

纳米碳添加对土壤速效养分和小油菜产量的影响

李嘉欣^{1, 2}, 武雪萍^{2*}, 李晓秀^{1*}, 李生平², 赵 刚³

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 山西师范大学地理科学学院, 山西 临汾 041004)

摘 要: 纳米碳因其具有独特的理化性质作为新型材料被广泛应用于新能源、生态修复等领域。近年来, 随着其功能被不断挖掘, 纳米碳开始投入农业领域, 成为新的研究热点。但是, 纳米碳添加如何影响土壤养分和作物产量, 仍不明确, 有待进一步研究。将纳米碳作为肥料增效剂与不同肥料配施, 研究其在大田条件下对土壤速效养分、小油菜农艺性状和产量的影响, 从而为纳米碳在农业中的高效利用提供理论依据。田间试验在北京市房山区窦店乡温室大棚内进行, 供试作物为小油菜, 品种为‘国夏1号’。试验共设4个处理: 化肥(CF), 化肥+纳米碳(CF+NC), 有机肥(OM), 有机肥+纳米碳(OM+NC)。在小油菜不同生育期测定土壤速效养分、油菜株高、叶面积和产量。结果表明, (1) 与CF、OM相比, CF+NC和OM+NC处理提高了土壤速效养分含量, 分别提高了小油菜生长旺盛期的土壤速效钾含量37.3%、27.4%, 土壤铵态氮含量35.5%、35.0%, 土壤硝态氮含量52.0%、49.9%。(2) 添加纳米碳可促进小油菜生长。与CF、OM相比, CF+NC、OM+NC处理分别提高了收获期小油菜株高9.7%、5.6%, 叶面积13.9%、12.9%, 干重15.6%、14.7%, 产量19.8%、18.0%。与单施肥料比较, 纳米碳配施化肥、有机肥均可显著提高土壤速效养分含量, 促进小油菜的生长发育, 提高产量。

关键词: 纳米碳; 肥料; 产量; 土壤速效养分; 温室大棚

施用肥料可提高作物产量和土壤肥力, 温室蔬菜的栽培更注重肥料的施用。目前的研究表明, 我国露地蔬菜种植和设施蔬菜种植存在肥料不合理施用、有机养分资源未能充分有效利用等问题, 造成土壤和环境质量状况不断恶化^[1-3]。因此, 优化施肥措施是保证粮食安全和提高土壤质量的急需农业生产手段。目前, 我国新型肥料研发进展缓慢, 科技含量低^[4], 随着国家“减肥增效”“绿色发展”的政策导向, 我国新型肥料产业发展已成为热点和新趋势^[5-7]。纳米碳作为新型材料且拥有独特的性质, 有望促进新型肥料发展和应用。

纳米技术是指在纳米尺度(1 ~ 100 nm)研究物质的特性和相互作用, 是20世纪末发现的新型技术^[8]。飞速发展的纳米科学技术, 催生了纳米材料爆发式的商业化生产, 由于纳米材料具有独特的物理化学性质, 被广泛用于各行各业^[9]。新型

肥料的研制需要新技术, 将纳米材料引入肥料领域将为新型肥料的研制带来新的思路^[10]。纳米碳是纳米材料的一种, 它是一种改性碳, 具有比表面积大、携带大量负电荷等特性^[8], 近几年作为肥料增效剂应用到农业领域, 其入水后变成超导体可提高植株细胞生物透性, 吸附土壤中大量的营养元素进入植物体内, 促进根系生长, 有利于作物的生长发育和新陈代谢, 对多种农作物的生长发育具有显著效果^[10-13]。已有研究表明^[14]在一定浓度范围内(6.6 ~ 66.0 mg · L⁻¹), 随着纳米碳添加浓度的变化, 种子吸水率与种子增重变化趋势基本一致, 在添加浓度为66.0 mg · L⁻¹时种子增重达到最大值, 相比对照鲜重增加24.81%。前人研究^[15]发现碳纳米管可以促进水稻种子发芽、提高根系生长和根系活力; 胡晓飞等^[16]研究表明2 mg · L⁻¹的石墨烯溶液可以增加树莓组的苗高1.46倍, 根长、比表面积、根尖数与分叉数的发育增加2倍; 高荣广等^[17]研究表明, 纳米碳促进桃树对氮、钾等肥料的利用率。另外, 纳米材料也能调节植物体内多种酶活性, 改善叶片光合性能, 提高作物产量和品质^[18-19]; 也有研究发现^[20]纳米碳促进烤烟对氮的吸收, 显著提高氮肥的利用率, 有效降低了氮素

收稿日期: 2022-05-20; 录用日期: 2022-06-16

基金项目: 北京十玉农业科技有限公司研发项目(2020KF086)。

作者简介: 李嘉欣(1998-), 硕士研究生, 主要从事农业土壤环境污染研究。E-mail: 1810698182@qq.com。

通讯作者: 武雪萍, E-mail: wuxueping@caas.cn; 李晓秀, E-mail: lxiaoxiu0548@sina.com。



土壤残留和损失。

目前研究纳米碳配施肥料较单一,且多数在实验室内的培养基或是水培条件中进行,缺乏大田环境下对纳米碳的研究。因此,本研究在温室大棚条件下以小油菜为供试作物,设置纳米碳配施化肥和有机肥4种不同处理,揭示不同肥料添加纳米碳后对土壤速效养分和作物产量的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点设在北京房山区泰华芦村种植专业合作社蔬菜种植大棚,位于北京房山区窦店镇芦村。地理坐标东经115°9',北纬39°6'。属东部季风区暖温带半湿润大陆性气候,年平均气温为12.5℃,年平均最高气温为18.8℃,极端最高气温为41.9℃,极端最低气温为-22.0℃。历年平均降水量488 mm,主要集中在夏季的6—8月,占全年总降水量的67.9%以上,年无霜期180~220 d。

1.2 试验材料

供试作物为小油菜,品种为国夏1号,于2021年7月8日播种,8月10日收获。纳米碳由北京十玉农业科技有限公司提供,比热容为 $4.129 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$ 。氮肥、磷肥、钾肥分别为尿素、过磷酸钙、硫酸钾,分别含N 46%、 P_2O_5 12%、 K_2O 52%,有机肥为北京金龙源科技有限公司生产,有机质含量 $\geq 45\%$, $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O} \geq 5.0\%$ 。

供试土壤为褐土,质地为粉质壤土,土壤容重 $1.21 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,pH值7.13,全氮 $2.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 $42.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $574 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,硝态氮 $154 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,铵态氮 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.3 试验设计

本试验采用单因素随机区组设计,设4个处理:化肥(CF)、化肥+纳米碳(CF+NC)、有机肥(OM)、有机肥+纳米碳(OM+NC),每个处理重复3次,共12个小区,小区面积 $2 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 。

播前整地设区施肥,CF处理肥料用量为N $72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;CF+NC处理在CF处理的施肥基础上加入纳米碳;OM处理保证与CF处理肥料含氮量相同;OM+NC处理在OM处理施肥基础上加入纳米碳,纳米碳用量均为肥料的0.3%。种植株间距

$15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$,灌水方式为漫灌,分别在施肥后、生长旺盛期前灌水,共灌水两次,总漫灌量为农民习惯灌溉量135 mm,保证各个小区灌水量一致。

1.4 测定项目和方法

土壤样品采集:于小油菜生长前期(7月15日)、生长中期(7月25日)、生长旺盛期(8月1日)、收获期(8月10日)取0~20 cm土样,3个重复。土样分为两部分,一部分放入4℃冰箱中保存,另一部分放于阴凉处风干。硝态氮、铵态氮采用KCl-流动分析仪法,速效钾用 NH_4OAc -火焰光度法。

植株株高测定:各个处理在不同时期随机选取3株长势均匀的植株用直尺记录各个生育期株高,即地面到植株最高点的距离。

叶面积测定:在收获期选取长势均匀的3株小油菜,用直尺采用长宽系数法^[21]测定其最大叶片叶面积。

干重测定:小油菜采收时,各处理随机选取3株小油菜植株,选取地上部分放置于烘箱105℃杀青后于70℃烘干测定其干重。

产量测定:小油菜采收时,测算出各个处理单位面积小区产量,折算成公顷产量。

1.5 数据处理

采用Excel 2010和Origin 9.0进行数据整理和做图,SPSS 26进行统计分析,邓肯多重比较法进行显著性分析,显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 小油菜生育期土壤速效钾含量的动态变化

小油菜生育期土壤速效钾含量动态变化如图1所示。土壤速效钾含量随着小油菜生育期的推进呈不断下降的趋势,生长前期至生长中期下降速率较慢,而在小油菜生长中后期,土壤速效钾含量急剧降低。与CF、OM处理相比,CF+NC、OM+NC处理均能有效提高土壤速效钾含量,各个时期差异均达到显著水平($P<0.05$)。生长中期至生长旺盛期,CF+NC、OM+NC与CF、OM处理相比,减缓了土壤速效钾含量的下降。小油菜旺盛期CF+NC处理下的土壤速效钾含量比CF处理下土壤速效钾含量高37.3%,OM+NC处理下的土壤速效钾含量比OM处理下的土壤速效

钾含量高 27.4%，收获期土壤速效钾含量排序为 CF+NC>OM+NC>CF>OM。

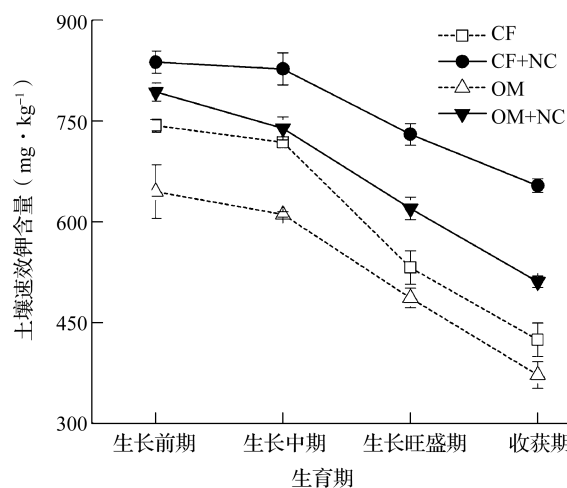


图1 小油菜生育期土壤速效钾含量的动态变化

2.2 小油菜生育期土壤铵态氮、硝态氮含量的动态变化

小油菜生育期土壤铵态氮含量动态变化如图2所示。土壤铵态氮含量总体表现趋势为在小油菜生长前期至中期急剧上升，在生长旺盛期达到峰值后下降。CF+NC处理与CF处理在各个时期差异均表现出显著水平 ($P<0.05$)，在小油菜生长旺盛期，CF+NC处理比CF处理土壤铵态氮含量提高了35.5%。OM+NC处理与OM处理土壤铵态氮含量在小油菜的生长前期、生长旺盛期、收获期差异达到显著水平 ($P<0.05$)，在小油菜生长旺盛期，OM+NC处理比OM处理土壤铵态氮含量提高了35.0%。

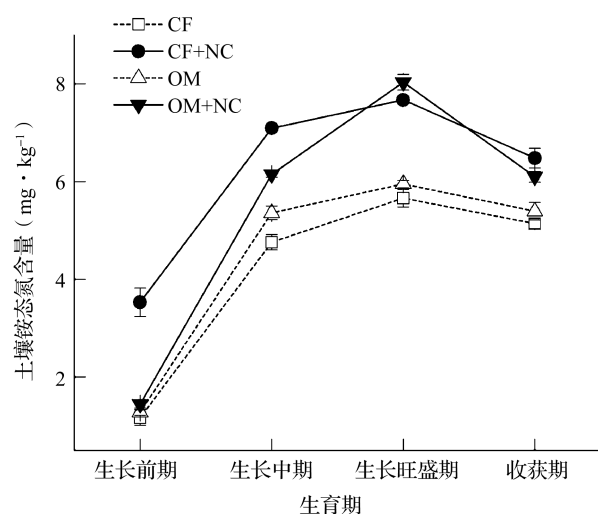


图2 小油菜生育期土壤铵态氮含量的动态变化

图3为小油菜生育期土壤硝态氮含量的动态变化，与土壤铵态氮含量变化趋势不同，不同处理下土壤硝态氮含量水平整体呈下降趋势。CF+NC与CF处理土壤硝态氮含量在各个生育期的差异均表现出显著水平 ($P<0.05$)，在小油菜生长旺盛期，CF+NC比CF处理土壤硝态氮含量提高了52.0%。OM+NC与OM处理土壤硝态氮含量在小油菜的生长中期、生长旺盛期、收获期差异达到显著水平 ($P<0.05$)，在小油菜生长旺盛期，OM+NC比OM处理土壤硝态氮含量提高了49.9%，收获期各个处理土壤硝态氮含量排序为 CF+NC>OM+NC>CF>OM。

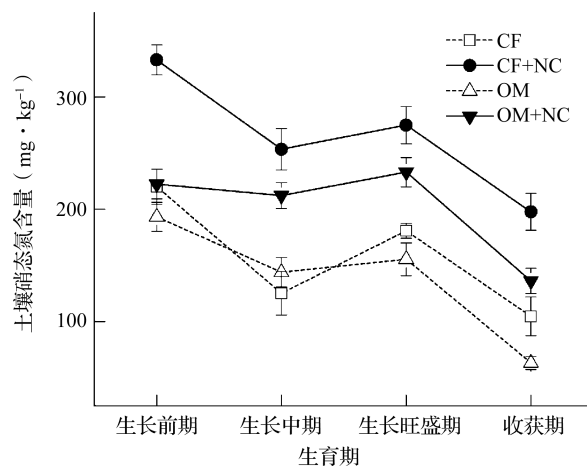


图3 小油菜生育期土壤硝态氮含量的动态变化

2.3 不同施肥处理对小油菜株高的影响

各施肥处理的株高随种植时间的延长而增加，且各个处理株高从生长前期至生长旺盛期表现为大幅度增长（图4）。在生长前期、生长中期的各个处理小油菜株高表现差异不明显。生长旺盛期，CF+NC处理株高比CF处理增加了17.3%，OM+NC比OM处理增加了6.2%。收获期各处理株高表现差异显著 ($P<0.05$)，CF+NC处理株高表现最高，为16.9 cm，比CF处理增加了9.7%；OM+NC处理收获期株高为15.7 cm，比OM处理增加了5.6%。

2.4 不同施肥处理对小油菜叶面积的影响

不同施肥处理下小油菜叶面积结果如图5所示。收获期各个处理小油菜叶面积差异显著 ($P<0.05$)，CF+NC处理小油菜叶面积最大，为86.6 cm²，比CF处理叶面积提高了13.9%，OM+NC处理小油菜叶面积为80.3 cm²，比OM处理提高了12.9%。

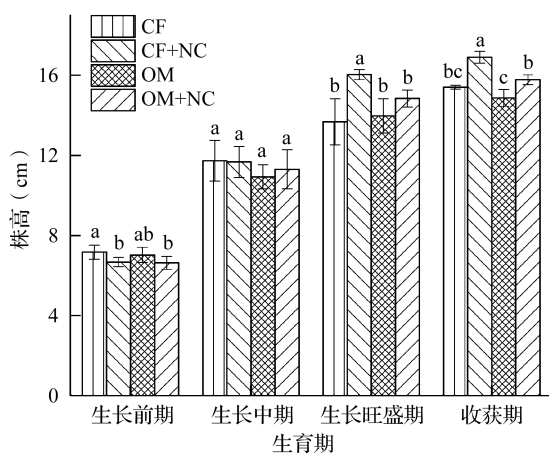


图4 不同施肥处理对小油菜株高的影响

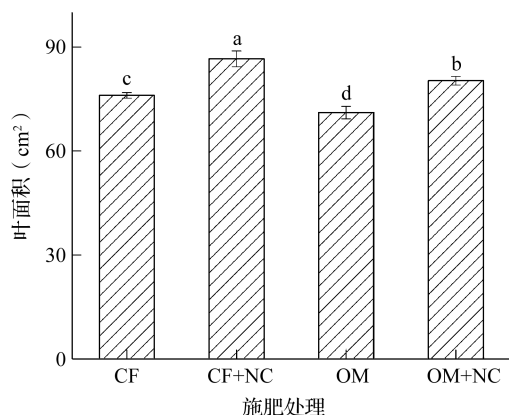
注: 柱上不同小写字母表示相同生育期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图5 不同施肥处理对小油菜叶面积的影响

注: 柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.5 不同施肥处理对小油菜干重的影响

不同施肥处理对小油菜干重的影响结果如图6所示。收获期各个处理小油菜干重差异显著 ($P < 0.05$), CF+NC 处理小油菜干重为 2.7 g, 比 CF 处理小油菜干重提高了 15.6%, OM+NC 处理小油菜干重为 2.6 g, 比 OM 处理小油菜干重提高了 14.7%。

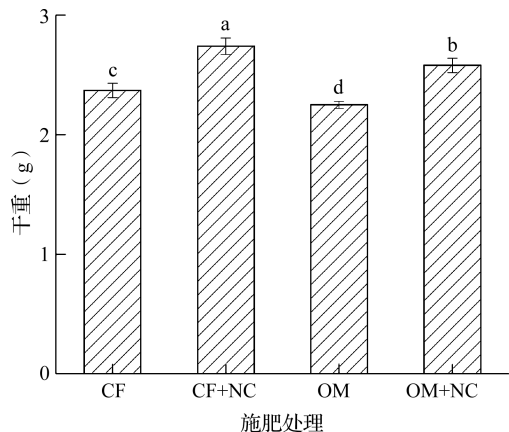


图6 不同施肥处理对小油菜干重的影响

2.6 不同施肥处理对小油菜产量的影响

不同施肥处理下小油菜产量结果如图7所示, 添加纳米碳的 CF+NC、OM+NC 处理与其相应的对照 CF、OM 处理相比均提高了小油菜产量。CF+NC 处理产量为 $16572.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比 CF 处理产量增加 $2734.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增产率为 19.8%; OM+NC 处理产量为 $14873.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比 OM 处理增加产量 $2264.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增产率为 18.0%。

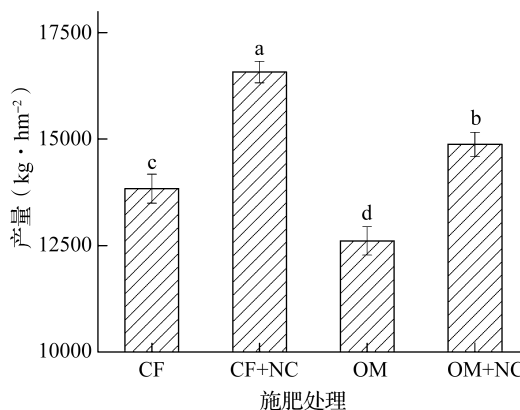


图7 不同施肥处理对小油菜产量的影响

3 讨论

3.1 纳米碳添加对小油菜生长期土壤速效养分含量的影响

钾元素不仅能提高作物品质, 而且能增强植物的抗病虫害及抗逆能力, 作物对土壤中钾元素的吸收以速效钾为主, 但速效钾的移动性强, 吸附性差, 使得作物对钾素的吸收利用率较低^[22]。在本研究中, 因生育期内植株生长发育需要吸收养分造成土壤速效钾含量持续下降, 生长前期至生长中期土壤速效钾含量下降速率较慢, 从生长中期至收获期, 小油菜的生长较快, 土壤速效钾含量急剧降低。纳米碳比表面积大, 在一定程度上包被了肥料, 使其流失速度减缓, 因此表现为添加纳米碳的 CF+NC、OM+NC 处理土壤速效钾含量均显著高于其对照 CF、OM 处理 ($P < 0.05$)。纳米碳作为一种吸附性较强的新型材料, 通过复合反应, 使钾养分从有效状态成为非有效状态, 抑制高移动性的钾离子向深层土壤迁移, 增加钾离子在施入纳米碳土层内的滞留时间^[23]。有研究表明^[24], 在土层淋溶实验中, 向土壤中加入纳米碳后, 氮磷钾养分在土壤中上层的含量显著提高, 进一步证明了纳米碳减少养分元素的淋失, 且纳米微粒与钾



肥结合后有强烈的活化钾的功能,施用纳米碳能够促进作物对钾素的吸收,从而提高了钾肥吸收效率^[25]。

氮是植物生长不可缺少的元素,铵态氮和硝态氮是大多数植物生长所需要的氮源。铵态氮主要为交换态,易被胶体吸附,硝态氮是植物的速效养分和土壤溶液的主要成分,易随水流失^[26-27]。在本研究中,小油菜生育期内土壤铵态氮含量表现为先上升至旺盛期后下降,这主要是由于小油菜生长迅速需要大量养分,在旺盛期土壤铵态氮含量表现为 OM+NC>CF+NC>OM>CF,施加纳米碳提高了土壤铵态氮的含量。与土壤铵态氮含量变化不同,不同处理下土壤硝态氮含量整体水平下降,这可能由于小油菜生长需要吸收土壤速效养分。在生长旺盛期各个处理土壤硝态氮含量增加,这可能跟土壤微生物活性有关,这部分内容本研究未涉及,有待进一步研究。配施纳米碳的化肥(CF+NC)处理与单施化肥(CF)处理土壤硝态氮含量在各个生育期的差异均表现出显著水平($P<0.05$),配施纳米碳的有机肥(OM+NC)处理与单施有机肥(OM)处理土壤硝态氮含量在小油菜的生长中期、生长旺盛期、收获期差异达到显著水平($P<0.05$),在生长前期至生长中期,有机肥处理(OM、OM+NC)硝态氮含量变化较化肥处理(CF、CF+NC)变化小,这可能跟有机肥肥效慢的特性有关。收获期各个处理土壤硝态氮含量排序为 CF+NC>OM+NC>CF>OM。CF+NC、OM+NC 处理与其对照 CF、OM 处理相比,均增加了土壤速效钾、铵态氮的含量,说明纳米碳与化肥或有机肥配施能有效增加土壤中的小油菜可利用的速效钾、铵态氮的含量,这与钱银飞等^[28]、梁太波等^[29]的研究结果一致。这可能由于纳米碳具有较大比表面积、高吸附性,一定程度上增强了土壤对水分的吸持能力,抑制了硝态氮的向下淋移,吸附一些肥料产生的 NH_4^+ , 提高土壤与根系的接触面积,增强土壤中氮肥养分的释放与活化。

3.2 纳米碳添加对小油菜产量的影响

本研究表明,在化肥、有机肥料中添加纳米碳,可影响小油菜的株高、叶面积、干重,提高产量。这与刘键等^[30-31]在大豆、小麦、水稻、冬小麦施用纳米碳肥料增效剂及王飞等^[32]在玉米上的研究结果一致。纳米碳对小油菜的多种生长指标具

有显著的促进作用,这可能由于纳米碳具有表面效应和小尺寸效应,减缓了速效养分释放,增强植物对肥料的吸附功能,减少肥料的流失、淋失和固定,达到提高长势的效果。这与梁太波等^[29]研究显示的纳米碳溶胶能够活化土壤磷素和钾素,增加各土层有效磷和速效钾含量的结果相一致。也有研究表明^[33],纳米碳可提高肥料利用率从而促进作物生长,这主要与纳米碳对肥料有效性的提升有关。纳米材料能产生特异的磁场效应,与小油菜本身的磁场之间产生宏观量子隧道效应,主动靶向性会携带大量的水分,在水不断被植物吸收的过程中,纳米碳可以携带大量氮、磷、钾等元素进入植物体内,提高了植物体养分的含量^[34-35]。全面评论纳米碳材料影响生态效应还需将植物、微生物、土壤统筹兼顾,因此,在大田试验条件下,纳米碳对土壤微生物机制的影响还应进一步研究。

4 结论

综上所述,在大田试验条件下,纳米碳配施化肥、有机肥均可提高土壤速效钾、铵态氮、硝态氮含量,显著提高了小油菜株高、叶面积、干重、产量,说明适宜的纳米碳配施可提升土壤速效养分含量,促进小油菜生长发育,提高小油菜产量。本研究探讨了纳米碳添加对土壤速效养分和小油菜产量的影响,有助于为纳米碳在农田中的应用提供理论和技术支撑。

参考文献:

- [1] Wallerstein D. Food-energy-water (FEW) nexus: rearchitecting the planet to accommodate 10 billion humans by 2050 [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 155: 104658.
- [2] 黄梓翀,刘善江,孙昊,等.我国蔬菜肥料利用率现状与提高对策[J].蔬菜,2021(7):43-50.
- [3] 张树清.中国农业肥料利用现状、问题及对策[J].中国农业信息,2006(7):11-14.
- [4] 郑茗月,李海梅,赵金山,等.微生物肥料的研究现状及发展趋势[J].江西农业学报,2018,30(11):52-56.
- [5] 刘英,熊海蓉,李霞,等.缓/控释肥料的研究现状及发展趋势[J].化肥设计,2012,50(6):54-57.
- [6] 王兴刚,吕少瑜,冯晨,等.包膜型多功能缓/控释肥料的研究现状及进展[J].高分子通报,2016(7):9-22.
- [7] 刘素敏.我国控释肥料研究的现状和展望[J].农业开发与装备,2018(9):82.



- [8] 汪冰, 丰伟悦, 赵宇亮, 等. 纳米材料生物效应及其毒理学研究进展 [J]. 中国科学 (B 辑 化学), 2005 (1): 1-10.
- [9] Linee G, Ki-Hyun K, Akash D, et al. Engineered nano particles; nature, behavior, and effect on the environment [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 196: 297-316.
- [10] Lahiani M H, Jihua C, Irin F, et al. Interaction of carbon nanohorns with plants: uptake and biological effects [J]. Carbon, 2015, 81: 607-619.
- [11] 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.
- [12] 赵振杰, 梁太波, 陈千思, 等. 碳纳米材料对植物生长发育的调节作用 [J]. 作物杂志, 2017 (2): 7-13.
- [13] Khodakovskaya M, Dervishi E, Mahmood M, et al. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth [J]. ACS Nano, 2009, 3 (10): 3221-3227.
- [14] 王佳奇, 李丽鹤, 孟令波, 等. 纳米碳对玉米种子萌发及根系形态的影响 [J]. 中国农学通报, 2013, 29 (18): 62-66.
- [15] 姜余梅, 刘强, 赵怡情, 等. 碳纳米管对水稻种子萌发和根系生长的影响 [J]. 湖北农业科学, 2014, 53 (5): 1010-1012.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 肖强, 张夫道, 王玉军, 等. 纳米材料胶结包膜型缓/控释肥料对作物产量和品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (5): 951-955.
- [19] 陆长梅, 张超英, 温俊强, 等. 纳米材料促进大豆萌芽、生长的影响及其机理研究 [J]. 大豆科学, 2002 (3): 168-171, 241.
- [20] 梁太波, 尹启生, 张艳玲, 等. 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34 (6): 1429-1435.
- [21] 郁进元, 何岩, 赵忠福, 等. 长宽法测定作物叶面积的校正系数研究 [J]. 江苏农业科学, 2007 (2): 37-39.
- [22] 胡诚, 宋家咏, 李晶, 等. 长期定位施肥土壤有效磷与速效钾的剖面分布及对作物产量的影响 [J]. 生态环境学报, 2012, 21 (4): 673-676.
- [23] 赵楚, 王霖娇, 盛茂银. 纳米碳对土壤理化性质及其微生物的影响 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42 (4): 71-81.
- [24] 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]. 长春: 吉林农业大学, 2005.
- [25] 范立春, 孙磊, 王丽华, 等. 不同施肥量配合纳米碳肥料增效剂对马铃薯产量和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (4): 208-212.
- [26] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响 [J]. 土壤学报, 2016, 53 (2): 292-304.
- [27] 习金根, 周建斌. 不同灌溉施肥方式下尿素态氮在土壤中迁移转化特性的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (3): 271-275.
- [28] 钱银飞, 邱才飞, 邵彩虹, 等. 纳米碳肥料增效剂对水稻产量及土壤肥力的影响 [J]. 江西农业学报, 2011, 23 (2): 125-127, 139.
- [29] 梁太波, 赵振杰, 王宝林, 等. 纳米碳溶胶对碱性土壤 pH 和养分含量的影响 [J]. 土壤, 2017, 49 (5): 958-962.
- [30] 刘键, 张阳德, 张志明. 纳米生物技术在水稻·玉米·大豆增产效益上的应用研究 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (36): 15814-15816.
- [31] 刘键, 张阳德, 张志明. 纳米增效肥料对冬小麦产量及品质影响的研究 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (35): 15578-15580.
- [32] 王飞, 刘彤彤, 郑成或, 等. 不同氮素水平下添加纳米碳增效剂对玉米氮肥利用率及产量影响 [J]. 中国农学通报, 2015, 31 (33): 74-78.
- [33] 杨健, 梁太波, 李海江, 等. 纳米碳溶胶对烤烟根系生理特性及钾吸收的影响 [J]. 烟草科技, 2015 (1): 7-11.
- [34] 王艳, 韩振, 张志明, 等. 纳米碳促进大豆生长发育的应用研究 [J]. 腐植酸, 2010 (4): 17-23.
- [35] 刘安勋, 廖宗文. 纳米材料对水团簇的影响 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (36): 15780-15781.

Effect of nanocarbon addition on soil available nutrients and yield of *Brassica chinensis* L.

LI Jia-xin^{1, 2}, WU Xue-ping^{2*}, LI Xiao-xiu^{1*}, LI Sheng-ping², ZHAO Gang³ (1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048; 2. Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081; 3. School of Geography Science, Shanxi Normal University, Linfen Shanxi 041004)

Abstract: Nanocarbon has been widely used as a new material in new energy and ecological restoration fields due to its unique physical and chemical properties. In recent years, as its functions are continuously explored, nanocarbon has started to be put into the agricultural field and become a new research hotspot. However, it is still unclear how the addition of nanocarbon

affects soil available nutrients and crop yield, and further research is needed. Nanocarbon was used as a fertilizer synergist in different fertilizer formulations to study its effects on soil available nutrients, agronomic traits and yield of rape under field conditions, thus providing a theoretical basis for the efficient use of nanocarbon in agriculture. The field trial was conducted in a greenhouse in Doudian township, Fangshan district, Beijing, with *Brassica chinensis* L., variety ‘Guoxia No.1’ as the material crop. Four treatments were set up: chemical fertilizer (CF), chemical fertilizer+nanocarbon (CF+NC), organic fertilizer (OM) and organic fertilizer+nanocarbon (OM+NC). Soil available nutrients, rape plant height, leaf area and yield were measured at different growth stages of *Brassica chinensis* L. The results showed that: (1) Compared with CF and OM, CF+NC and OM+NC treatments increased the soil available nutrient content and increased the soil available potassium content by 37.3% and 27.4%, soil ammonium nitrogen content by 35.5% and 35.0%, and soil nitrate nitrogen content by 52.0% and 49.9%, respectively, in vigorous growth period of *Brassica chinensis* L. (2) The addition of nanocarbon promoted the growth of *Brassica chinensis* L.; Compared with CF and OM, CF+NC and OM+NC treatments increased the height of *Brassica chinensis* L. plants by 9.7% and 5.6%, leaf area by 13.9% and 12.9%, dry weight by 15.6% and 14.7%, and yield by 19.8% and 18.0% at harvest stage, respectively. Compared to fertilizer application alone, the application of nanocarbon with inorganic and organic fertilizers significantly increased the contents of soil available nutrients, promoted the growth and development of *Brassica chinensis* L. and improved the yield.

Key words: nano-carbon; fertilizer; yield; soil available nutrients; greenhouse