

# 碳纳米材料对植物生长应用的研究进展

刘子燕<sup>1</sup>, 周 铭<sup>1,2\*</sup>, 程刚强<sup>1</sup>, 庄港豪<sup>1</sup>, 李芊芊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>广西科技大学机械与汽车工程学院, 广西 柳州

<sup>2</sup>广西清鹿新材料科技有限责任公司, 广西 柳州

收稿日期: 2023年2月6日; 录用日期: 2023年3月13日; 发布日期: 2023年3月20日

## 摘 要

随着新型纳米材料的发展, 碳纳米材料得到广泛的应用, 特别是新型的功能性石墨烯材料的应用越来越广泛。近年来, 将碳纳米材料运用到农业领域已经得到了一定的发展, 碳纳米材料对植物的生长作用主要体现在在低浓度促进生长, 高浓度抑制生长; 此外, 碳纳米材料还可通过改良土壤环境, 减少土壤营养物质流失、改善土壤结构等方面, 来促进植物的生长。为了更加了解和利用碳纳米材料, 探索其对植物生长的促进规律以及作用机制, 本文从植物的形态生理特征、土壤结构两个方面综述了近年来碳纳米材料对植物生长的影响; 最后对碳纳米材料在植物种植应用上的研究做出了总结。

## 关键词

碳纳米材料, 植物生长, 生理特征, 形态, 土壤结构

# Research Progress of Carbon Nanomaterials for Plant Growth Applications

Ziyan Liu<sup>1</sup>, Ming Zhou<sup>1,2\*</sup>, Gangqiang Cheng<sup>1</sup>, Ganghao Zhuang<sup>1</sup>, Qianqian Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Traffic Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou Guangxi

<sup>2</sup>Guangxi Qinglu New Material Technology Co., Ltd., Liuzhou Guangxi

Received: Feb. 6<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 13<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 20<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

With the development of new nanomaterials, carbon nanomaterials have been widely used; especially the new functional graphene materials have been more and more widely used. In recent years, the application of carbon nanomaterials to agriculture has been developed to a certain extent. The effect of carbon nanomaterials on plant growth is mainly reflected in promoting growth at low con-

\*通讯作者。

centration and inhibiting growth at high concentration; in addition, carbon nanomaterials can also promote plant growth by improving soil environment, reducing soil nutrient loss and improving soil structure. In order to better understand and utilize carbon nanomaterials and explore their promotion rules and mechanisms of plant growth, this paper reviews the effects of carbon nanomaterials on plant growth in recent years from two aspects: morphological and physiological characteristics of plants and soil structure; finally, it makes a summary of the research on the application of carbon nanomaterials in plant cultivation.

## Keywords

Carbon Nanomaterials, Plant Growth, Physiological Characteristics, Morphology, Soil Structure

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

纳米科技是现代科学的重要技术,在物理学[1]、生物学[2]、材料工程学[3]等方面得到了广泛的应用。纳米材料具有表面效应、小尺寸效应等特殊的性质[4],使得国内外众多学者对其功能和应用进行探索和研究。碳纳米材料的出现始于1985年第一个富勒烯(Fullerenes)的发现[5],碳纳米管(Carbon nanotubes) [6]、石墨烯(Graphene) [7]都属于碳纳米材料。碳纳米材料是纳米材料领域的一个重要组成部分,厚度小于100 nm的分散相尺度是一维的称作碳材料,它具有光学、力学以及表面尺寸等特殊性质[8] [9] [10]。碳纳米材料因其特殊的机械、电气和磁特性,使得在纳米材料中成为最具有前景的材料之一[11]。碳纳米材料主要由碳单质或碳的氧化物构成,与金属纳米材料相比,碳纳米材料能够减少重金属的引入,是一种无污染的材料。随着更多新型碳纳米材料的出现及其在土壤改良和作物促生中的优异表现[12],碳纳米材料在农业领域有着巨大的潜力。

近年来,将碳纳米材料运用到农业领域已经得到了一定的发展。目前碳材料对植物生长的影响分为两大类:一方面是碳材料对植物生长发育的影响,集中表现在提高植物种子发芽率、提高植物生物量的积累、促进植物相关生长基因表达等方面[13]。其作用效果与碳纳米材料的浓度息息相关,当施入的碳纳米材料浓度较低时,对植物的生长发育起到积极作用,浓度高时,会抑制植物的生长。Mondal 等[14]在芥菜种子发芽试验中发现,被氧化的多壁碳纳米管能够刺激种子的萌发,并且通过电导率测量发现,被氧化的多壁碳纳米管通过阻碍种子内部离子的流失使得养分保留量增加,从而促进种子萌发。Saxena 等[15]使用水溶性碳纳米颗粒(rCNPs)对小麦进行培育,结果表明,低浓度的 rCNPs 对小麦生长的促进作用最明显,其原因是 rCNPs 可以减缓养分中的阴离子、阳离子释放时间。另一方面,碳纳米材料通过改变土壤理化性质、土壤结构和肥力,从而影响作物对养分的吸收,达到促进植物生长的作用。

为了探究碳纳米材料调节植物生长发育的规律、作用机制以及对土壤中的营养元素的利用在农业领域具有重要的意义,本文综述了近年来关于碳纳米材料对植物和土壤影响的研究进展,并对未来的研究热点进行展望。

## 2. 碳纳米材料对植物生长发育的影响

近些年,研究碳纳米材料对环境和植物的影响逐渐成为新的研究热点[16]。研究表明施加低浓度的碳

纳米材料对植物的生长发育起到积极作用, 纳米碳能刺激作物种子萌发、促进植物根系伸长。此外, 纳米材料的浓度和暴露的时间, 使得碳纳米材料对植物的生长发育存在负面影响, 主要体现在植物细胞组织的损伤、生长激素的抑制以及活性氧的增加, 这种负面影响与植物物种和生长条件有重要的影响[17]。

## 2.1. 碳纳米材料对植物的促进作用

### 2.1.1. 植物的表现影响

纳米材料对植物生长的促进作用较为直观的表现是植物的形态方面的变化, 例如促进根的伸长、种子萌发、幼苗生长等。冯璐等[18]研究发现当施入纳米碳浓度为 500 mg/L 时, 百合苗的生根数量增加, 根长增加。有研究者利用石墨烯对大花蕙兰原球莲进行培育, 发现植物的生根、出芽期和苗期培养阶段均得到了一定促进作用[19]。此外, 用纳米碳对种子进行培育, 发现甘蓝型油菜种子的发芽率明显提高, 继续培养能显著影响甘蓝型油菜幼苗的生长发育[20]。赵鑫等[21]研究发现, 纳米碳能提高植物对全氮、全钾、钙、镁、铜、锰和锌的吸收, 促进植株的生长发育, 促进根系的生长。Sunho 等[22]人研究了石墨烯氧化物对拟南芥的生长影响, 在适当的浓度下氧化石墨烯能增加植物根系的发育, 增大叶片的面积, 提高叶子的数量和促进花蕾的形成。Liu 等[23]研究了不同质量浓度石墨烯对水稻种子萌发和生长的影响, 质量浓度低于 5 mg/L 的石墨烯对水稻的促进了不定根数的总数、根鲜重和地上的鲜重。胡等[24]研究了不同浓度的石墨烯对树莓组培苗的长势及其不定根发育的影响, 研究发现在石墨烯浓度为 2 mg/L 时, 树莓的苗高、根长、根尖数、根的比表面积均增长了。碳纳米材料通过化学键与水分子产生结合力, 改变土壤水含量。He 等[25]进一步发现经过氧化后的石墨烯携带了较多的极性亲水基团, 利用氢键与水分子相结合, 从而提高了土壤的容水能力, 再利用石墨烯表面无摩擦特性, 将水传输至植物根系为植物输送充足的水分, 从而促进植物萌发与生长。

从上述各类研究结果能得出, 适宜浓度的碳纳米材料能促进种子的发芽速率以及存活率; 根系是植物吸取养分的关键部位, 碳纳米材料能促进植物根系的发育, 有利于植物吸取所需的养分, 从促进幼苗生长; 植物的叶片是呼吸和光合作用的重要部位, 碳纳米材料能促进植物叶片的形成, 促进光合作用, 提高叶绿素的累积, 从而提高植物的生长发育。随着科学技术的不断发展, 检测手段及方法的不断进步使得研究者们对碳纳米材料与植物的相互作用研究更加深入, 目前研究者们从植物的细胞、蛋白质以及生长基因等探索碳纳米材料对其生长的影响机制。

### 2.1.2. 植物的生理影响

一些学者试图从植物的生理角度去探索碳纳米材料对植物的影响机理。碳纳米材料通过影响植物细胞中某些基因的表达以及植物组织的生长, 来促进作物的生长。Guo 等[26]研究了氧化石墨烯对不同生长时期的番茄影响, 发现低浓度的氧化石墨烯促进了番茄茎生长, 促进了根系形态发育, 诱导了根系发育相关基因的表达和抑制了生长素应答基因表达, 从而提高了根系生长素含量。Chen 等[27]发现浓度为 50 mg/L 石墨烯能促进玉米根系的发育, 其根系的转录因子调控、植物激素信号传导、氮钾代谢以及次生代谢等基因表达均显著提高。浓度为 5 g/kg 的石墨烯能提高苜蓿的干、鲜重和促进幼苗的株高, 提高根系分泌的抗氧化酶活性, 从而增强了苜蓿的抗盐碱性能[28]。Khodakovskaya 等[29]和 Zhang 等[30]发现多壁碳纳米管进入了番茄的种子表皮内, 诱导番茄体内水通道蛋白基因的表达, 增强种子的吸水性, 提高种子发芽率。

另一方面, 植物在生长过程中由于环境的变化会遭到干旱、盐度、营养缺乏等胁迫, 植物需要酶的和非酶的抗氧化系统, 应激反应基因的表达和分子途径的调节来克服这些胁迫[31]。植物体内抗氧化酶活性也是影响植物生长的重要因素, 抗氧化酶是用来抵御植物体内活性氧的累积, 避免植物遭受氧化胁迫。低浓度的石墨烯可清除玉米根中的活性氧, 改变玉米根的形态, 改善玉米幼苗的健康状况[32]。Anjum [33]

等发现当氧化石墨烯浓度在 400 mg/L 和 800 mg/L 时, 能促进蚕豆种子过氧化氢酶的活性, 保持种子完整的细胞膜, 从而促进种子的发芽。

综合以上各实验结论, 得出碳纳米材料对植物的影响与浓度以及植物的类型息息相关, 低浓度下, 能促进植物的形态发育、提高生长基因的表达以及提高植物抗氧化酶活性来克服环境带来的胁迫。纳米碳材料对作物的生长促进作用决定因素较为复杂, 不同类型的植物对碳材料的适应浓度不一样, 还未能形成有规律的结论, 未来需要往更详细的将影响因素和结论统计归纳成定性的规律方向进行探索。

## 2.2. 碳纳米材料对植物的抑制作用

纳米材料与植物的相互作用涉及到材料施加积量、植物类型以及物理化学作用, 当施加浓度较高的情况下, 碳纳米材料对植物的生长发育存在负面影响, 主要表现为生长抑制、降低生物量的积累以及增加活性氧的含量等。Mondal 等[14]使用高浓度的氧化多壁碳纳米管对芥菜进行在水培处理, 发现芥菜的发芽率和干物质量明显下降。Begum 等[17]在水培试验中添加石墨烯, 发现甘蓝、番茄和红菠菜的活性氧含量随石墨烯浓度增加而上升, 出现生长抑制的现象。赵琳等[34]发现随着氧化石墨烯浓度的增加, 玉米叶片中的叶绿素含量呈现先上升后下降的趋势, 过氧化氢酶活性与 MDA 含量随着氧化石墨烯浓度的增加而升高。原因是浓度高的氧化石墨烯增大了玉米幼苗遭受氧化胁迫的程度, 使得根部发育遭到抑制从而抑制玉米幼苗的生长发育。

植物细胞是植物生长发育的关键因素, 当施加浓度过高的碳纳米材料时会影响植物组织细胞的破坏, 抑制了植物的生长发育。Tan [35]等发现多壁碳纳米管会导致水稻细胞坏死, 其原因是植物的细胞膜破裂、细胞质泄露以及染色质的凝聚, 细胞破坏程度与施加剂量呈正相关。Hao 等[36]的研究表明, 高浓度的石墨烯对水稻茎高和根长有抑制作用, 其根皮质细胞直径变小, 导致细胞收缩变形, 从而抑制了根系的发育。Ghosh [37]等发现高浓度的碳纳米材料会阻碍洋葱细胞的有丝分裂, 造成 DAN 的断裂。纳米碳材料使得植物细胞遭到破坏后, 其所产生的应激保护机制也失去了作用, 导致植物生长受到抑制, 甚至出现坏死现象。

综上, 碳纳米材料对植物的毒性不可忽视, 其破坏程度与所添加的剂量有较大的关系, 高浓度的碳纳米材料不仅会抑制植物形貌上的发育, 对植物生理方面产生毒性。碳纳米材料的毒性, 长期影响植物的代谢与吸收过程, 甚至会对食物链造成危害, 所以碳纳米材料投入农业领域中, 需要控制好投入的剂量, 避免对环境及人类造成危害。

## 3. 碳纳米材料改良土壤对植物的影响

随着研究的不断扩大, 研究者的探索角度不再局限于植物本身, 植物的生长不仅受到自身生理状态的影响, 其外部环境也是影响植物生长的重要因素。植物所需的土壤环境以及养分供给都是重要影响因素。土壤是给予植物营养物质的重要环境, 土壤的理化性质对植物生长产生重要的影响, 良好的土壤环境, 能促进植物的生长。研究者们对土壤环境的研究也逐渐加大。

### 3.1. 纳米碳对土壤结构的影响

随着土地种植利用不规范, 为了提高作物产量而过量的施肥, 导致土壤出现板结、盐碱化、营养物质不平衡以及水土流失等问题。土壤改性是指通过添加改性剂来改善土壤的理化性质。通常使用水泥、石灰、粉煤灰和沥青材料等作为土壤改性材料, 而随着材料学的发展, 新型材料开始应用与土壤改良, 其中包括纳米材料、树脂和硅酸盐[38]-[43]。改良剂主要改善土壤的结构, 协调土壤水、肥及生物与土壤之间的关系, 防止因渗透、淋洗造成水土流失, 增强土壤抗侵蚀能力, 减缓土壤盐渍化。纳米材料有具

比表面积大、表面带有电荷等特性，因此纳米材料与土壤中阴离子、阳离子、有机质等相互作用，因此使用小剂量的纳米材料，便能显著影响土壤的微观结构和物理、化学性质[44]。Tabarsaa [45]发现在黄土中加入极少量的纳米黏土可显著提高稳定土的液限、塑限和塑性指数，从而增强土壤的结构稳定性。谭帅等[46]研究发现在土壤中施加纳米碳后，可增大土壤小孔隙比率，减少水的流径，从而提高土壤的持水能力。陈晓鹏等[47][48]研究发现在土壤表层下混入纳米层在，通过入渗实验发现纳米碳能明显减少水的渗透作用，且施加量越多，水分下渗的抑制程度越大；不仅如此，纳米碳还能提高土壤的团聚体结构，增大土壤孔径，提高土壤孔隙率，从而提高了土壤的抗侵蚀能力。

土壤结构对土壤的肥力的影响机理可归纳为：碳纳米颗粒能提高土壤颗粒团聚程度，其团聚性越高保肥固肥的能力就越强，土壤孔隙与团聚程度呈现正相关关系，孔隙的增大有利于植物根系的呼吸作用以及土壤中水分和养分的传输，改善植物生长环境。

### 3.2. 纳米碳对土壤养分的影响

土壤是养分的主要载体，土壤中养分的变化直接影响了植物生长作用。因此，研究土壤中的养分变化对于土壤改良及作物的生长具有重要意义。有研究表明纳米碳溶于土壤溶液可增加电动位，降低土壤pH值，提升土壤离子浓度[49]。而在植物生长环境中，由于降雨环境造成的水土及养分流失现象较为严重，而碳纳米材料拥有极大的比表面积和强吸附性等优异特性，研究者们结合此特性，对土壤养分进行研究。为探究纳米碳对土壤中养分的影响，研究者们最初在实验室中通过模拟植物生存的自然环境，研究纳米碳发挥的作用。薛文强等[50]发现在淋溶实验中纳米碳可有效减少径流和泥沙中硝态氮的流失，且添加的浓度越大，径流量越小，硝态氮流失量越小。纳米碳因其具有极大的比表面积，所以能吸附土壤中的养分离子，减少其流失，在土壤保肥供肥方面起到了重要作用。Liang等[51]向扰动土柱内添加纳米碳进行研究，结果表明土壤中纳米碳的存在可大大提高土壤的阳离子交换量，一定程度影响土壤对离子的吸附量。温善菊[52]通过土柱淋溶实验发现土壤在加入纳米颗粒后，土壤的水容量增加，氮磷钾养分的流失减少，养分主要集中在中上层，证明了纳米颗粒可以减少养分元素流失，可作为土壤保肥剂。隋祺祺等[53]研究了石墨烯溶胶对土壤中电导率、氮、磷、钾含量的影响，以探究石墨烯的保肥作用，结果表明，随着石墨烯溶胶浓度越大其影响越明显，证明了石墨烯具有保肥作用。不少研究者将纳米碳材料投入到实际的农田种植环境中，进行大面积的使用碳纳米材料以探究植物对肥料的利用率。Wu [54]将纳米碳加入到缓释肥料和缺乏氮素的水稻土中，研究发现施加纳米碳肥料后，不仅水稻的产量有所增加，氮肥有效利用率也显著提高，并且加入纳米碳可在一定程度上减少氮肥造成的水环境污染。田艳飞等[55]究发现，纳米碳及其复合材料混施可显著提高油菜株高，改善土壤结构，并且氮素的保存及利用率都得到了提高。高荣广等[56]研究表明，纳米碳可改善桃园的土壤环境，促进桃树对氮、钾等肥料的利用率。张哲等[57]研究发现，纳米碳能够促进水稻生长，同时可以提高氮肥的利用率，能有效减少肥料的使用，而不影响作物的产出。

综上各研究结论，可以得出碳纳米材料通过其优异的小尺寸效应和吸附性强的特性，改善了土壤环境，碳纳米材料的强吸附性使得土壤中的养分离子更多的保留在了土壤中，减少随水径流而造成的养分流失，提高了植物对养分的利用率，促进了植物的生长发育。

## 4. 结论与展望

本文回溯了碳纳米材料对植物生长的影响，结合前人研究成果，从植物的形态、生理和土壤方面讨论碳纳米材料对植物的影响。碳纳米材料对植物的影响有两面性，低浓度的碳纳米材料对植物生长有促进作用，体现为促进发芽、根系生长和植株高等方面；而高浓度对植物有抑制作用，体现在抑制植物细

胞坏死、活性氧增加以及植物根系遭到破损等。研究者们通过研究植物的土壤环境,发现纳米碳在土壤结构的改善以及土壤养分的持有两个方面,发挥了减少养分流失以及提高养分利用率的作用,达到了增强土壤保肥供肥的效果,体现出对植物生长的促进作用。

近年来将碳纳米材料应用到农业领域越来越受欢迎,从已有的报道来看,多数研究集中在碳纳米材料的生物毒性、对植物的生理影响以及对土壤结构和养分等方面,在未来可以对以下方面进行深入研究:

- 1) 碳纳米材料促进作物吸收养分的机理和土壤环境的行为规律,有待进一步研究;
- 2) 对不同的作物,施入碳纳米材料的最佳浓度有待进一步定量研究;
- 3) 碳纳米材料对土壤中养分离子的调控机理有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] Angelucci, R., *et al.* (2003) Application of Nanotechnologies in High Energy Physics. *Nuclear Physics B—Proceedings Supplements*, **125**, 164-168. [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(03\)90984-4](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(03)90984-4)
- [2] 闫金定. 我国纳米科学技术发展现状及战略思考[J]. 科学通报, 2015, 60(1): 30-37.
- [3] De Chiffre, L., Kunzmann, H., Peggs, G.N. and Lucca, D.A. (2003) Surfaces in Precision Engineering, Microengineering and Nanotechnology. *CIRP Annals*, **52**, 561-577. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60204-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60204-2)
- [4] Borm, P.J.A., *et al.* (2006) The Potential Risks of Nanomaterials: A Review Carried Out for ECETOC. *Particle and Fibre Toxicology*, **3**, Article No. 11.
- [5] Kroto, H.W., Heath, J.R., O'Brien, S.C., Curl, R.F. and Smalley, R.E. (1985) C60: Buckminsterfullerene. *Nature*, **318**, 162-163. <https://doi.org/10.1038/318162a0>
- [6] Iijima, S. (1991) Helical Microtubules of Graphitic Carbon. *Nature*, **354**, 56-58. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- [7] Novoselov, K.S., *et al.* (2004) Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science (New York, N.Y.)*, **306**, 666-669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- [8] Bennett, S.W., Adeleye, A., Ji, Z.X. and Keller, A.A. (2013) Stability, Metal Leaching, Photoactivity and Toxicity in Freshwater Systems of Commercial Single Wall Carbon Nanotubes. *Water Research*, **47**, 4074-4085. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.12.039>
- [9] Hurt, R.H., Monthieux, M. and Kane, A. (2006) Toxicology of Carbon Nanomaterials: Status, Trends, and Perspectives on the Special Issue. *Carbon*, **44**, 1028-1033. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.12.023>
- [10] Srivastava, V., Gusain, D. and Sharma, Y.C. (2015) Critical Review on the Toxicity of Some Widely Used Engineered Nanoparticles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **54**, 6209-6233. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b01610>
- [11] Dresselhaus, M.S., Dresselhaus, G. and Jorio, A. (2004) Unusual Properties and Structure of Carbon Nanotubes. *Annual Review of Materials Research*, **34**, 247-278. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.34.040203.114607>
- [12] 李朝阳, 杨胜香, 陈玲, 等. 纳米材料改良土壤对小白菜吸收和富集重金属的影响[J]. 湖南农业科学, 2010(23): 57-59.
- [13] Arnab, M., *et al.* (2016) Carbon Nanomaterials in Agriculture: A Critical Review. *Frontiers in Plant Science*, **7**, 172. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00172>
- [14] Mondal, A., Basu, R., Das, S. and Nandy, P. (2011) Beneficial Role of Carbon Nanotubes on Mustard Plant Growth: An Agricultural Prospect. *Journal of Nanoparticle Research*, **13**, 4519-4528. <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0406-z>
- [15] Saxena, M., Maity, S. and Sarkar, S. (2014) Carbon Nanoparticles in "Biochar" Boost Wheat (*Triticum aestivum*) Plant Growth. *RSC Advances*, **4**, 39948-39954. <https://doi.org/10.1039/C4RA06535B>
- [16] Monica, R.C. and Cremonini, R. (2009) Nanoparticles and Higher Plants. *Caryologia*, **62**, 161-165. <https://doi.org/10.1080/00087114.2004.10589681>
- [17] Begum, P., Ikhtiar, R. and Ugetsu, B.F. (2011) Graphene Phytotoxicity in the Seedling Stage of Cabbage, Tomato, Red Spinach, and Lettuce. *Carbon*, **49**, 3907-3919. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.05.029>
- [18] 冯璐, 王玉国, 温银元, 等. 纳米碳对离体培养条件下几种植物生长及分化的影响[J]. 生物技术通报, 2017, 33(4): 164-168.
- [19] 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.

- [20] 谈诗. 氧化石墨烯对大花蕙兰组织培养的效应及防褐变机理研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- [21] 赵鑫. 纳米碳对桃园土壤肥力及植株养分吸收的影响[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [22] Park, S., *et al.* (2020) Graphene Oxide-Assisted Promotion of Plant Growth and Stability. *Nanomaterials*, **10**, 758. <https://doi.org/10.3390/nano10040758>
- [23] Liu, S., *et al.* (2015) Effects of Graphene on Germination and Seedling Morphology in Rice. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **15**, 2695-2701. <https://doi.org/10.1166/jnn.2015.9254>
- [24] 胡晓飞, 赵建国, 高利岩, 等. 石墨烯对树莓组培苗生长发育影响[J]. 新型炭材料, 2019, 34(5): 447-454.
- [25] He, Y., *et al.* (2018) Graphene Oxide as a Water Transporter Promoting Germination of Plants in Soil. *Nano Research*, **11**, 1928-1937. <https://doi.org/10.1007/s12274-017-1810-1>
- [26] Guo, X., *et al.* (2021) Effects of Graphene Oxide on Tomato Growth in Different Stages. *Plant Physiology and Bio-Chemistry*, **162**, 447-455. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.013>
- [27] Chen, Z., *et al.* (2021) Influence of Graphene on the Multiple Metabolic Pathways of *Zea mays* Roots Based on Transcriptome Analysis. *PLOS ONE*, **16**, e0244856. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244856>
- [28] Chen, Z. and Wang, Q. (2021) Graphene Ameliorates Saline-Alkaline Stress-Induced Damage and Improves Growth and Tolerance in Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, **163**, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.039>
- [29] Khodakovskaya, M., *et al.* (2012) Carbon Nanotubes Are Able to Penetrate Plant Seed Coat and Dramatically Affect Seed Germination and Plant Growth. *Acs Nano*, **6**, 3221-3227. <https://doi.org/10.1021/nn302965w>
- [30] Chen, J.J., *et al.* (2015) Effects of Graphene on Seed Germination and Seedling Growth. *Journal of Nanoparticle Research: An Interdisciplinary Forum for Nanoscale Science and Technology*, **17**, Article No. 78.
- [31] Khare, R., *et al.* (2017) Differential Sulphur Assimilation Mechanism Regulates Response of Arabidopsis thaliana Natural Variation towards Arsenic Stress under Limiting Sulphur Condition. *Journal of Hazardous Materials*, **337**, 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.009>
- [32] Ren, W.J., Chang, H.W. and Teng, Y. (2016) Sulfonated Graphene-Induced Hormesis Is Mediated through Oxidative Stress in the Roots of Maize Seedlings. *Science of the Total Environment*, **572**, 926-934. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.214>
- [33] Anjum, N.A., *et al.* (2014) Single-Bilayer Graphene Oxide Sheet Impacts and Underlying Potential Mechanism Assessment in Germinating Faba Bean (*Vicia faba* L.). *Science of the Total Environment*, **472**, 834-841. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.018>
- [34] 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.
- [35] Lin, C., Fugetsu, B. and Tan, X.-M. (2009) Studies on Toxicity of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Suspension Rice Cells. *Carbon*, **47**, 3479-3487. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.08.018>
- [36] Hao, Y., *et al.* (2018) Carbon Nanomaterials Alter Plant Physiology and Soil Bacterial Community Composition in a Rice-Soil-Bacterial Ecosystem. *Environmental Pollution*, **232**, 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.024>
- [37] Li, F.H., *et al.* (2018) The Effect of Graphene Oxide on Adventitious Root Formation and Growth in Apple. *Plant Physiology & Biochemistry*, **129**, 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.05.029>
- [38] 刘阳生, 白庆中. 膨润土改性天然粘土防渗材料的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2): 143-149.
- [39] Rashid, A., *et al.* (2017) Development of Sustainable Masonry Units from Flood Mud Soil: Strength and Morphology Investigations. *Construction & Building Materials*, **131**, 682-689. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.039>
- [40] Latifi, N., *et al.* (2017) Tropical Residual Soil Stabilization: A Powder form Material for Increasing Soil Strength. *Construction & Building Materials*, **147**, 827-836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.115>
- [41] Han, Z., *et al.* (2016) A Review of Groundwater Contamination near Municipal Solid Waste Landfill Sites in China. *Science of the Total Environment*, **569-570**, 1255-1264. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.201>
- [42] Ayeldeen, M., *et al.* (2017) Enhancing Mechanical Behaviors of Collapsible Soil Using Two Biopolymers. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **9**, 329-339. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.007>
- [43] Arulrajah, A., *et al.* (2016) Stabilization of Recycled Demolition Aggregates by Geopolymers Comprising Calcium Carbide Residue, Fly Ash and Slag Precursors. *Construction and Building Materials*, **114**, 864-873. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.150>
- [44] Ghasabkolaei, N., *et al.* (2017) Geotechnical Properties of the Soils Modified with Nanomaterials: A Comprehensive Review. *Archives of Civil & Mechanical Engineering*, **17**, 639-650. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.01.010>
- [45] Tabarsa, A., *et al.* (2018) Laboratory Investigation and Field Evaluation of Loess Improvement Using Nanoclay—A Sus-

tainable Material for Construction. *Construction and Building Materials*, **158**, 454-463.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.096>

- [46] 谭帅, 周蓓蓓, 王全九. 纳米碳对扰动黄绵土水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 263-269.
- [47] 周蓓蓓, 陈晓鹏, 吕金榜, 等. 纳米碳对不同植被覆盖下黄土坡地降雨侵蚀的抑制效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 116-124.
- [48] 陈晓鹏. 纳米碳对黄土区水土流失及养分运移特征的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [49] 张志明, 等. 纳米增效肥对杂交稻的增产效果研究[J]. 腐植酸, 2012(2): 15-19.
- [50] 薛文强, 等. 纳米碳混合层对土壤水分入渗特性及水分分布影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 152-159.
- [51] Liang, B., *et al.* (2006) Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, **70**, 1719-1730. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>
- [52] 温善菊. 土壤无机纳米微粒对土壤保肥供肥及作物生育的影响[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林农业大学, 2005.
- [53] 隋祺祺, 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.
- [54] Wu, M.Y. (2013) Effects of Incorporation of Nano-Carbon into Slow-Released Fertilizer on Rice Yield and Nitrogen Loss in Surface Water of Paddy Soil. 2013 *3rd International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*, Hong Kong, 16-18 January 2013, 676-681. <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2012.161>
- [55] 田艳飞, 黄占斌, 刘丹, 等. 纳米碳及其复合材料对油菜生长和土壤氮素保持效应的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3339-3345.
- [56] 高荣广, 赵鑫, 高晓兰, 等. 纳米碳对桃园土壤肥力及植株养分吸收的影响[J]. 落叶果树, 2018, 50(3): 11-14.
- [57] 张哲, 范喜福, 孙磊, 等. 纳米肥料对水稻生长特性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2010(8): 50-52.