

纳米碳对设施番茄土壤酶活性、速效养分及产量品质的影响

李嘉欣^{1, 2}, 武雪萍^{2*}, 李晓秀^{1*}, 高慧洲², 宋霄君², 李生平²,
韩紫璇², 刘晓彤², 张 硕³, 刘羿含³

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 北京农学院, 北京 102206)

摘要: 探讨纳米碳添加对土壤酶活性、土壤速效养分、番茄产量品质的影响。以“普罗旺斯”品种的番茄为材料, 在河北石家庄温室大棚进行纳米碳培肥试验, 设置4个施肥处理: 化肥(CK)、化肥+清水(CKH)、化肥+0.1%纳米碳(C1)、化肥+0.3%纳米碳(C2), 研究添加不同量纳米碳对土壤碳氮转化相关酶活性、硝态氮、速效钾、番茄产量与品质的影响。结果表明, (1) 施加纳米碳可显著提高土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -纤维二糖苷酶、 β -1,4-N-乙酰葡萄糖氨糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶的活性。(2) 施加纳米碳可提高土壤硝态氮、速效钾含量。采收旺盛期, C1、C2处理比CK土壤硝态氮含量提高50.7%、122.8%, 比CKH土壤硝态氮含量提高46.1%、115.9%。收获期, C1处理的土壤速效钾含量比CK、CKH土壤速效钾含量高32.0%、35.1%, C2处理下的土壤速效钾含量比CK、CKH的土壤速效钾含量高52.4%、55.9%, C2比C1处理土壤速效钾含量提高15.4%。(3) 施用不同量纳米碳均表现出增产的效果, 对部分番茄品质指标数值有提升作用。化肥中添加适量纳米碳可提高土壤碳氮转化相关酶活性, 提高土壤对碳和氮的利用、转化, 提高土壤硝态氮、速效钾含量, 对番茄有增产提质的潜力。

关键词: 纳米碳; 肥料; 土壤酶活性; 土壤速效养分; 产量; 设施番茄

土壤是设施菜地的基本生产资料^[1], 施肥是提高作物产量和土壤肥力的重要方式。肥料的不合理施用会导致有机养分资源未能充分有效利用、土壤肥力下降等一系列问题, 直接影响蔬菜产量和品质^[2-3], 为此, 许多学者通过一些技术手段如肥料包膜、添加不同生物化学调控剂等来改善肥料施入土壤中养分的转化和释放的过程, 近年来, 我国在缓释/控释化肥、稳定化肥的研究中取得初步成果^[4-6], 为发展高产优质高效农业, 促进农业实现现代化提供新途径与措施。

纳米碳是一种具有宏观量子隧道效应、量子尺度效应、表面与界面效应的小尺度纳米材料^[7], 近年来纳米材料在农业生产领域得到逐步应用, 尤

其在植物生长发育、肥料利用率和改善土壤环境等方面的作用受到了人们的极大关注。有研究表明, 将纳米碳应用到肥料当中, 可使水稻、向日葵、白萝卜、马铃薯明显增产^[8-11]。梁元振等^[12]研究表明, 硝硫基复合肥与纳米碳配合施用可促进作物叶绿素合成, 增强光合作用, 并提高地上部和地下部干物质质量, 且纳米碳可减缓养分的释放, 延长肥效, 促进植株体内氮、磷、钾养分的积累; 高荣广等^[13]研究表明, 纳米碳促进桃树对氮、钾等肥料的利用率。不同尿素添加纳米碳后可增加大豆干物质积累量, 提高苗期相对生长速率, 使大豆产量显著增加^[14]。

土壤酶主要来源于土壤微生物, 其参与了土壤中许多重要的生物化学反应, 是一种具有生物催化作用的特殊物质^[15]。它与土壤养分循环、能量转移以及环境质量等密切相关, 土壤酶活性是土壤有机质和养分转化的关键因子, 同时它们对不同施肥处理的响应能力更强。而土壤的肥力水平也对作物的产量和品质产生重要影响^[16-18]。施肥处理对土壤酶活性、土壤养分含量、作物产量品

收稿日期: 2022-08-29; 录用日期: 2022-10-29

基金项目: 企业项目(2020KF086)。

作者简介: 李嘉欣(1998-), 硕士研究生, 主要从事土壤生态和环境修复研究。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。

质的影响很大, 纳米碳配施化肥对土壤碳氮转化酶影响的研究较少, 大量研究都集中在纳米碳对作物生理、农业节肥的影响, 主要涉及纳米碳存在的条件下对作物产量、品质、养分吸收、肥效等方面的影响, 且多数是在实验室内的盆栽或是水培条件中进行。因此, 本研究在温室大棚的条件下, 以番茄作为供试作物, 设置不同量纳米碳配施化肥的4种处理, 通过研究不同剂量纳米碳配施化肥对土壤碳氮转化酶活性以及土壤速效养分、作物产量品质的影响, 评价纳米碳提升土壤肥力水平和土壤培肥效果。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验地位于河北省石家庄市鹿泉区大河镇北高庄村试验田 (114.3° E, 38.1° N)。按中国气候区划属于暖温带大陆性季风气候, 四季分明, 寒暑分

明, 降水集中于夏秋季节。年平均空气湿度 65%, 春季降水量偏少, 夏季天气比较潮湿, 秋季晴朗少雨, 温度适中, 冬季受西伯利亚冷高压的影响, 盛行西北风, 常出现降雪。试验地土壤类型为褐土, 土壤质地为壤质; 前茬作物是番茄; 前茬作物施肥量: 底施复合肥 (N-P₂O₅-K₂O=15-15-15) 750 kg · hm⁻²。试验田土壤基本状况见表 1。

1.2 试验材料

供试作物为番茄, 品种为“普罗旺斯”, 于 2022 年 1 月 20 日整地, 1 月 29 日定植, 6 月 4 日收获。纳米碳由北京十玉农业科技有限公司提供, 由氧化还原法制得, 比热容为 4.129 J · g⁻¹ · °C⁻¹。底施肥料为美国 O.E.I. 肥料公司生产的复合水溶性肥料, 总养分 ≥ 45%, N-P₂O₅-K₂O=15-15-15, 追施肥料为肥德尔 4 号大量元素水溶性肥料, N+P₂O₅+K₂O ≥ 50.1%, Fe+Mn+Zn+B 含量 0.2% ~ 3.0%。

表 1 试验田土壤基本状况

有机质 (g · kg ⁻¹)	全氮 (g · kg ⁻¹)	硝态氮 (mg · kg ⁻¹)	有效磷 (mg · kg ⁻¹)	速效钾 (mg · kg ⁻¹)	pH	电导率 (μS · cm ⁻¹)
30.5	1.12	45.3	102.1	210.0	7.8	364

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 (CK)、化肥 + 清水 (CKH)、化肥 + 0.1% 纳米碳 (C1)、化肥 + 0.3% 纳米碳 (C2), 每个处理重复 3 次, 共 12 个小区, 小区面积 30 m² (5 m × 6 m), 番茄种植密度: 株距 0.38 m, 大小行种植, 小行距 0.6 m、大行距 0.9 m。

播前整地设区施肥, 底肥 (N-P₂O₅-K₂O=15-15-15) 600 kg · hm⁻², 纳米碳以溶胶的形式施入土壤, 20 mL · m⁻², 追肥时间为 2022 年 3 月 10 日、3 月 28 日、4 月 12 日、4 月 25 日、5 月 16 日, 同时 CKH 处理补以与纳米碳等量的清水, 而 CK 处理除施肥灌水外不另补清水。从第一穗果坐住后开始追肥, 每穗果实膨大期追肥 1 次, 每次间隔 10 ~ 15 d。结果早期追施大量元素水溶肥料 2 次, 每次追施 105 ~ 150 kg · hm⁻², 结果中后期追施大量元素水溶肥料 6 次, 每次追施 120 ~ 150 kg · hm⁻²。其他管理同当地田间管理一致。

1.4 测定项目和方 法

土壤样品采集: 于开花期 (4 月 5 日)、采收

初期 (4 月 19 日)、采收盛期 (5 月 15 日)、拉秧期 (6 月 16 日) 取 0 ~ 20 cm 土样, 3 个重复。土样分为两部分, 一部分放入 4 °C 冰箱中保存, 另一部分放于阴凉处风干。

产量测定: 每次采收时记录每个试验小区番茄产量, 折算成公顷产量。

硝态氮: KCl-流动分析仪法; 速效钾: NH₄OAc 火焰光度法; 可溶性总糖: 蒽酮比色法; 可滴定酸: 酸碱中和法; 维生素 C: 2,6-二氯靛酚滴定法; 可溶性固形物: 手持式糖度计法。

土壤酶活性: 微孔板荧光法, 称取 1.5 g 新鲜土样, 放入 500 mL 的聚乙烯碗中, 加入灭菌后冷却的醋酸缓冲液 125 mL, 用磁力搅拌器充分混匀, 严格按照相应要求, 使用多通道移液器将缓冲液、土壤样品悬浊液、标准品和相应底物加入黑底的 96 孔酶标板中^[19], 采用多功能酶标仪 (Scientific Fluoroskan Ascent FL, 美国) 测定 4 种土壤水解酶即 β-1,4-葡萄糖苷酶、β-纤维二糖苷酶、β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶活性, 相应底物见表 2。具体测定参照 Saiya-Cork 等^[20]

的方法并稍作修改。试剂购于 Sigma-Aldrich 有限公司，用无菌水配置后于 4℃ 冰箱短暂保存待用。

表 2 测试酶及所用底物

酶	简写	底物
β-1,4-葡萄糖苷酶	BG	4-Methylumbelliferyl-β-D-glucoside
β-纤维二糖苷酶	CBH	4-Methylumbelliferyl-β-D-Cellobioside
β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶	NAG	4-Methylumbelliferyl-N-acetyl-β-D-galactosaminide hydrate
亮氨酸氨基肽酶	LAP	L-Leucine-7-amido-4-methylcoumarin hydrochloride

1.5 数据处理

土壤酶活性值计算具体参照 Deforest^[21] 的方法。

$$\text{酶活性} [\text{nmol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}] = \frac{\text{净荧光值} \times 125 \text{ mL}}{\text{激发系数} \times 0.2 \text{ mL} \times \text{时间} (\text{h}) \times \text{土样} (\text{g})}$$

$$\text{净荧光值} = \left(\frac{\text{样品荧光} - \text{样品对照}}{\text{淬灭系数}} \right) - \text{底物对照}$$

$$\text{激发系数} (\text{nmol} \cdot \text{e}^{-1}) = \frac{\text{标准荧光}}{0.5 \text{ nmol}}$$

$$\text{淬灭系数} = \frac{\text{淬灭标准} - \text{样品对照}}{\text{标准荧光}}$$

对所测定的数据用 Excel 2010 和 Origin 9.0 进行整理和做图，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 纳米碳对土壤酶活性的影响

2.1.1 土壤 β-1,4-葡萄糖苷酶活性

如图 1 所示，不同纳米碳处理之间土壤 β-1,4-葡萄糖苷酶活性变化幅度较大，活性范围为 5.5 ~ 29.9 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。CK 与 CKH 处理之间 β-1,4-葡萄糖苷酶活性差异显著 ($P < 0.05$)，与 CK、CKH 相比，施加纳米碳可显著提高土壤 β-1,4-葡萄糖苷酶的活性，而 C1、C2 处理之间差异不显著。土壤 β-1,4-葡萄糖苷酶活性平均值排序为 $C1 > C2 > CKH > CK$ 。

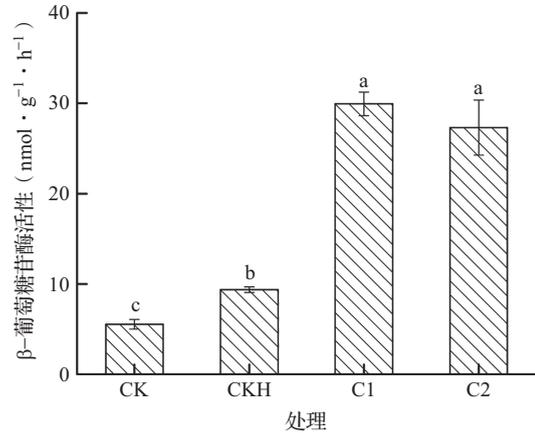


图 1 不同纳米碳处理下土壤 β-1,4-葡萄糖苷酶活性

注：字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.1.2 土壤 β-纤维二糖苷酶活性

如图 2 所示，土壤 β-纤维二糖苷酶活性范围为 3.2 ~ 4.5 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。施加纳米碳可显著提高土壤 β-纤维二糖苷酶活性 ($P < 0.05$)，与 CK 相比，C1、C2 处理分别提高了 25.2%、39.1%，与 CKH 相比，C1、C2 处理分别提高了 16.7%、29.7%。而 CK 与 CKH，C1 与 C2 处理之间差异不显著。土壤 β-纤维二糖苷酶活性平均值排序为 $C2 > C1 > CKH > CK$ 。

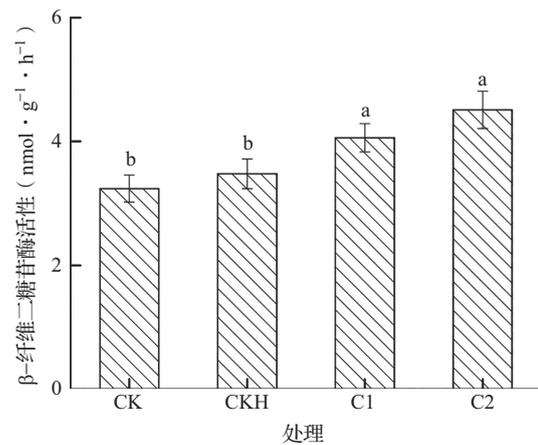


图 2 不同纳米碳处理下土壤 β-纤维二糖苷酶活性

2.1.3 土壤 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性

图 3 为不同纳米碳处理土壤 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性，土壤 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性平均值排序为 $C2 > C1 > CKH > CK$ ，范围在 3.7 ~ 6.4 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。CK、CKH 处理之间 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性差异不显著，C1、C2 处理与 CK、CKH 处理之间差异显著 ($P < 0.05$)，添加纳米碳显著提高了土壤 β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性，与 CK 相比，C1、C2 处

理分别提高 35.9%、69.5%，与 CKH 相比，C1、C2 处理分别提高 37.2%、71.1%。且 C1、C2 处理间 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性差异显著 ($P<0.05$)，与 C1 处理相比，C2 处理提高了 24.8%。

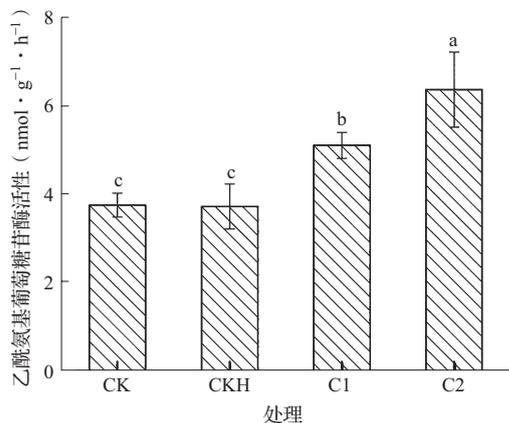


图3 不同纳米碳处理下土壤 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性

2.1.4 土壤亮氨酸氨基肽酶活性

如图4所示，不同量纳米碳处理下土壤亮氨酸氨基肽酶活性表现不同。总体表现为添加纳米碳 (C1、C2) 比 CK、CKH 处理的土壤亮氨酸氨基肽酶活性高，差异达到显著水平 ($P<0.05$)，与 CK 相比，C1、C2 处理分别提高 216.8%、222.1%，与 CKH 相比，C1、C2 处理分别提高 246.5%、252.4%，而 CK 与 CKH、C1 与 C2 处理间差异不显著。土壤亮氨酸氨基肽酶活性范围为 11.6 ~ 40.8 nmol · g⁻¹ · h⁻¹。土壤亮氨酸氨基肽酶活性平均值排序为 C2>C1>CK>CKH。

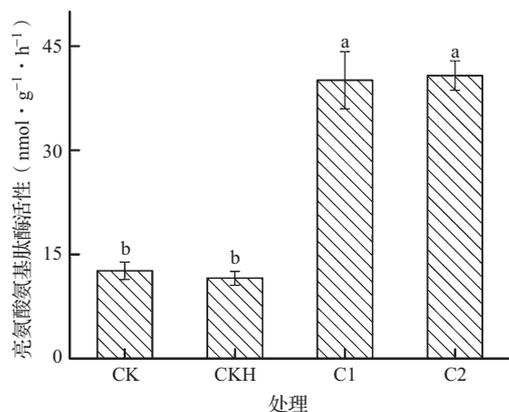


图4 不同纳米碳处理下土壤亮氨酸氨基肽酶活性

2.2 纳米碳对土壤速效养分含量的影响

2.2.1 土壤硝态氮含量动态变化

不同量纳米碳处理下土壤硝态氮含量的动态变化如图5所示，各个处理土壤硝态氮含量总体

趋势一致，均表现为不断下降。添加纳米碳 (C1、C2) 与 CK、CKH 之间土壤硝态氮含量在开花期、采收旺盛期、拉秧期差异显著 ($P<0.05$)，均表现为高于 CK、CKH。C1 与 C2 处理在除采收初期外的各个时期土壤硝态氮含量均达到差异显著水平 ($P<0.05$)，表现为土壤硝态氮含量 C2>C1。采收旺盛期、拉秧期，CK、CKH 处理之间土壤硝态氮含量差异不显著。采收旺盛期，C1、C2 处理比 CK 土壤硝态氮含量提高 50.7%、122.8%，比 CKH 土壤硝态氮含量提高 46.1%、115.9%，C2 比 C1 处理土壤硝态氮含量提高 47.9%。

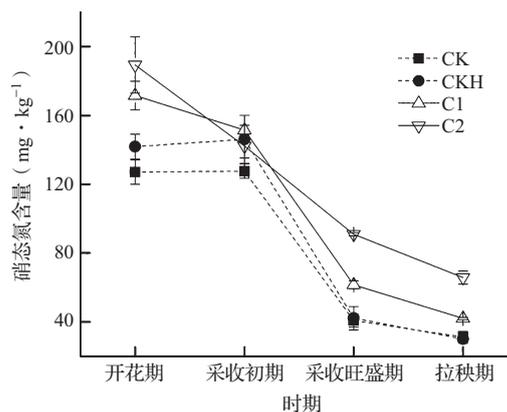


图5 不同纳米碳处理下土壤硝态氮含量动态变化

2.2.2 番茄收获期土壤速效钾含量

番茄收获期土壤速效钾含量如图6所示。与 CK、CKH 相比，添加纳米碳 (C1、C2) 均能有效提高土壤速效钾含量，且差异达到显著水平 ($P<0.05$)。收获期土壤速效钾含量平均值排序为 C2>C1>CK>CKH。C1 处理的土壤速效钾含量比 CK、CKH 处理下土壤速效钾含量高 32.0%、35.1%，C2 处理下的土壤速效钾含量比 CK、CKH 的土壤速效钾含量高 52.4%、55.9%，C2 比 C1 处理土壤速效钾含量提高 15.4%。

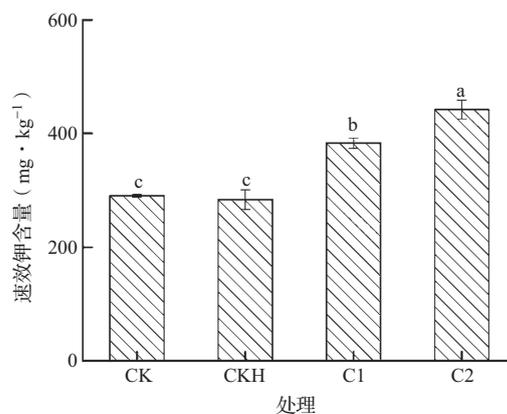


图6 不同纳米碳处理下番茄收获期土壤速效钾含量

2.3 纳米碳对番茄产量的影响

由图 7 所示, 不同纳米碳处理下番茄产量存在显著差异 ($P<0.05$)。番茄平均产量表现为 $C1>C2>CKH>CK$ 。CK 处理番茄产量为 $143984.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其余处理较 CK 处理产量增加了 $5.6\% \sim 29.1\%$, CKH 较 CK 处理产量增产 8012.8 kg , 增产 5.6% ; C1 处理番茄产量为 $185939.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较 CK 处理增产 41954.7 kg , 增产 29.1% , 较 CKH 处理增产 33941.9 kg , 增产 22.3% ; C2 处理番茄产量为 $185530.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较 CK 处理增产 41545.6 kg , 增产 28.9% , 较 CKH 处理增产 33532.8 kg , 增产 22.1% , 但 C1、C2 处理间番茄产量差异不显著。

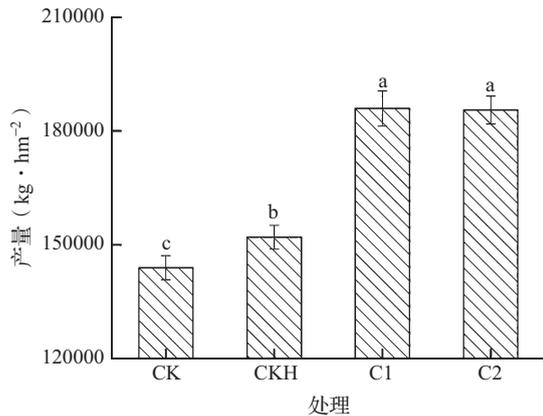


图 7 不同纳米碳处理对番茄产量的影响

2.4 纳米碳对番茄品质的影响

表 3 为不同纳米碳处理对番茄品质的影响, 结果显示, C1 处理下可溶性总糖含量最高, 与 CKH 处理差异显著; 但添加纳米碳后 (C1、C2) 番茄可溶性总糖含量与其他各处理之间差异不显著。各个处理间番茄可滴定酸含量差异不显著。番茄维生素 C 含量 C2 处理最高, 显著高于 CK 处理, 但与其他处理之间差异不显著。可溶性固形物 C1 处理最高, 显著高于 CKH 处理, 与其他处理之间差异不显著。

表 3 不同纳米碳处理对番茄品质的影响

处理	可溶性总糖 (mg · g ⁻¹)	可滴定酸 (%)	维生素 C (mg · 100g ⁻¹)	可溶性固形物 (%)
CK	38.2ab	0.5a	12.2c	5.2ab
CKH	37.4b	0.5a	13.0ab	5.2b
C1	39.2a	0.5a	13.0ab	5.4a
C2	38.2ab	0.5a	13.5a	5.2ab

注: 字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同纳米碳处理对土壤酶活性的影响

土壤中存在大量的相关土壤酶, 土壤酶是土壤有机体的代谢动力, 在生态系统中起着重要的作用, 与土壤理化性质、土壤类型、施肥、耕作以及其他农业措施等密切相关, 其活性在土壤中的表现在一定程度上反映了土壤所处的状况, 且对土壤中物质的分解、利用和转化起着关键作用^[22]。 β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -纤维二糖苷酶主要是由以纤维素为底物的微生物分泌, β -纤维二糖苷酶负责从纤维素分子的非还原端水解出纤维二糖二聚体, β -1,4-葡萄糖苷酶则负责将产生的纤维二糖水解释成葡萄糖, 供微生物自身生长利用^[23]。因此, β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -纤维二糖苷酶本身作为土壤中重要的水解酶类, 能够指示以土壤有机或无机碳为底物的异养型呼吸强度^[24-25]。 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶是参与氮循环的重要物质, β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶主要降解的是土壤中的几丁质、甲壳素和具备 β -1,4 键的氨基葡萄糖聚合物^[19]。本研究结果表明, 不同施肥处理下土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -纤维二糖苷酶、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶的活性表现不同。总体均表现为施加纳米碳 (C1、C2) 比 CK、CKH 处理显著提高土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -纤维二糖苷酶、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶的活性, 而不同剂量之间差异总体不大, 这可能与酶促反应有最大速率、底物浓度有关, 这也是未来需要继续研究的部分。添加纳米碳可提高酶活性, 可能是由于纳米碳通过吸附效应固定土壤酶, 且纳米碳本身的比表面积大的特性增大了酶与底物的接触概率, 促进酶促反应的进行^[26]。

研究表明, 纳米碳添加对土壤酶活性有促进作用, 根际土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性均高于不添加纳米碳处理^[27]。但有学者通过室内模拟设计不同量纳米碳粉添加的试验发现, 添加纳米碳后土壤脱氢酶活性降低, 但又具有微弱激活微生物的特性, 可能是因为土壤脱氢酶酶促反应产物被吸附而导致的假抑制现象^[28]。在 CKH 处理下的土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶活性高于 CK 处理, 其他酶活性与 CK 处理差异不显著, 这可能由于土壤酶活性和土壤

水分含量相关, 微生物正常代谢的需水量不足时, 胞外酶的分泌量减少, 活性降低, 土壤水分适量范围内增加, 可提高微生物胞外酶和底物的运输效率, 以及酶与底物的接触概率, 使土壤的酶活性增加^[29]。

3.2 不同纳米碳处理对土壤速效养分含量的影响

土壤无机氮含量在一定程度上可以反映土壤氮素养分的供给状况^[30], 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主要以速效钾形式进行^[31]。

在本研究中, 各个处理土壤硝态氮含量总体趋势一致, 均表现为不断下降, 这是由于作物生长需要不断吸取养分。添加纳米碳(C1、C2)与CK、CKH处理之间土壤硝态氮含量在开花期、采收旺盛期、拉秧期差异显著, 均表现为高于CK、CKH处理。C1与C2处理在除采收初期的各个时期土壤硝态氮含量差异均达到显著水平, 土壤硝态氮含量C2>C1。与CK、CKH处理相比, 添加纳米碳(C1、C2)均能有效提高土壤速效钾含量, 且达到显著水平($P<0.05$)。这与前人研究结果^[32-33]一致, 这可能由于纳米碳具有较大比表面积、强吸附性, 一定程度上增强了土壤对水分的吸持能力, 抑制了土壤中硝态氮的向下淋移^[34], 其次, 也可能与土壤微生物的固氮作用有关, 纳米碳的添加促进了碳氮转化酶活性, 加快了对有机质的降解和利用。纳米碳通过复合反应, 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^[35], 因此表现为添加纳米碳后的土壤硝态氮、速效钾含量提高, 且添加的纳米碳量越大, 土壤速效养分含量越高。

3.3 不同纳米碳处理对番茄产量与品质的影响

适宜的肥料可以改善土壤环境, 提高作物产量和品质。本研究在化肥中添加不同量纳米碳均表现出增产的效果, 且与CK、CKH处理差异达到显著水平($P<0.05$), 但C1、C2处理之间、CK和CKH处理之间产量差异不显著, 这可能也说明纳米碳溶胶提高作物产量与其溶胶中增加土壤湿度的关系不大, 这需要多季试验作物产量验证。4个处理(CK、CKH、C1、C2)番茄品质变化不一, 纳米碳添加对部分品质指标提升有显著影响。有研究认为纳米碳可提高肥料利用率, 从而促进作物生长^[30], 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, 与作物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, 从而提高产量、品质^[36-37]。前人研究表明, 加纳米碳肥料增效剂到不同肥料品种后均能提高水稻产量, 增产幅度在1.9%~3.5%之间, 纳米碳增效肥在马铃薯产量上也能表现出一定的增产效果, 具有明显的节肥作用^[38-39]。沈光业^[40]研究负载量和纳米碳增效肥对桃果实品质的影响中得出果实成熟时纳米碳增效肥可提高果实平均单果重、产量、可溶性固形物、维生素C含量。

4 结论

(1) 在土壤酶活性方面, C1和C2与CK、CKH处理相比均能显著提高土壤水解酶 β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -纤维二糖苷酶、 β -1,4-N-乙酰葡萄糖氨糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶的活性, 改善土壤微环境, 提高土壤对碳和氮的利用、转化。

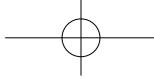
(2) 纳米碳能有效活化土壤速效养分含量, 满足番茄对大量养分的需求。采收旺盛期, C1、C2比CK处理土壤硝态氮含量提高50.7%、122.8%, 比CKH处理土壤硝态氮含量提高46.1%、115.9%。收获期, C1处理的土壤速效钾含量比CK、CKH处理下土壤速效钾含量高32.0%、35.1%, C2处理的土壤速效钾含量比CK、CKH处理的土壤速效钾含量高52.4%、55.9%, C2比C1处理土壤速效钾含量提高15.4%。

(3) 化肥中施用适量纳米碳对番茄具有增产的作用, 具有显著的提高肥力的作用, 同时, 添加纳米碳可以提高番茄部分品质指标数值, 提升口感。C1处理番茄产量为 $185939.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较CK处理增产41954.7 kg, 增产29.1%; C2处理番茄产量为 $185530.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较CK处理增产185530.5 kg, 增产28.9%。

参考文献:

- [1] 肖建军. 设施菜地土壤改良技术[J]. 现代园艺, 2020, 43(12): 23-24.
- [2] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 17-25.
- [3] 高波, 李红阳, 王凯, 等. 设施菜地土壤污染现状及防治对策[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(4): 64-66.
- [4] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓控释肥侧深施对稻田氨挥

- 排放的控制效果 [J]. 环境科学, 2017, 38 (12): 5326-5332.
- [5] 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 等. 生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响 [J]. 环境科学, 2018, 39 (12): 5383-5390.
- [6] 燕子红, 范东升, 赵彦梁, 等. 全水溶聚磷酸铵-稀土缓释肥的研制及其对蔬菜的施用效果 [J]. 中国农业科技导报, 2022, 24 (1): 157-163.
- [7] 李淑敏, 马辰, 李丽鹤, 等. 纳米碳对玉米氮素吸收及根系活力和土壤酶活性的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2014 (7): 14-18, 25.
- [8] 李一丹. 纳米碳对水稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. 中国稻米, 2013, 19 (1): 44-46.
- [9] 冯君伟, 肖越, 顾敏, 等. 纳米碳溶胶对向日葵增产效果研究初报 [J]. 园艺与种苗, 2017 (8): 55-56, 67.
- [10] 刘键, 张阳德, 张志明. 纳米生物技术促进蔬菜作物增产应用研究 [J]. 湖北农业科学, 2009, 48 (1): 123-127.
- [11] 薛照文. 纳米碳肥料增效剂在秋马铃薯上的应用试验 [J]. 农业科技通讯, 2015 (9): 104-106.
- [12] 梁元振, 朱忠坤, 樊志磊, 等. 硝硫基复合肥添加纳米碳对上海青生长和植株氮、磷、钾含量的影响 [J]. 肥料与健康, 2022, 49 (1): 38-42.
- [13] 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.
- [14] 李淑敏, 韩晓光, 张爱媛, 等. 不同尿素添加纳米碳增效剂对大豆干物质积累和产量的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2015, 46 (4): 10-16.
- [15] 陆欣春, 郑永照, 陈旭, 等. 施生物炭与有机肥对白浆土土壤酶活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2022, 41 (3): 568-574.
- [16] 张彬, 何红波, 白震, 等. 保护性耕作对土壤微生物特性和酶活性的影响 [J]. 土壤通报, 2010, 41 (1): 230-236.
- [17] 王妙芬, 梁美美, 杨庆, 等. 秸秆及其生物炭添加对土壤酶活性的影响 [J]. 福建农业科技, 2021, 52 (7): 10-17.
- [18] 曹慧, 孙辉, 杨浩, 等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9 (1): 105-109.
- [19] 宋霄君, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作可提高表层土壤碳氮含量和根际土壤酶活性 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (6): 1588-1597.
- [20] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an Acer saccharum forest soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34 (9): 1309-1315.
- [21] Deforest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41 (6): 1180-1186.
- [22] 孟立君, 吴凤芝. 土壤酶研究进展 [J]. 东北农业大学学报, 2004, 35 (5): 622-626.
- [23] Ley R E, Peterson D A, Gordon J I. Ecological and evolutionary forces shaping microbial diversity in the human intestine [J]. Cell, 2006, 124 (4): 837-848.
- [24] 魏艳红. 纤维素酶产生菌的分离鉴定及产酶条件优化 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2009.
- [25] 周璞, 魏亮, 魏晓梦, 等. 稻田土壤 β -1, 4-葡萄糖苷酶活性对温度变化的响应特征 [J]. 环境科学研究, 2018, 31 (7): 1282-1288.
- [26] 王冰冰, 曲来叶, 马克明, 等. 岷江上游干旱河谷优势灌丛群落土壤生态酶化学计量特征 [J]. 生态学报, 2015, 35 (18): 6078-6088.
- [27] 王国栋, 肖元松, 彭福田, 等. 纳米碳对草莓氮素吸收利用及植株生长的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32 (5): 335-340, 351.
- [28] 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.
- [29] 靳振江, 颜秋梅, 吴森, 等. 龙脊稻作梯田休闲期的土壤水分、养分与酶活性特征 [J]. 桂林理工大学学报, 2022, 42 (1): 177-182.
- [30] 邱悦, 杨晓燕, 李天胜, 等. 减氮配施缓释氮肥对棉田土壤酶活性和氮素吸收利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36 (3): 294-302.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 解谦, 李利, 乔俊, 等. 纳米碳增效肥在马铃薯上的应用 [J]. 山西农业科学, 2018, 46 (7): 1152-1155.
- [40] 沈光业. 负载量和纳米碳增效肥料对桃果实品质的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.



Effects of nano-carbon on soil enzyme activity, available nutrients and yield and quality of tomato in facilities

LI Jia-xin^{1,2}, WU Xue-ping^{2*}, LI Xiao-xiu^{1*}, GAO Hui-zhou², SONG Xiao-jun², LI Sheng-ping², HAN Zi-xuan², LIU Xiao-tong², ZHANG Shuo³, LIU Yi-han³ (1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048 ; 2. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081; 3. Beijing University of Agricultural, Beijing 102206)

Abstract: The effects of nano-carbon addition on soil enzyme activity, soil available nutrients, and tomato yield and quality were studied. The experiment was conducted in a greenhouse in Shijiazhuang, Hebei province, with four fertilization treatments: chemical fertilizer (CK), chemical fertilizer + water (CKH), chemical fertilizer + 0.1% nano-carbon (C1), chemical fertilizer + 0.3% nano-carbon (C2). The effects of nano-carbon on enzyme activities related to soil carbon and nitrogen conversion, nitrate nitrogen, available potassium, and tomato yield and quality were investigated. The results showed that: (1) Application of nano-carbon significantly increased the activities of soil β -1,4-glucosidase, β -cellulosidase, β -1,4-N-acetylglucosaminidase, and leucine aminopeptidase. (2) Application of nano-carbon improved the soil nitrate nitrogen and available potassium content. During the peak harvesting period, soil nitrate nitrogen content increased by 50.7% and 122.8% in C1 and C2 treatment compared with CK, and by 46.1% and 115.9% compared with CKH, respectively. At harvest, soil available potassium content was 32.0% and 35.1% higher under C1 treatment than those of CK and CKH, 52.4% and 55.9% higher under C2 treatment than CK and CKH, and 15.4% higher under C2 than C1 treatment. (3) The application of different amounts of nano-carbon showed the effect of increasing yield and improving the values of some tomato quality indexes. The addition of appropriate amount of nano-carbon to fertilizer could improve the activity of enzymes related to soil carbon and nitrogen conversion, improve the utilization and conversion of carbon and nitrogen in soil, and increase the content of nitrate nitrogen and available potassium in soil, which had the potential to increase the yield and improve the quality of tomato.

Key words: nano-carbon; fertilizer; soil enzyme activity; soil available nutrients; yield; facility tomato