

# 氧化石墨烯对草坪植物高羊茅生长及生理的影响

毛建越, 多立安\*, 赵树兰\*

(天津师范大学生命科学学院, 天津市动植物抗性重点实验室, 天津 300387)

**摘要:** 为探究氧化石墨烯 (GO) 对草坪植物生长和生理的影响, 以高羊茅为试验材料, 采用盆栽方法在土壤中添加不同比例 (1%、2% 和 3%) GO, 研究了高羊茅幼苗生长及生理特性的变化。结果表明: GO 处理显著降低了高羊茅叶绿素和类胡萝卜素含量, 抑制了生物量的积累, 并且光合色素含量和生物量均随 GO 添加比例的增加而减少。与对照相比, 3% GO 处理一茬草生物量、总叶绿素和类胡萝卜素含量分别降低了 14.0%、25.8% 和 36.2%, 二茬草分别降低了 19.2%、25.6% 和 62.3%。GO 对丙二醛 (MDA) 含量和过氧化物酶 (POD) 活性的影响呈现出随 GO 比例的增加而升高的趋势, 而过氧化氢酶 (CAT) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性则先升高后降低, 最大值分别出现在 2% 和 1% GO 处理。因此, GO 的添加诱导高羊茅产生氧化胁迫, 抑制生长, 高剂量抑制作用更显著。

**关键词:** 高羊茅; 氧化石墨烯; 生理特性; 氧化胁迫

**中图分类号:** S 688.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2020) 10-2040-07

## Effects of Graphene Oxide on Growth and Physiological Characteristics of *Festuca arundinacea*

MAO Jianyue, DUO Li'an\*, and ZHAO Shulan\*

(College of Life Sciences, Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Effects of graphene oxide (GO) on the growth and physiological characteristics of turfgrass were studied by pot experiment. The *Festuca arundinacea* was planted in soil with three levels (1%, 2% and 3%) of GO added. The results showed that the contents of chlorophylls and carotenoids in *Festuca arundinacea* all significantly decreased under GO treatments, and the accumulation of dry weight was suppressed. The biomass and the contents of photosynthetic pigments decreased with the increase of GO treatment level. Compared with the control, the biomass, content of total chlorophylls and carotenoids were decreased by 14.0%, 25.8% and 36.2%, respectively in first harvest, and by 19.2%, 25.6% and 62.3%, respectively in the second harvest under 3% GO treatment. Increases of malondialdehyde (MDA) content and peroxidase (POD) activity were observed with the increment of GO treatment, while activities of catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) increased first and then decreased with the increase of GO level. The CAT and SOD activities reached the highest values in 2% and 1% GO treatment levels, respectively. Therefore, the addition of GO had induced the oxidative stress in *F. arundinacea*, inhibited

收稿日期: 2020-03-26; 修回日期: 2020-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31870484)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: tjnu@126.com, duolian\_tjnu@163.com)

plant growth, and the inhibition was more significant at the high treatment level.

**Keywords:** *Festuca arundinacea*; graphene oxide; physiological characteristic; oxidative stress

碳纳米材料一般指结构单元为 1 ~ 10 nm 的碳材料, 包括富勒烯 (fullere)、碳纳米管 (carbon nanotubes)、纳米金刚石 (nanodiamond)、石墨烯 (graphene)、纳米洋葱碳 (onion-like carbon)、纳米介孔碳 (mesoporous carbon) 等。与传统的碳材料相比, 碳纳米材料具有较高的机械强度、热稳定性、导电和导热能力 (Madannejad et al., 2019)。石墨烯是具片层结构的碳纳米材料 (Novoselov et al., 2004), 而氧化石墨烯 (graphene oxide, GO) 是石墨烯的一种衍生物, 在石墨烯的碳原子层表面和边界连接含氧官能团的新型纳米材料。氧化石墨烯具有比表面积大、吸附性强、力学强度大、光学特征独特等特性, 在光伏电池、传感器、涂料、生物医学、环境治理等领域得到广泛应用 (Smith et al., 2019)。随着新型碳纳米材料用量的急剧增加, 其不可避免地释放到环境中, 从而增加了其暴露的环境风险。因此, 氧化石墨烯等碳纳米材料对生态环境与人类健康的影响已经引起了科学家们的广泛关注 (Seabra et al., 2014)。

目前, 关于氧化石墨烯对生态环境的影响方面的研究在动物、植物和微生物中都有报道 (胡俊杰等, 2017)。相关研究报道, 氧化石墨烯能吸附在藻细胞的表面, 抑制光合作用, 通过与细胞表面的相互作用破坏细胞的完整性; 而且能进入到藻类细胞内部, 对细胞器结构造成损伤, 从而抑制细胞生长; 还能促进活性氧 (ROS) 的形成, 影响抗氧化酶活性, 造成代谢紊乱等 (张倩, 2015)。纳米材料具有大的比表面积, 接触后可使细胞活性氧增加, 从而增加细胞氧化应激, 并可能攻击 DNA、蛋白质和细胞膜, 导致细胞损伤 (Hu et al., 2014)。氧化石墨烯等碳纳米材料的边缘较为尖锐, 通过与细胞相互碰撞, 造成细胞膜受损, 从而破坏细胞的完整性 (Sengupta et al., 2019)。50 mg · L<sup>-1</sup> 氧化石墨烯会显著降低细胞活力并增加 DNA 损伤, 使细胞产生有害的 ROS (Jia et al., 2019)。王子英 (2017) 就 50 ~ 200 mg · L<sup>-1</sup> 的氧化石墨烯对小麦地上部和根生长的影响展开了研究, 结果表明, 暴露于氧化石墨烯污染下的作物根伸长抑制率和生长期根部和地上部生长抑制率随其浓度增加而增大。Shen 等 (2019) 研究了 0、5、15、25 和 50 mg · L<sup>-1</sup> 氧化石墨烯对 5 种水稻根系的影响, 发现 50 mg · L<sup>-1</sup> 氧化石墨烯减少了根长、根鲜质量和干质量。氧化石墨烯大小、暴露时间、剂量和植物种类的不同, 其影响程度也会有所不同。

目前, 关于氧化石墨烯对植物影响的研究多采用水培试验, 而将其添加到土壤中进行植物栽培试验研究鲜有报道。本研究中选择草坪草高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 为试验植物, 将氧化石墨烯以不同比例添加到土壤中, 通过测定生物量、叶绿素与类胡萝卜素含量、抗氧化酶活性和丙二醛含量, 来探讨其对高羊茅生长和生理特性的影响, 从而为氧化石墨烯的安全应用和风险评价提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与处理

试验用土取自校园内 0 ~ 20 cm 的表层土壤。其理化性质: pH 7.45, 含盐量 0.1%, 有机质 4.68%, 全氮 0.22%, 全钾 45.61%, 有效磷 22.03 mg · kg<sup>-1</sup>, 饱和含水量 0.56 mL · kg<sup>-1</sup>, 容重 0.87 g · cm<sup>-3</sup>。高羊茅种子购于江苏盐城震之越农产品经营部公司。氧化石墨烯购自苏州恒球石墨烯科技有限公司, 为褐黄色粉末, 平均厚度 3.4 ~ 7.0 nm, 片层直径 10 ~ 50 μm, 比表面积 100 ~ 300 m<sup>2</sup> · g<sup>-1</sup>。

选用直径 7 cm、高 8 cm 的塑料花盆，每盆装入 420 g 土壤，分别添加质量比 1%、2% 和 3% 氧化石墨烯，混合均匀，以不添加的为对照。每个处理 4 次重复（即 4 盆）。每盆播种 800 粒高羊茅种子进行室内培养。期间保证水分供应，使含水量保持在最大持水量的 60%。光照为透入室内的自然光，定期调换花盆位置，以确保每个花盆处于一致的光照条件下。培养期间的环境温度为 20 ~ 27 °C，相对湿度为 17% ~ 54%。在种植 50 d 和 120 d 时分别收获高羊茅一茬草和二茬草。

## 1.2 指标测定

生物量的测定：将高羊茅一茬草与二茬草用水清洗干净，并用滤纸吸干水分，在 108 °C 下杀青 20 min，80 °C 下烘干后称量，获得两茬草的生物量。

叶绿素和类胡萝卜素含量的测定：称取高羊茅叶片 0.2 g，剪碎后浸泡于 20 mL 丙酮与乙醇（体积比为 1:1）的混合溶液中，浸泡 24 h 至完全脱色。用分光光度计测定 663、645 和 470 nm 波长下的吸光值，计算叶绿素和类胡萝卜素的含量（张宪政，1992）。

抗氧化酶活性及丙二醛含量的测定：POD 活性采用愈创木酚法（Omran, 1980），以每 g 鲜质量每 min 使 OD<sub>470</sub> 增加 0.1 的酶量为 1 个酶活性单位；CAT 活性测定用紫外分光光度法（Singh et al., 2010），以每 g 鲜质量每 min 使 OD<sub>240</sub> 增加 0.1 的酶量为 1 个酶活性单位；SOD 活性的测定采用氯化硝基四氮唑蓝（NBT）光化还原法（Wang et al., 2014），以每 g 鲜质量抑制 NBT 光化还原 50% 为 1 个酶活性单位；MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸氧化法（Sundar et al., 2004）。

数据以平均值 ± 标准偏差表示。采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），并采用 Tukey 法进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同比例氧化石墨烯对高羊茅生物量的影响

如图 1 所示，随着氧化石墨烯（GO）添加比例的增加，两茬草的生物量均呈现下降趋势，1% GO 处理一茬草生物量与对照无显著差异，而 2% 和 3% GO 处理两茬草生物量均显著低于对照。与对照相比，2% GO 处理一茬草和二茬草生物量分别下降了 8.7% 和 16.6%；3% GO 处理分别下降了 14.0% 和 19.2%（ $P < 0.05$ ）。

### 2.2 不同比例氧化石墨烯对高羊茅叶绿素及类胡萝卜素含量的影响

如表 1 所示，随着 GO 添加比例的增加，高羊茅两茬草的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及类胡萝卜素含量均呈现出下降趋势，且与对照差异显著（ $P < 0.05$ ）。3% GO 处理光合色素含量最低，与对照相比，一茬草总叶绿素和类胡萝卜素含量分别降低了 25.8% 和 36.2%，二茬草分别降低了 25.6% 和 62.3%。两茬草之间比较，二茬草的光合色素含量明显低于一茬草，可能是二茬草受 GO 胁迫时间长的缘故，也与生长状况有关。

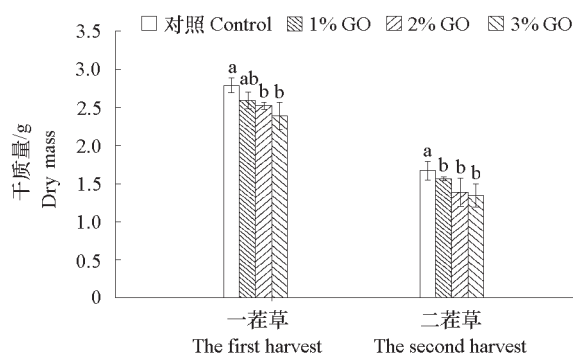


图 1 不同比例 GO 对高羊茅生物量的影响

Fig. 1 Effect of different proportions of GO on biomass of *Festuca arundinacea*  
 $P < 0.05$ .

表 1 不同比例 GO 对高羊茅两茬草叶绿素和类胡萝卜素含量的影响  
Table 1 Effects of different proportions of GO on the contents of chlorophyll and carotenoid in two harvest of *Festuca arundinacea*

高羊茅 <i>Festuca arundinacea</i>	GO/%	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Total chlorophyll	类胡萝卜素 Carotenoid
一茬草 The first harvest	0 (对照 Control)	1.290 ± 0.077 a	0.437 ± 0.029 a	1.726 ± 0.103 a	0.188 ± 0.014 a
	1	1.023 ± 0.100 b	0.337 ± 0.031 b	1.360 ± 0.131 b	0.144 ± 0.012 b
	2	0.970 ± 0.046 b	0.318 ± 0.024 b	1.290 ± 0.069 b	0.137 ± 0.003 b
	3	0.966 ± 0.077 b	0.314 ± 0.024 b	1.280 ± 0.100 b	0.120 ± 0.012 b
二茬草 The second harvest	0 (对照 Control)	0.884 ± 0.037 a	0.276 ± 0.018 a	1.161 ± 0.054 a	0.069 ± 0.004 a
	1	0.721 ± 0.018 b	0.223 ± 0.005 b	0.943 ± 0.023 b	0.064 ± 0.011 ab
	2	0.681 ± 0.015 bc	0.212 ± 0.005 b	0.893 ± 0.019 bc	0.053 ± 0.002 b
	3	0.653 ± 0.012 c	0.212 ± 0.012 b	0.864 ± 0.018 c	0.026 ± 0.005 c

注：表中不同小写字母表示同一茬草中不同 GO 处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences between the different GO treatments in the same harvest at the 0.05 level.

2.3 不同比例氧化石墨烯对高羊茅 MDA 含量和抗氧化酶活性的影响

如图 2 所示，高羊茅两茬草 MDA 含量均随 GO 添加比例的增加而升高。1% GO 处理与对照无显著差异；3% GO 处理 MDA 显著高于对照，与对照相比，一茬和二茬草分别增加了 22.9%和 75.0% ( $P < 0.05$ )。1%和 2% GO 处理的一茬草 SOD 显著高于对照，3% GO 处理的一茬草和各处理的二茬草与对照无显著差异。POD 活性随 GO 添加比例的增加而升高。1% GO 处理与对照无显著差异，2%和 3% GO 处理均显著高于对照，3% GO 处理一茬草和二茬草分别高出对照 22.9%和 47.8%。CAT 活性随 GO 比例增加而表现出先升高后降低的趋势。2% GO 处理一茬草和二茬草 CAT 活性分别高出对照 40.6%和 16.1%。

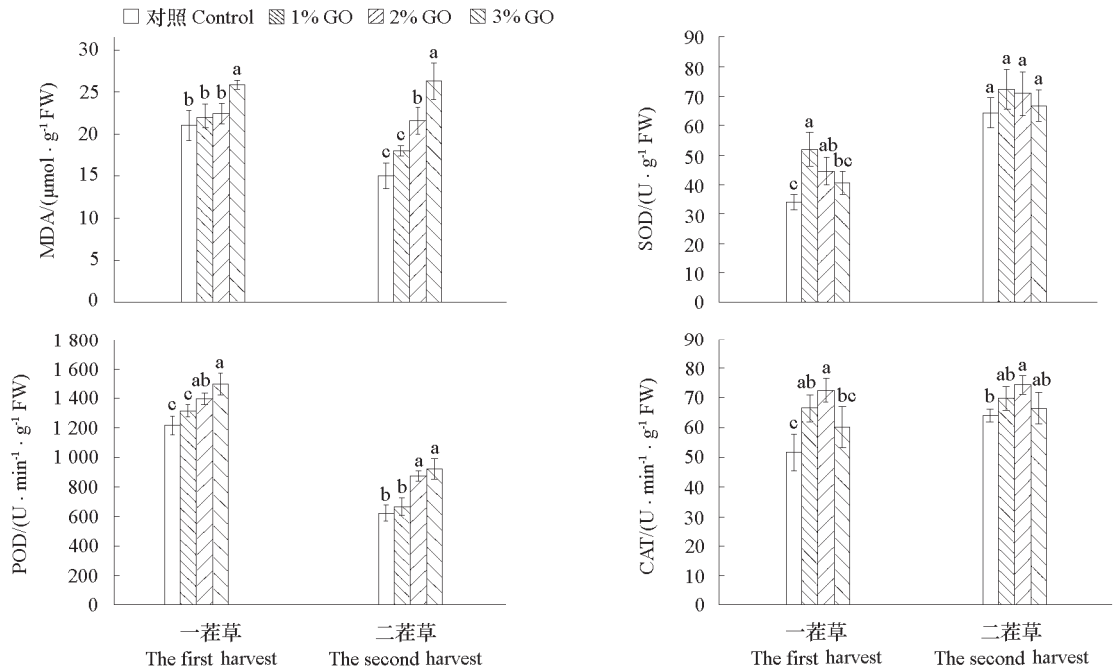


图 2 不同比例 GO 对高羊茅丙二醛含量和抗氧化酶活性的影响  
Fig. 2 Effect of different proportions of GO on MDA content and activity of protective enzymes of *Festuca arundinacea*  
 $P < 0.05$ .

### 3 讨论

叶绿素含量可以显示出植物光合作用的强度,能反映植物的生长情况。本研究表明,在所设定的比例范围内,氧化石墨烯处理高羊茅两茬草叶绿素及类胡萝卜素含量均显著下降,表明其抑制光合色素的合成。袁刚强等(2015)的研究表明,水稻幼苗叶绿素含量随着单壁碳纳米管材料浓度的增加而降低,认为单壁碳纳米管能穿透细胞而导致水稻叶绿素合成受阻。另有报道,5 mg · L<sup>-1</sup> 氧化石墨烯处理显著降低了眼虫藻叶绿素 a 含量(Hu et al., 2015)。Hu 等(2014)用氧化石墨烯纳米片处理植物细胞,发现其在细胞内积累,并且使叶绿体结构遭到破坏,推测其可能在高羊茅细胞内积累,破坏叶绿体结构从而影响叶绿素的合成,抑制光合作用。

本研究中发现,氧化石墨烯对高羊茅两茬草生物量具有一定的抑制作用。有研究报道,当浓度超过 500 mg · L<sup>-1</sup> 后,氧化石墨烯会显著抑制水稻幼苗根和叶的长度以及生物量,并且对叶的生长抑制作用更明显(杨婧雯和王莉琳,2019)。Miralles 等(2012)认为,纳米材料能够进入或附着于植物细胞,阻碍植物对营养物质的吸收利用而抑制其生长,导致地上生物量下降。王子英(2017)发现氧化石墨烯抑制了小麦的根生长,且随着浓度升高抑制率增大,可能是氧化石墨烯在植物根部大量吸附,影响了植物的根生长。绝大部分研究证实,碳纳米材料对植物生长发育有明显的抑制作用(李小康 等,2015),本研究结果与之一致。对植物生长的抑制可能是由碳纳米颗粒与植物细胞运输路径的物理作用导致的(Ma et al., 2010)。

SOD 是生物体内重要的抗氧化酶,能清除生物体内自由基,最先与超氧阴离子发生作用,把超氧阴离子歧化生成 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub>,所以 SOD 的诱导与植株体内超氧阴离子的含量有着密切关系;POD 和 CAT 能够清除植物体内产生的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,在抑制植物膜脂过氧化方面发挥着重要作用(Li et al., 2018)。本研究中,氧化石墨烯处理的高羊茅两茬草的 SOD 活性均增加,它的诱导说明植物体内产生了大量的超氧阴离子,并且氧化石墨烯处理的两茬草 POD 及 CAT 活性也均有所增加,表明引起了 ROS 的产生和积累,使高羊茅处于氧化胁迫下。Jiao 等(2016)发现,20 mg · L<sup>-1</sup> 的氧化石墨烯可使烟草根系的抗氧化酶活性增加。Chen 等(2017)的研究结果表明,1.0 mg · mL<sup>-1</sup> 氧化石墨烯可使小麦 CAT、POD 酶活性升高,抑制小麦的生长发育,认为与氧化石墨烯引起的氧化胁迫有关。本研究中发现 POD 活性随氧化石墨烯比例的增加呈上升趋势。有研究表明 POD 对植物具有双重作用,一方面可以在逆境初期发挥清除 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的作用;另一方面也可在逆境后期参与 ROS 生成、叶绿素降解,并能引发膜质过氧化作用(柯世省和杨敏文,2007)。本研究中,SOD 和 CAT 活性分别在 1%和 2% 氧化石墨烯处理达到最大,3%氧化石墨烯处理降低。这可能是由于植物积累了较多的氧化石墨烯,产生的 ROS 不能被清除,从而引起机体损伤(Chang et al., 2011; 李小康 等,2015)。当植物受到比较严重的胁迫时,大量的 ROS 超过抗氧化酶系统的清除能力,活性氧自由基就会在植物体内积累导致脂质过氧化损伤。而 MDA 是膜质过氧化作用的重要产物之一,其含量可表示膜质过氧化的损伤程度(常海伟 等,2015)。Zhang 等(2016)的研究结果表明,石墨烯诱导小麦根系产生氧化胁迫,MDA 含量增加。郭敏等(2016)也发现,暴露于多壁碳纳米管的水稻幼苗 MDA 含量与对照相比增加。Tan 等(2009)发现,碳纳米材料使植物体内 ROS 增多。本研究中也得到相似的结果,经氧化石墨烯处理后,高羊茅两茬草 MDA 含量增加,表明高羊茅受到了氧化胁迫。

总之,氧化石墨烯添加到土壤后,降低了高羊茅光合色素含量,抑制了植物生长,且随处理比例的增加抑制作用更大;氧化石墨烯诱导 SOD、POD 和 CAT 活性升高,同时使高羊茅产生膜质过氧化损伤,导致 MDA 含量增加。因此,应注意氧化石墨烯可能给环境带来的新的污染与风险。

## References

- Chang Hai-wei, Ren Wen-jie, Liu Hong-yan, Teng Ying, Li Li-na. 2015. Effect of sulfonated graphene on seedling growth and physiological and biochemical indices of wheat. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 10 (4): 123 – 128. (in Chinese)
- 常海伟, 任文杰, 刘鸿雁, 滕应, 李丽娜. 2015. 磺化石墨烯对小麦幼苗生长及生理生化指标的影响. *生态毒理学报*, 10 (4): 123 – 128.
- Chang Y, Yang S T, Liu J H, Dong E, Wang Y, Cao A, Liu Y, Wang H. 2011. *In vitro* toxicity evaluation of graphene oxide on A549 cells. *Toxicology Letters*, 200 (3): 201 – 210.
- Chen L, Wang C, Li H, Qu X, Yang S T, Chang X L. 2017. Bioaccumulation and toxicity of  $^{13}\text{C}$ -skeleton labeled graphene oxide in wheat. *Environmental Science & Technology*, 51 (17): 10146 – 10153.
- Guo Min, Gong Ji-lai, Zeng Guang-ming. 2016. Comprehensive phytotoxicity assessment of multi-wall carbon nanotubes on rice seedlings. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 11 (5): 94 – 102. (in Chinese)
- 郭敏, 龚继来, 曾光明. 2016. 多壁碳纳米管对水稻幼苗的植物毒性研究. *生态毒理学报*, 11 (5): 94 – 102.
- Hu C, Wang Q, Zhao H, Wang L, Guo S, Li X. 2015. Ecotoxicological effects of graphene oxide on the protozoan *Euglena gracilis*. *Chemosphere*, 128: 184 – 190.
- Hu Jun-jie, Lao Zhi-lang, Wu Kang-ming, Fan Hong-bo. 2017. Research progress in environmental behavior and toxicity of graphene oxide. *Ecology and Environmental Sciences*, 26 (12): 2169 – 2176. (in Chinese)
- 胡俊杰, 劳志朗, 吴康铭, 范洪波. 2017. 氧化石墨烯的环境行为和毒性效应研究进展. *生态环境学报*, 26 (12): 2169 – 2176.
- Hu X G, Lu K C, Mu L, Kang J, Zhou Q X. 2014. Interactions between graphene oxide and plant cells: regulation of cell morphology, uptake, organelle damage, oxidative effects and metabolic disorders. *Carbon*, 80: 665 – 676.
- Jia P P, Sun T, Junaed M, Yang L, Ma Y B, Cui Z S, Wei D P, Shi H F, Pei D S. 2019. Nanotoxicity of different sizes of graphene (G) and graphene oxide (GO) *in vitro* and *in vivo*. *Environmental Pollution*, 247: 595 – 606.
- Jiao J Z, Yuan C F, Wang J, Xia Z L, Xie L L, Chen F, Li Z Y, Xu B B. 2016. The role of graphene oxide on tobacco root growth and its preliminary mechanism. *Journal of Nanoscience & Nanotechnology*, 16 (12): 12449 – 12454.
- Ke Shi-sheng, Yang Min-wen. 2007. Effects of water stress on antioxidant system and lipid peroxidation in leaves of *Rhododendron fortunei*. *Acta Horticulturae Sinica*, 34 (5): 1217 – 1222. (in Chinese)
- 柯世省, 杨敏文. 2007. 水分胁迫对云锦杜鹃抗氧化系统和脂类过氧化的影响. *园艺学报*, 34 (5): 1217 – 1222.
- Li F H, Sun C, Li X H, Yu X Y, Luo C, Shen Y Y, Qu S C. 2018. The effect of graphene oxide on adventitious root formation and growth in apple. *Plant Physiology and Biochemistry*, 129: 122 – 129.
- Li Xiao-kang, Hu Xian-gang, Zhou Qi-xing. 2015. Research progress in phytotoxicity of carbon nanoparticles and its mechanism. *Journal of Agro-Environment Science*, 43 (11): 2041 – 2047. (in Chinese)
- 李小康, 胡献刚, 周启星. 2015. 碳纳米颗粒诱发植物毒性效应及其机理的研究进展. *农业环境科学学报*, 43 (11): 2041 – 2047.
- Ma X M, Geiser-Lee J, Deng Y, Kolmakov A. 2010. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: phytotoxicity, uptake and accumulation. *Science of the Total Environment*, 408 (16): 3053 – 3061.
- Madannejad R, Shoaie N, Jahanpeyma F, Darvishi M H, Azimzadeh M, Javadi H. 2019. Toxicity of carbon-based nanomaterials: reviewing recent reports in medical and biological systems. *Chemico-Biological Interactions*, 307: 206 – 222.
- Miralles P, Church T L, Harris A T. 2012. Toxicity, uptake, and translocation of engineered nanomaterials in vascular plants. *Environmental Science and Technology*, 46 (17): 9224 – 9239.
- Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A. 2004. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306: 666 – 669.
- Omran R G. 1980. Peroxide levels and the activities of catalase, peroxidase, and indoleacetic acid oxidase during and after chilling cucumber seedlings. *Plant Physiology*, 65 (2): 407 – 408.
- Seabra A B, Paula A J, De L R, Alves O L, Durán N. 2014. Nanotoxicity of graphene and graphene oxide. *Chemical Research in Toxicology*, 27 (2): 159 – 168.

- Sengupta I, Bhattacharya P, Talukdar M, Neogi S, Pal S K, Chakraborty S. 2019. Bactericidal effect of graphene oxide and reduced graphene oxide: influence of shape of bacteria. *Colloid and Interface Science Communications*, 28: 60 – 68.
- Shen S S, Liu Y F, Wang F, Yao G X, Xie L L, Xu B B. 2019. Graphene oxide regulates root development and influences IAA concentration in rice. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38 (1): 241 – 248.
- Singh B K, Sharma S R, Singh B. 2010. Antioxidant enzymes in cabbage: variability and inheritance of superoxide dismutase, peroxidase and catalase. *Scientia Horticulturae*, 124 (1): 9 – 13.
- Smith A T, LaChance A M, Zeng S, Liu B, Sun L. 2019. Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites. *Nano Materials Science*, 1 (1): 31 – 47.
- Sundar D, Perianayaguy B, Reddy A R. 2004. Localization of antioxidant enzymes in the cellular compartments of sorghum leaves. *Plant Growth Regulation*, 44 (2): 157 – 163.
- Tan X M, Lin C, Fugetsu B. 2009. Studies on toxicity of multi-walled carbon nanotubes on suspension rice cells. *Carbon*, 47 (15): 3479 – 3487.
- Wang Y F, Pan F B, Wang G S, Zhang G D, Wang Y L, Chen X S, Mao Z Q. 2014. Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions. *Scientia Horticulturae*, 175 (1): 9 – 15.
- Wang Zi-ying. 2017. Toxic effects of single and combined pollution of graphene-sulfadiazine on wheat[M. D. Dissertation]. Xinxiang: Henan Normal University. (in Chinese)
- 王子英. 2017. 石墨烯—磺胺嘧啶单一及复合污染对小麦的毒性效应研究[硕士论文]. 新乡: 河南师范大学.
- Yang Jing-wen, Wang Li-lin. 2019. Effect of graphene oxide on physiological and biochemical properties of rice seedling. *Environmental Science Survey*, 38 (6): 8 – 12. (in Chinese)
- 杨婧雯, 王莉琳. 2019. 氧化石墨烯对水稻苗期生理生化的影响. *环境科学导刊*, 38 (6): 8 – 12.
- Yuan Gang-qiang, Gong Ji-lai, Zeng Guang-ming. 2015. Phytotoxicity of single - walled carbon nanotubes to rice seedling (*Oryza sativa* L) . *Acta Scientiae Circumstantiae*, 35 (12): 4143 – 4149. (in Chinese)
- 袁刚强, 龚继来, 曾光明. 2015. 单壁碳纳米管材料对水稻幼苗的毒性效应. *环境科学学报*, 35 (12): 4143 – 4149.
- Zhang P, Zhang R R, Fang X Z, Song T Q, Cai X D, Liu H J, Du S T. 2016. Toxic effects of graphene on the growth and nutritional levels of wheat (*Triticum aestivum* L.): short- and long- term exposure studies. *Journal of Hazardous Materials*, 317: 543 – 551.
- Zhang Qian. 2015. Toxicity of water dispersible graphene oxide (GO) to four species of algae[M. D. Dissertation]. Qingdao: Ocean University of China. (in Chinese)
- 张倩. 2015. 氧化石墨烯对4种微藻的致毒效应研究[硕士论文]. 青岛: 中国海洋大学.
- Zhang Xian-zheng. 1992. Research methods of crop physiology. Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- 张宪政. 1992. 作物生理研究法. 北京: 中国农业出版社.