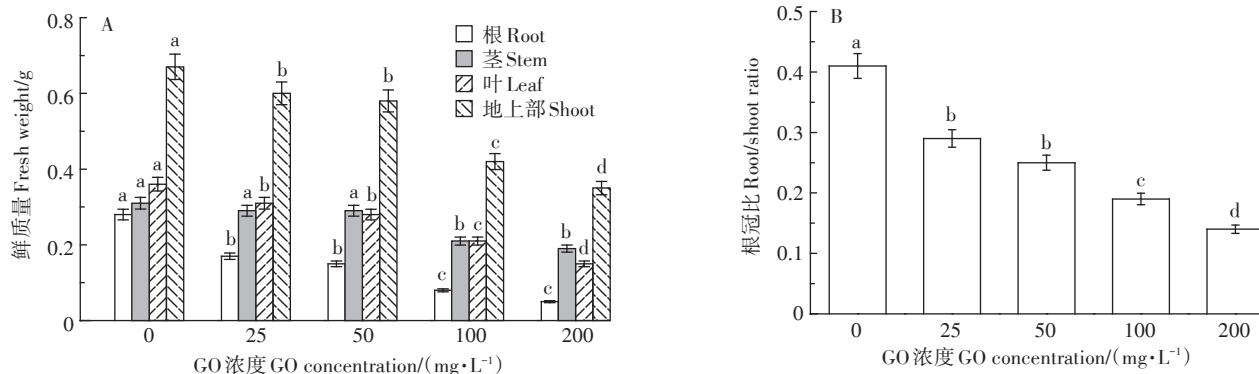
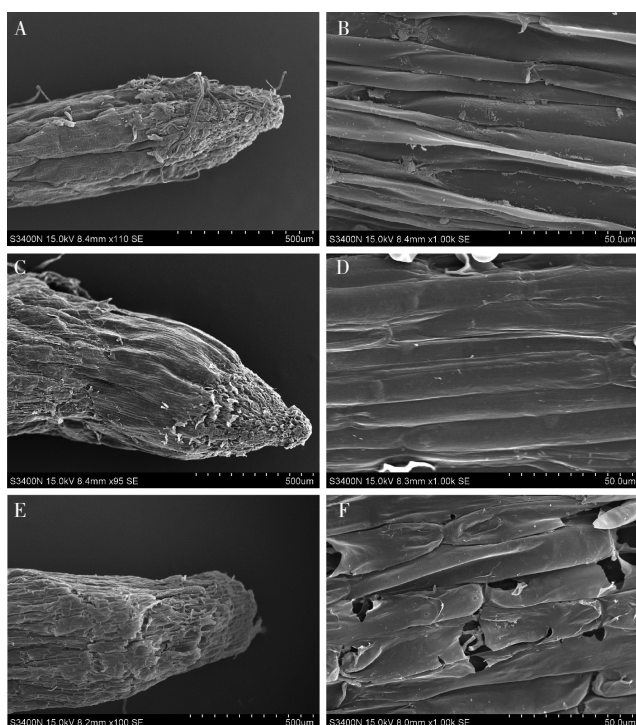


图2 GO处理对玉米幼苗鲜质量与根冠比的影响

Figure 2 Effects of GO on maize seedling weight and root/shoot ratio



A.×110倍:对照,根尖;B.×1 000倍:对照,成熟区;C.×95倍:50 mg·L<sup>-1</sup> GO处理,根尖;D.×1 000倍:50 mg·L<sup>-1</sup> GO处理,成熟区;E.×100倍:200 mg·L<sup>-1</sup> GO处理,根尖;F.×1 000倍:200 mg·L<sup>-1</sup> GO处理,成熟区  
A.×110 times: CK, root tip; B.×1 000 times: CK, maturation zone; C.×95 times: 50 mg·L<sup>-1</sup> GO treatment, root tip; D.×1 000 times: 50 mg·L<sup>-1</sup> GO treatment, maturation zone; E.×100 times: 200 mg·L<sup>-1</sup> GO treatment, root tip; F.×1 000 times: 200 mg·L<sup>-1</sup> GO treatment, maturation zone

图3 玉米幼苗根部的扫描电镜图

Figure 3 SEM images of maize seedling roots

迹(图3F)。SEM结果与生理指标测试结果相符,证实了高浓度的GO对玉米幼苗根部生长发育有明显影响。

### 2.3 GO对玉米幼苗光合作用的影响

叶绿素是高等植物进行光合作用的主要色素,主要有叶绿素a和叶绿素b两种。叶绿素含量会影响植

物的光反应,进而影响光合效率。如图4所示,Ca、Cb、Ct含量均随着GO浓度的增加表现出类似的规律,即先增加后降低。在25 mg·L<sup>-1</sup>时,Ca、Cb、Ct含量较对照分别增加18.5%、22.9%和20.0%,而当GO浓度达到200 mg·L<sup>-1</sup>时,各指标较对照分别下降了21.2%、8.6%和17.8%。总体来看,Ca、Cb、Ct含量水平只有在高浓度GO处理条件下才有所降低,表明高浓度的GO才会影响玉米幼苗叶绿素的合成。

### 2.4 GO对玉米幼苗根部SOD、POD和CAT活性的影响

SOD、POD和CAT是生物体内活性氧清除系统中重要的保护性酶。如图5A和图5B所示,不同GO浓度处理玉米幼苗9 d后,根部SOD和POD的活性较对照组均未发生显著变化。而CAT的活性随着GO浓度的增加出现了显著的升高趋势,尤其在100 mg·L<sup>-1</sup>和200 mg·L<sup>-1</sup>高浓度GO条件下,CAT活性分别升高145.8%和187.5%(图5C)。

### 2.5 GO对玉米幼苗根部MDA含量的影响

MDA是膜质过氧化作用的重要产物之一,通过测定MDA含量可评估脂质过氧化程度。MDA含量检测结果显示(图5D),随着GO处理浓度的升高,MDA含量也逐渐增加,在GO浓度为25、50、100 mg·L<sup>-1</sup>和200 mg·L<sup>-1</sup>时,相较于对照组MDA含量分别增加57.5%、158.9%、189.0%和335.6%。

## 3 讨论

石墨烯材料与植物的相互作用已经开始被广泛研究。但不同石墨烯材料的物理化学性质存在巨大差异,因此对植物生长的效应也有所不同<sup>[21]</sup>。已有研究表明石墨烯能够抑制黄瓜和玉米幼苗的生长,且随着石墨烯浓度及暴露时间的增加,毒性也明显增强<sup>[22]</sup>。低浓度磺化石墨烯(SG)能清除玉米幼苗根部

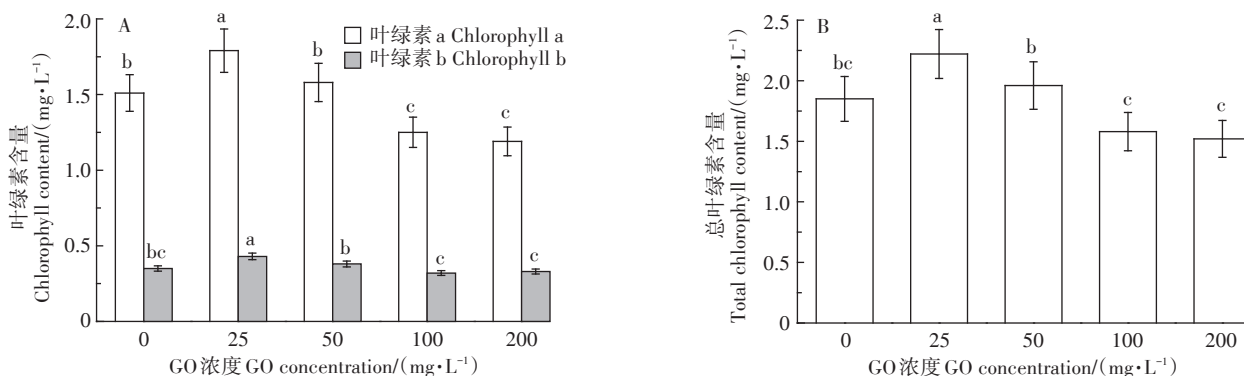


图4 GO对玉米幼苗叶绿素含量的影响

Figure 4 Effects of GO on maize seedling chlorophyll contents

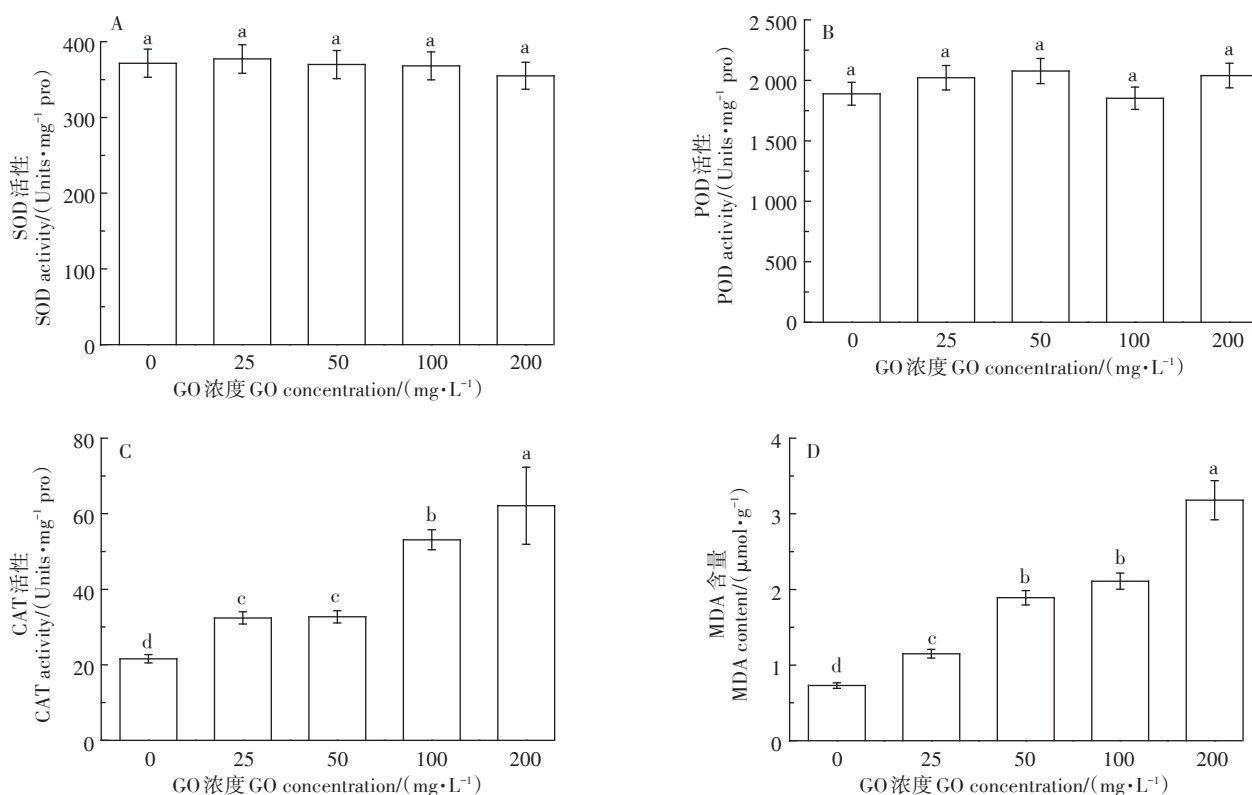


图5 GO处理对玉米幼苗酶活性与MDA含量的影响

Figure 5 Effects of GO on enzyme activity and MDA in maize seedlings

活性氧(ROS),提高幼苗的健康状态,而高浓度的SG则会促使根部ROS产生,导致细胞死亡<sup>[23]</sup>。胺功能化氧化石墨烯(G-NH<sub>2</sub>)的暴露引起了小麦幼苗根长与茎长的增加,促进了小麦的生长<sup>[18]</sup>。现阶段石墨烯材料对植物生长发育影响的研究主要集中在小麦、水稻、玉米、黄瓜、番茄等可食物上。关于GO对植物的影响大多表现为抑制作用,包括抑制种子的发芽、根的生长等。然而,由于植物种类和暴露浓度的不同,GO对某些植物的生长也表现出促进作用<sup>[24]</sup>。因

此,GO对植物生长效应的评价研究需要精确细分浓度梯度。本研究测试浓度范围内,GO能够抑制玉米幼苗根系的生长,降低根冠比,并随着浓度的升高,根部形态发生变化,出现明显的结构性损伤,生长抑制趋势更加显著。本研究所选试验浓度基于现有相关研究,接近实际的环境浓度,具有一定的现实意义。

叶绿素作为植物主要的光合色素,其含量反映了植物光合性能的强弱,而且在一定程度上能表征植物受逆境胁迫的状况<sup>[25-26]</sup>。叶绿素a、叶绿素b和总叶绿

素含量表现出类似的变化规律,即随着GO浓度的增加呈先上升后下降的趋势。本研究的试验结果说明25 mg·L<sup>-1</sup> GO处理在一定程度上能刺激光和色素的生成,GO浓度超过50 mg·L<sup>-1</sup>时,玉米幼苗的光合性能才会受到影响,高浓度的GO可能使叶绿体结构遭到破坏,从而限制了叶绿素的合成。这一结果与Hu等<sup>[27]</sup>发现200 mg·L<sup>-1</sup>石墨烯对植物叶绿素a和叶绿素b的合成有不利影响相一致。

目前,有关纳米材料的毒性机制,较为认可的是纳米材料能诱导植物产生过量的ROS,引起氧化胁迫和脂质过氧化,从而导致细胞膜破坏、DNA损伤,甚至细胞死亡<sup>[28-30]</sup>。面对氧化胁迫,植物会通过刺激抗氧化酶(SOD、POD、CAT)的活性来抵抗氧化应激,但在强氧化条件下,抗氧化系统一旦被破坏,抗氧化酶的活性也会降低<sup>[31]</sup>。石墨烯材料的植物毒性很可能也与氧化应激有关,Zhang等<sup>[32]</sup>的研究结果显示,在250~1 500 mg·L<sup>-1</sup>石墨烯浓度范围内,小麦叶片中SOD和POD活性有显著升高。GO诱导了高羊茅SOD、POD和CAT活性升高,同时产生膜质过氧化损伤,MDA含量增加<sup>[33]</sup>。

SOD、POD和CAT是植物在逆境条件下酶促防御反应系统的关键酶,能减轻活性氧对植物的伤害<sup>[34]</sup>。在测试的25~200 mg·L<sup>-1</sup> GO浓度范围内,玉米幼苗根部SOD和POD的活性较对照组并未出现显著变化,可能与石墨烯材料种类、暴露浓度及植物物种有关。CAT作为调节植物体内氧化还原动态平衡的重要酶,与抗逆性及氧化衰老等生理过程相关,在植物抗毒害方面起着重要作用<sup>[35]</sup>。本研究测试浓度范围内,CAT活性随着GO浓度的增加出现显著的升高趋势,CAT参与了抵抗GO胁迫。MDA作为膜质过氧化的标志物,其含量是一种重要的逆境生理指标<sup>[36-37]</sup>。玉米幼苗根部MDA含量与CAT活性有着类似的变化趋势,即随着GO浓度的增加而显著升高,表明玉米幼苗根系ROS大量产生,细胞膜的完整性遭受损伤,这与Ren等<sup>[23]</sup>高浓度碘化石墨烯处理玉米幼苗的结果相符。GO处理玉米幼苗产生的抑制效应可能是GO通过胞外覆盖、胞内氧化胁迫或者直接破坏细胞膜等方式对植物细胞产生危害<sup>[1,24]</sup>,但不同浓度GO对玉米幼苗产生不同效应的内在机制还不清楚,我们将在下一步的研究中针对相关信号通路及基因表达进行深入的研究与探讨,从而为石墨烯的毒性评价和生态环境效应提供基础资料和科学依据。

## 4 结论

(1)GO胁迫不同程度地抑制了玉米幼苗的生长,在25~200 mg·L<sup>-1</sup>浓度范围内,GO能够抑制玉米幼苗根系的生长、降低根冠比,并随着浓度的升高,抑制趋势更加显著。

(2)玉米幼苗叶绿素含量水平只有在浓度超过50 mg·L<sup>-1</sup>GO处理条件下才有所降低,表明较高浓度GO对叶绿素的合成有不利影响。

(3)不同GO浓度处理下,玉米幼苗根部SOD和POD的活性较对照组均未发生显著变化,而CAT的活性和MDA含量随着GO浓度增加而升高。

## 参考文献:

- [1] Dietz K J, Herth S. Plant nanotoxicology[J]. *Trends in Plant Science*, 2011, 16(11):582-589.
- [2] 李小康, 胡献刚, 周启星. 碳纳米颗粒诱发植物毒性效应及其机理的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11):2041-2047. LI Xiao-kang, HU Xian-gang, ZHOU Qi-xing. Research progress in phytotoxicity of carbon nanoparticles and its mechanisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11):2041-2047.
- [3] Hossain Z, Mustafa G, Komatsu S. Plant responses to nanoparticle stress[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2015, 16(11):26644-26653.
- [4] Yan S H, Zhao L, Li H, et al. Single-walled carbon nanotubes selectively influence maize root tissue development accompanied by the change in the related gene expression[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 246/247:110-118.
- [5] 高梦迪, 盛茂根, 傅籍锋. 纳米材料对植物生长发育的影响[J]. 生物技术通报, 2019, 35(7):172-180. GAO Meng-di, SHENG Mao-yin, FU Ji-feng. Effects of nanomaterials on plant growth and development[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(7):172-180.
- [6] Zhu Y W, Murali S, Cai W W, et al. Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(35):3906-3924.
- [7] Sanchez V C, Jachak A, Hurt R H, et al. Biological interactions of graphene-family nanomaterials: An interdisciplinary review[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2012, 25(1):15-34.
- [8] Wang X P, Xie H C, Wang Z Y, et al. Graphene oxide as a multifunctional synergist of insecticides against lepidopteran insect[J]. *Environmental Science: Nano*, 2019, 6:75-84.
- [9] 隋祺祺, 焦晨旭, 乔俊, 等. 石墨烯溶胶配施化肥对土壤中养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1):39-44. SUI Qi-qi, JIAO Chen-xu, QIAO Jun, et al. Effect of combined application of graphene solution and fertilizer on soil nutrient loss[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1):39-44.
- [10] 曹文杰, 徐俊晖, 王亚珍. 石墨烯及其复合材料吸附降解有机污染物的研究进展[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2017, 45(4):298-306. CAO Wen-jie, XU Jun-hui, WANG Ya-zhen. Research progress on adsorption and degradation of organic pollutant with graphene

- and its composite materials[J]. *Journal of Jiangnan University Natural Science Edition*, 2017, 45(4):298-306.
- [11] Amedea B S, Amauri J P, Renata de L, et al. Nanotoxicity of graphene and graphene oxide[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2014, 27(2):159-168.
- [12] Smith A T, LaChance A M, Zeng S, et al. Synthesis, properties and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites[J]. *Nano Materials Science*, 2019, 1(1):31-47.
- [13] Liu L, Gao B, Wu L, et al. Deposition and transport of graphene oxide in saturated and unsaturated porous media[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 229:444-449.
- [14] Chen Y, Yang R T, Tsamatsoulis D, et al. A new structural model for graphite oxide[J]. *Chemical Physics Letters*, 1998, 287:53-56.
- [15] Chen D, Feng H, Li J. Graphene oxide: Preparation, functionalization, and electrochemical applications[J]. *Chemical Reviews*, 2012, 112(11):6027-6053.
- [16] Kossoff D, Hudson-Edwards K A, Dubbin W E, et al. Incongruent weathering of Cd and Zn from mine tailings: A column leaching study[J]. *Chemical Geology*, 2011, 281(1/2):52-71.
- [17] Wang Y F. Nanogeochemistry: Nanostructures, emergent properties and their control on geochemical reactions and mass transfers[J]. *Chemical Geology*, 2014, 378:1-23.
- [18] Chen J N, Yang L, Li S L, et al. Various physiological response to graphene oxide and amine-functionalized graphene oxide in wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Molecules*, 2018, 23(5):1104.
- [19] Park S, Choi K S, Kim S, et al. Graphene oxide-Assisted promotion of plant growth and stability[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(4):758.
- [20] 吴金海, 焦靖芝, 谢伶俐, 等. 氧化石墨烯处理对甘蓝型油菜生长发育的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2015, 34(12):2738-2742.
- WU Jin-hai, JIAO Jing-zhi, XIE Ling-li, et al. Effects of graphene oxide on growth and development of *Brassica napus* L. [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2015, 34(12):2738-2742.
- [21] Zhang M, Gao B, Chen J J, et al. Effects of graphene on seed germination and seedling growth[J]. *J Nanopart Res*, 2015, 17:78.
- [22] 徐亚楠, 徐立娜. 石墨烯对高等植物幼苗的毒性及机理探究[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(1):220-229.
- XU Ya-nan, XU Li-na. Phytotoxicity of graphene to higher plants' seedlings and its mechanisms [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(1):220-229.
- [23] Ren W J, Chang H W, Teng Y. Sulfonated graphene-induced hormesis is mediated through oxidative stress in the roots of maize seedlings [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572:926-934.
- [24] 胡俊杰, 劳志朗, 吴康铭, 等. 氧化石墨烯的环境行为和毒性效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12):2169-2176.
- HU Jun-jie, LAO Zhi-lang, WU Kang-ming, et al. Research progress in environmental behavior and toxicity of graphene oxide[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2017, 26(12):2169-2176.
- [25] Hou H L, Zhao L, Zheng X K, et al. Dynamic changes in histone modification are associated with upregulation of *Hsf* and rRNA genes during heat stress in maize seedlings[J]. *Protoplasma*, 2019, 256(5):1245-1256.
- [26] Gu J F, Zhou Z X, Li Z K, et al. Rice (*Oryza sativa* L.) with reduced chlorophyll content exhibit higher photosynthetic rate and efficiency, improved canopy light distribution, and greater yields than normally pigmented plants[J]. *Field Crop Research*, 2017, 200:58-70.
- [27] Hu X G, Mu L, Kang J, et al. Humic acid acts as a natural antidote of graphene by regulating nanomaterial translocation and metabolic fluxes in vivo[J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(12):6919-6927.
- [28] 陈斌, 张传玲, 江红生, 等. 纳米银诱导拟南芥活性氧自由基的积累和抗氧化系统的改变[J]. 基因组学与应用生物学, 2017, 36(4):1646-1653.
- CHEN Bin, ZHANG Chuan-ling, JIANG Hong-sheng, et al. Silver nanoparticles induced accumulation of reactive oxygen species and alteration of antioxidant systems[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2017, 36(4):1646-1653.
- [29] Hu X G, Lu K C, Mu L, et al. Interactions between graphene oxide and plant cells: Regulation of cell morphology, uptake, organelle damage, oxidative effects and metabolic disorders[J]. *Carbon*, 2014, 80:665-676.
- [30] Yang J, Cao W D, Rui Y K, et al. Interactions between nanoparticles and plants: Phytotoxicity and defense mechanisms[J]. *Journal of Plant Interactions*, 2019, 12(1):158-169.
- [31] Verma S K, Das A K, Patel M K, et al. Engineered nanomaterials for plant growth and development: A perspective analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630:1413-1435.
- [32] Zhang P, Fang R R, Song X Z, et al. Toxic effects of graphene on the growth and nutritional levels of wheat (*Triticum aestivum* L.): Short- and long-term exposure studies[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 317:543-551.
- [33] 毛建越, 多立安, 赵树兰. 氧化石墨烯对草坪植物高羊茅生长及生理的影响[J]. 园艺学报, 2020, 47(10):1-8.
- MAO Jian-yue, DUO Li-an, ZHAO Shu-lan. Effects of graphene oxide on growth and physiological characteristics of *Festuca arundinacea* [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, 47(10):1-8.
- [34] Wang P, Zhao L, Hou H L, et al. Epigenetic changes are associated with programmed cell death induced by heat stress in seedling leaves of *Zea mays* [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2015, 56(6):965-976.
- [35] 付宇童, 孙彤, 王林, 等. 纳米铜对小油菜 (*Brassica chinensis* L.) 种子发芽和幼苗生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11):2524-2531.
- FU Yu-tong, SUN Tong, WANG Lin, et al. Effects of copper nanoparticles on seed germination and physiological and biochemical characteristics of *Brassica chinensis* L. [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11):2524-2531.
- [36] 王苗苗, 强沥文, 王伟, 等. 纳米二氧化钛对镉胁迫下小白菜毒性效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6):1185-1195.
- WANG Miao-miao, QIANG Li-wen, WANG Wei, et al. Effects of nano titanium dioxide on the toxicity of Chinese cabbage under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6):1185-1195.
- [37] 常海伟, 任文杰, 刘鸿雁, 等. 磺化石墨烯对小麦幼苗生长及生理生化指标的影响[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(4):123-128.
- CHANG Hai-wei, REN Wen-jie, LIU Hong-yan, et al. Effect of sulfonated graphene on seedling growth and physiological and biochemical indices of wheat[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, 10(4):123-128.