

## 炭基有机肥对设施番茄生长及其土壤性质的影响

李夏, 汪玉瑛, 吕豪豪, 何莉莉, 刘玉学, 王圣森, 杨生茂

### 引用本文:

李夏, 汪玉瑛, 吕豪豪, 何莉莉, 刘玉学, 王圣森, 杨生茂. 炭基有机肥对设施番茄生长及其土壤性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 568–577.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0775>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 氮肥减量配施有机肥对苹果产量品质及土壤生物学特性的影响

杨莉莉, 王永合, 韩稳社, 马林英, 杨乖成, 韩艳云, 同延安

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 631–639 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1160>

#### 洱海流域不同有机肥替代对土壤理化性质及油菜产量的影响

万辰, 马瑛骏, 张克强, 王风, 沈仕洲

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2494–2502 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1026>

#### 施生物炭与有机肥对白浆土土壤酶活性的影响

陆欣春, 郑永照, 陈旭, 韩晓增, 邹文秀, 董本春, 严君

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 568–574 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0169>

#### 水稻秸秆生物炭对镉污染农田中番茄产量和品质的影响机制

吴伟健, 陈艺杰, 李高洋, 张伟健, 林海虹, 蔺中, 甄珍

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 492–503 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0846>

#### 餐厨垃圾制菌肥对番茄根结线虫病的防效以及对土壤生物活性的影响

余真, 张又弛, 罗文邃

农业环境科学学报. 2015(6): 1217–1224 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.06.028>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李夏, 汪玉瑛, 吕豪豪, 等. 炭基有机肥对设施番茄生长及其土壤性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 568-577.

LI X, WANG Y Y, LÜ H H, et al. Effects of biochar-based organic fertilizer on the growth and soil properties of greenhouse tomatoes [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 568-577.

# 炭基有机肥对设施番茄生长及其土壤性质的影响

李夏<sup>1,2,3</sup>, 汪玉瑛<sup>2,3</sup>, 吕豪豪<sup>2,3\*</sup>, 何莉莉<sup>2,3</sup>, 刘玉学<sup>2,3</sup>, 王圣森<sup>1</sup>, 杨生茂<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 3. 浙江省生物炭工程技术研究中心, 杭州 310021)

**摘要:**本研究通过盆栽试验,旨在研究炭基有机肥对土壤理化性质和番茄生长发育的影响,为番茄设施生产中化肥减量增效提供依据和技术支持。供试番茄品种为浙粉715,有机肥为水稻秸秆与猪粪堆肥而成,以凹凸棒土-稻壳炭复合材料、稻壳炭、污泥炭为来源,加有机肥混合制成炭基有机肥。试验设置5个处理:不施基肥(CK)、常规施肥(CF)、矿物型炭基有机肥(CT1)、稻壳炭基有机肥(CT2)、污泥炭基有机肥(CT3),研究3种炭基有机肥氮替代60%化肥氮对番茄生长、养分含量、品质和土壤质量的影响。结果表明:炭基有机肥可显著提高土壤理化性质,增加酶活性,促进叶绿素含量的增加,提高番茄产量和品质。与CF处理相比,CT1处理显著提高土壤的pH、全氮和速效钾含量,显著增加土壤脲酶和过氧化氢酶活性,CT2处理显著提高土壤的全氮和有机质含量,增加了土壤酸性磷酸酶和蔗糖酶活性。与CF处理相比,CT2处理更有利于叶绿素的积累,且番茄产量增加14.9%,氮吸收量也显著提高,CT2、CT3处理番茄的VC含量显著提高16.5%和19.5%,可溶性糖含量显著增加14.7%和12.1%,硝酸盐含量显著下降36.9%和34.9%,CT1、CT2处理番茄可溶性固形物含量显著提高14.8%和25.9%。研究表明,CT2稻壳炭基有机肥更适宜改良土壤理化性质,增加番茄叶绿素含量,提高氮吸收量,提升番茄产量和品质。

**关键词:**炭基有机肥;土壤;番茄;产量;养分吸收;品质

中图分类号:S641.2;S626 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)03-0568-10 doi:10.11654/jaes.2022-0775

## Effects of biochar-based organic fertilizer on the growth and soil properties of greenhouse tomatoes

LI Xia<sup>1,2,3</sup>, WANG Yuying<sup>2,3</sup>, LÜ Haohao<sup>2,3\*</sup>, HE Lili<sup>2,3</sup>, LIU Yuxue<sup>2,3</sup>, WANG Shengsen<sup>1</sup>, YANG Shengmao<sup>1,2,3\*</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Institute of Environmental Resources and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 3. Zhejiang Biochar Engineering Technology Research Center, Hangzhou 310021, China)

**Abstract:** Using a pot experiment, we studied the effects of biochar-based organic fertilizer on the physical and chemical properties of soil and tomato growth and provided basis and technical support for fertilizer reduction and increased productivity at tomato-growing facilities. The tomato variety tested was Zhefen 715, and the organic fertilizer used was composted rice straw and pig manure. The biochar-based organic fertilizers were made by mixing organic fertilizer with attapulgitic rice hull biochar composite, rice hull biochar, and sludge biochar. Five treatments were set up: no base fertilizer (CK), conventional fertilizer (CF), mineral biochar-based organic fertilizer (CT1), rice husk biochar-based organic fertilizer (CT2), and sludge biochar-based organic fertilizer (CT3). The effects of substituting 60% chemical fertilizer-derived N with N derived from each of the three biochar-based organic fertilizers were assessed based on soil quality, tomato

收稿日期:2022-08-01 录用日期:2022-11-30

作者简介:李夏(1998—),女,山西运城人,硕士研究生,从事生物炭材料的吸附研究及炭基有机肥的研发与应用。E-mail:2586254404@qq.com

\*通信作者:杨生茂 E-mail:yangshengmao@263.net; 吕豪豪 E-mail:lvhao\_1026@126.com

基金项目:浙江省重点研发计划项目(2020C02030,2022C02022);浙江省自然科学基金项目(LY21D030002)

Project supported: The Key Research and Development Project of Zhejiang Province, China(2020C02030,2022C02022); The Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China(LY21D030002)

growth, and nutrient content. The biochar-based organic fertilizer significantly improved the physical and chemical properties of soil, increased enzyme activity, promoted the development of chlorophyll content, and improved tomato yield and quality. Compared with the CF treatment, the CT1 treatment significantly increased soil pH value, total nitrogen, available potassium content, and soil urease and catalase activities, whereas the CT2 treatment significantly increased soil total nitrogen and organic matter contents and increased soil acid phosphatase and sucrose enzyme activities. Compared with the CF treatment, the CT2 treatment was more conducive to the accumulation of chlorophyll in tomato plants, thereby increasing the tomato yield by 14.9%. The amount of nitrogen absorption was also significantly increased in plants under CT2 treatment. In tomato plants grown under the CT2 and CT3 treatments, the contents of VC, soluble sugar, and nitrate increased by 16.5% and 19.5%, 14.7% and 12.1%, and 36.9% and 34.9% respectively, and the soluble solid content of tomatoes grown under CT1 and CT2 treatments increased by 14.8% and 25.9% compared with that of the tomatoes grown under the CF treatment. These results indicate that CT2 rice husk biochar-based organic fertilizer is optimal for improving the physical and chemical properties of soil, developing the chlorophyll content of tomato plants, increasing tomato yield, and improving tomato quality.

**Keywords:** biochar-based organic fertilizer; soil; tomato; yield; nutrient absorption; quality

番茄是我国栽培较广、消费量大的蔬果之一,因其具有丰富的营养物质而备受人们喜爱<sup>[1]</sup>。随着人们生活水平的提高,设施栽培成为满足人们需求的重要生产方式之一。虽然设施栽培能带来较大的收益,但是设施栽培土壤处于高温、高湿、高蒸发、无雨水淋洗的环境,其土壤性质极易恶化<sup>[2]</sup>,且农民盲目追求高产而不合理施用化肥,也易造成土壤酸化板结,从而影响了番茄的产量和品质<sup>[3]</sup>。通过有机无机肥科学配比、控制化肥施用量,以改善土壤结构和提高番茄产量是设施番茄栽培可持续发展的可行之路<sup>[4]</sup>。为此,2017年农业部制定了《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》,以达到化肥减量增效,促进废弃物资源化利用的效果。但是,普通有机肥产品稳定性差,过量施入土壤中时,养分吸收率较低,难以满足短期内作物对养分的需求。炭基有机肥兼具生物炭和有机肥的性质,使其稳定性和吸附能力提高,既可增强对养分的吸持,也能控制养分的流失,为作物生长提供充足的养分。

生物炭是以秸秆、锯末、动物粪便等农业废弃生物质为原料,通过高温裂解后产生的高度芳香化且难分解的固态物质,其孔隙发达,比表面积大,有大量表面负电荷,具有很强的吸附能力,且不同原料制得的生物炭性质之间存在较大的差异<sup>[5]</sup>。农业农村部于2020年发布生物炭基有机肥料是由生物炭与来源于植物和(或)动物的经过发酵腐熟的含碳有机物料混合制成的肥料(NY/T 3618—2020)。本试验中炭基有机肥是由三种不同的生物炭与有机肥混合制成,具有保水、保肥和延长肥效的功能,可改善土壤结构,提高土壤微生物的繁殖能力<sup>[6-8]</sup>。研究表明,施用炭基有机肥可增加土壤的氮磷钾含量,提高酶活性,改良农作物的品质<sup>[9-12]</sup>。目前炭基有机肥在水稻、花生、马铃薯

薯、烟草等作物上均有较好的应用效果,但在番茄栽培中的应用研究较少。因此,本研究采用盆栽试验,研究炭基有机肥对番茄生长发育和土壤理化性质的影响,筛选出更适合番茄生长发育的肥料,为番茄设施生产中化肥减施增效和土壤改良提供科学依据与技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地点为浙江省农业科学院试验基地(39°18'27"N, 120°11'34"E),供试土壤类型为黄壤,质地为砂壤土,耕层土壤(0~20 cm)基本理化性质为:pH 4.31, EC 16.83  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,全氮 1.25  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有机质 21.81  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效磷 74.15  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾 162.15  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 供试生物炭和肥料性质

#### 1.2.1 供试生物炭元素组成及其理化性质

供试生物炭为凹凸棒土-稻壳炭复合材料T1、稻壳炭T2、污泥炭T3。T1是凹凸棒土与稻壳直接混合在500℃限氧条件下炭化2h制得;T2、T3是将稻壳、市政生活污水的污泥分别在500℃限氧条件下炭化2h制得,其元素组成及其理化性质见表1。

#### 1.2.2 供试肥料的制备与性质

供试化肥为尿素(N 46.3%)、过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$  16%)、氯化钾( $\text{K}_2\text{O}$  52%),有机肥主要通过水稻秸秆和猪粪条垛式堆肥制成(N 2.39%、 $\text{P}_2\text{O}_5$  2.58%、 $\text{K}_2\text{O}$  2.27%,有机质 49.9%,水分质量分数 26%,氯离子 0.6%,pH 7.31)。炭基有机肥是将生物炭与有机肥以质量比1:4混合制得。三种炭基有机肥为矿物型炭基有机肥CT1(用凹凸棒土-稻壳炭复合材料加有机肥制成)、稻壳炭基有机肥CT2、污泥炭基有机肥CT3,其养分含量见表2。

表1 三种生物炭的元素组成及其理化性质

Table 1 Elemental composition and physicochemical properties of three biochars

生物炭 Biochar	元素组成 Element composition/%						pH	灰分 Ash content/%	比表面积 Specific surface area/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	总孔隙 Total pore volume/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔径 Pore diameter/nm
	N	C	H	S	C/N	H/C					
T1	0.46	17.80	0.91	0.26	38.70	0.05	9.19	65.51	58.16	0.08	5.60
T2	1.41	28.82	1.10	0.53	20.44	0.04	8.12	51.00	34.51	0.06	6.61
T3	1.27	9.01	1.59	0.41	7.09	0.18	7.77	74.77	55.33	0.10	6.99

表2 炭基有机肥的养分及重金属含量

Table 2 Nutrient and heavy metal content of biochar-based organic fertilizer

肥料 Fertilizer	养分含量 Nutrients content/%				重金属含量 Heavy metals content/(mg·kg <sup>-1</sup> )			
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Total	Cd	Cr	Hg	Pb
CT1	1.32	2.00	1.91	5.23	0.78	5.54	0.06	16.38
CT2	1.79	4.36	1.32	7.47	0.88	4.00	0.19	13.21
CT3	1.33	3.18	2.06	6.57	1.06	7.98	0.57	19.96

注:有机肥料中重金属含量标准,As≤15 mg·kg<sup>-1</sup>,Hg≤2 mg·kg<sup>-1</sup>,Pb≤50 mg·kg<sup>-1</sup>,Cd≤3 mg·kg<sup>-1</sup>,Cr≤150 mg·kg<sup>-1</sup>(NY/T 525—2021)。

Note: The content standard of heavy metals in organic fertilizers, As≤15 mg·kg<sup>-1</sup>, Hg≤2 mg·kg<sup>-1</sup>, Pb≤50 mg·kg<sup>-1</sup>, Cd≤3 mg·kg<sup>-1</sup>, Cr≤150 mg·kg<sup>-1</sup> (NY/T 525—2021).

### 1.3 试验设计

供试番茄品种为浙粉715,由浙江省农业科学院蔬菜研究所提供。盆栽试验设置5个处理,每个处理4次重复。处理分别是不施基肥对照(CK)、常规施肥对照(CF)、炭基有机肥处理组(CT1、CT2、CT3)。常规施肥的基肥施肥量为N 300 kg·hm<sup>-2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 300 kg·hm<sup>-2</sup>,K<sub>2</sub>O 300 kg·hm<sup>-2</sup>;炭基有机肥的基肥施肥量为N 300 kg·hm<sup>-2</sup>。于定植后20、50、75 d各追肥一次,采用海法保力丰水溶性肥料[海法法特姆(青岛)有限公司],N、P、K养分比例为21:21:21,单次追肥量为66.87 kg·hm<sup>-2</sup>,3次等量追肥(总施肥量中炭基有机肥氮替代60%化肥氮,CK、CF处理与CT处理等量追肥)。每盆装入4 kg土,定植1株,每株留3穗果,全育期130 d。于2021年9月1日定植,12月15日拉秧。

### 1.4 测定项目与方法

#### 1.4.1 土壤理化指标

混合均匀之后采集植株盆内土,拣去杂物并风干研磨,过2 mm和0.15 mm筛后装袋备用。测定土壤pH、有机质、全氮、有效磷及速效钾含量<sup>[13]</sup>。取风干土样,先过0.425 mm筛,再研磨过0.25 mm筛,用苯酚钠-次氯酸钠法、3,5-二硝基水杨酸比色法、紫外分光光度计法和相对硝基苯磷酸二钠比色法分别测定土

壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性,方法见参考文献[9]。

#### 1.4.2 番茄样品指标

在番茄定植后,每隔7 d测一次株高、茎粗和SPAD值。收获期,用电子天平(JY10002,上海)对番茄称质量,得到总产量,每个处理采5个大小均匀的果实,用2,6-二氯酚酚滴定法、蒽酮法、折射仪法(NY/T 2637—2014)和紫外分光光度计法(GB 5009.33—2016)分别测定番茄VC、可溶性糖、可溶性固形物和硝酸盐含量<sup>[14-15]</sup>。将新鲜植株和番茄洗净晾干,烘干至质量恒定,用电子天平称量其干质量并装袋备用<sup>[16]</sup>。烘干后的植株和番茄样研磨过0.15 mm筛,0.5 g干样加混合催化剂和硫酸溶液放置过夜,消煮、清洗、定容、过滤后,分别用凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰光度法测定其全氮、全磷和全钾含量<sup>[17]</sup>。

#### 1.5 数据处理

试验数据用Excel 2010和Origin 2021进行整理和制图,用SPSS19.0进行单因素方差分析(LSD法,α=0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 炭基有机肥对土壤理化性质及酶活性的影响

#### 2.1.1 炭基有机肥对土壤pH及养分的影响

如图1a所示,CT处理较CF处理均提高了番茄土壤的pH值,其中炭基有机肥处理组土壤pH值大小表现为CT1>CT2>CT3,pH值分别是5.99、5.58、5.47。由图1a和图1b可知,与CF处理相比,CT1、CT2处理下土壤有机质含量分别显著提高21.1%、34.6%,全氮含量分别显著提高45.7%、44.9%,CT1、CT2处理土壤全氮含量显著高于CT3处理(P<0.05)。由图1b和1c可知,CT处理较CF处理均显著提高了土壤有效磷和速效钾含量,其有效磷含量表现为CT2>CT3>CT1,速效钾含量表现为CT1>CT3>CT2,CT处理组之间有效磷和速效钾含量均具有显著性差异(P<0.05)。可见,炭

基有机肥可以显著改善土壤的理化性质和基础地力。

### 2.1.2 炭基有机肥对土壤酶活性的影响

炭基有机肥对土壤酶活性的影响如表3所示,3种炭基有机肥处理较常规施肥处理,均对土壤酶活力起到了促进作用。其中,与CF处理相比,CT1、CT2和CT3处理下的土壤脲酶活性显著提高了85.8%、38.6%和31.5%,且3种炭基有机肥处理差异显著( $P < 0.05$ ),其脲酶活性表现为CT1>CT2>CT3;CT2处理下土壤酸性磷酸酶和蔗糖酶活性最高,较CF处理分别提高47.2%和107%( $P < 0.05$ ),CT1处理下土壤酸性磷

酸酶活性与CF处理相比无显著性差异,蔗糖酶活性较CF处理显著提高27.7%,CT3处理下土壤酸性磷酸酶活性显著高出CF处理7.76%,蔗糖酶活性与CF处理相差较小,且CT1、CT3处理间土壤酸性磷酸酶和蔗糖酶活性差异不显著。另外,炭基有机肥处理较常规施肥处理均显著提高了土壤过氧化氢酶活性,相较于CF处理,CT1、CT2处理和CT3处理分别提高了49.5%、36.8%和42.8%。总体而言,炭基有机肥较常规施肥处理提高了土壤酶活性,其中CT1处理能显著提高脲酶和过氧化氢酶活性,CT2处理可显著提高土壤酸性磷酸酶和蔗糖酶活性。

## 2.2 炭基有机肥对番茄叶绿素含量及产量的影响

### 2.2.1 炭基有机肥对番茄叶绿素含量的影响

不同施肥处理下番茄SPAD含量随着番茄的生长发育呈现出先上升后下降的趋势(表4)。定植21~35 d内,CT2、CT3处理下的番茄叶绿素含量高于CF处理和CT1处理;定植35~56 d内,CT2处理下SPAD值均高于其他处理,尤其在定植49 d时,较CF处理提高3.57%,较CT1处理提高5.35%,较CT3处理提高6.27%;在番茄定植84 d时,各施肥处理番茄SPAD值表现为CT2>CT3>CT1>CF>CK,但炭基有机肥处理间无显著性差异。总体而言,炭基有机肥处理有利于番茄植株叶片内的叶绿素累积,其中CT2处理效果最佳。

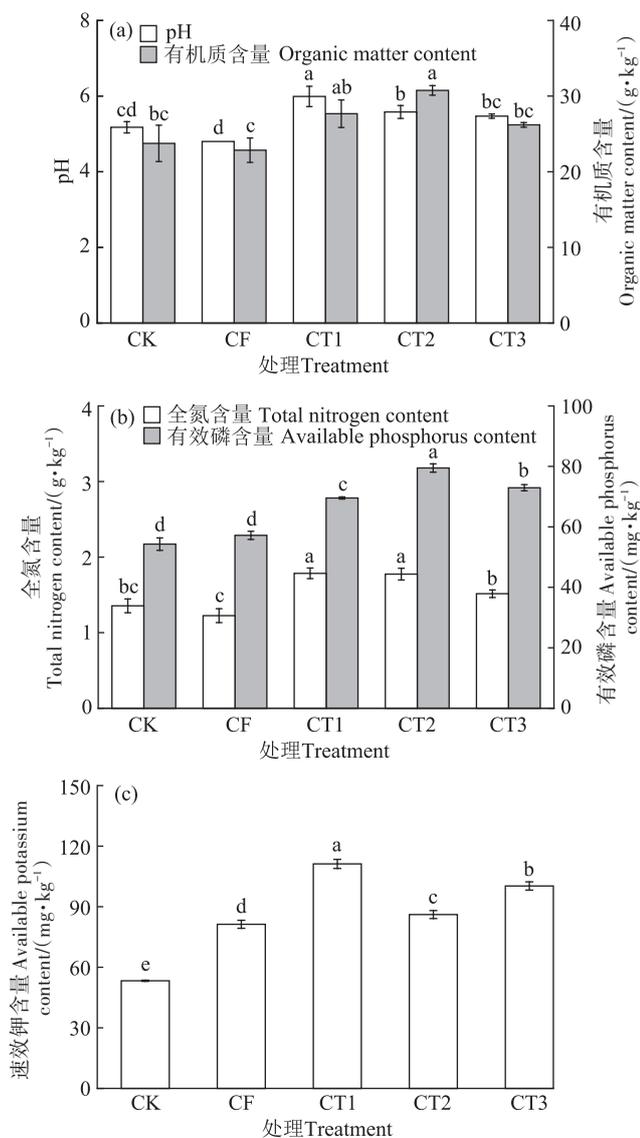
### 2.2.2 炭基有机肥对番茄产量和秸秆干质量的影响

炭基有机肥对番茄产量的影响如图2所示,CT1、CT2处理和CT3处理番茄产量均高于CF处理,其中CT2处理下的番茄产量最高,较CF处理提高14.9%( $P < 0.05$ ),CT3处理和CT1处理下番茄产量分别提高了14.3%、9.22%。这表明炭基有机肥对番茄有一定的增产作用。

炭基有机肥对秸秆干质量的影响如图2所示,CF、CT1处理和CT2处理下的秸秆干质量无显著性差异,CT3处理下秸秆干质量略低于CF处理。这说明炭基有机肥处理对秸秆干物质质量影响较小。

## 2.3 炭基有机肥对番茄和秸秆养分含量和养分吸收量的影响

炭基有机肥对番茄和秸秆养分含量的影响如图3所示。CT2处理下番茄氮素含量与CF处理无显著性差异,但显著高于CT3、CT1处理(图3a)。CT3、CT1处理下番茄氮素含量均低于CF处理。炭基有机肥对番茄氮素吸收量的影响如表5所示,与CF处理相比,CT2处理番茄氮素吸收量显著增加,CT3、CT1处理下



不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

图1 炭基有机肥对土壤理化性质的影响

Figure 1 Effects of biochar-based organic fertilizers on soil physical and chemical properties

表3 炭基有机肥对土壤酶活性的影响

Table 3 Effects of biochar-based organic fertilizers on soil enzyme activity

处理 Treatment	脲酶活性 Urease activity/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ )	酸性磷酸酶活性 Acid phosphatase activity/ ( $\text{nmol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ )	蔗糖酶活性 Sucrose enzyme activity/ ( $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ )	过氧化氢酶活性 Catalase activity/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ )
CK	232.58±1.59e	1 389.94±2.76d	4.02±0.45d	223.47±13.32c
CF	288.22±5.91d	1 965.52±8.10c	4.99±0.19cd	194.67±11.99d
CT1	535.45±6.96a	2 049.93±3.29bc	6.37±0.74b	291.05±3.29a
CT2	399.57±5.49b	2 892.53±3.04a	10.33±0.13a	266.31±2.96b
CT3	378.86±2.22c	2 118.06±7.23b	6.11±0.47bc	277.95±2.43ab

注: 同列不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。表5同。

Note: Different letters in the same column meant significant differences among treatments at 0.05 level. The same as table 5.

表4 炭基有机肥对番茄叶绿素含量的影响

Table 4 Effects of biochar-based organic fertilizers on chlorophyll content of tomato

定植后天数 Days after planting/d	处理 Treatment				
	CK	CF	CT1	CT2	CT3
7	47.3±1.35b	47.5±1.69b	49.9±0.78a	51.8±0.58a	51.9±0.71a
14	47.6±1.62b	49.8±2.39b	49.8±1.84b	50.4±0.78b	53.2±0.54a
21	48.3±0.51d	51.2±2.50c	51.9±0.93bc	53.9±0.76ab	54.5±0.67a
28	60.7±0.92b	59.2±0.17c	60.8±0.90b	62.1±0.49a	61.7±0.44ab
35	59.8±0.10c	59.0±0.23d	60.7±0.60b	61.7±0.42a	61.4±0.30ab
42	59.6±0.57b	59.4±0.72b	60.0±0.78b	61.6±0.55a	60.4±0.41b
49	58.6±0.56bc	58.9±1.04b	57.9±0.58bc	61.0±0.60a	57.4±0.66c
56	58.0±1.32b	60.5±0.85a	59.1±1.37ab	60.9±1.10a	57.0±1.07b
84	45.1±0.81c	46.0±0.76bc	46.9±0.60ab	47.6±0.76a	47.2±0.45ab

注: 同行不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different letters in the same row meant significant differences among treatments at 0.05 level.

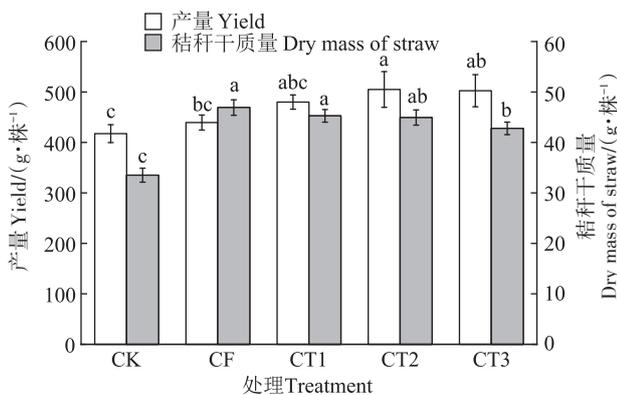


图2 炭基有机肥对番茄产量及秸秆干质量的影响

Figure 2 Effects of biochar-based organic fertilizers on tomato yield and dry mass of straw

番茄氮素吸收量显著降低( $P<0.05$ )。这表明CT2处理可以促进番茄对氮素的吸收利用。

CT2、CT3处理下番茄秸秆磷素含量显著高于CF、CT1处理( $P<0.05$ ,图3b),CT1处理下番茄秸秆磷

素含量与CF处理无显著性差异。与CF处理相比,CT处理下番茄果实磷素含量并无显著性差异。如表5所示,较CF处理相比,CT处理组均显著提高了番茄的磷素吸收量( $P<0.05$ ),其中CT2、CT3处理下番茄磷素吸收量显著高于CT1处理。

CT处理较CF处理均显著增加番茄的钾素含量( $P<0.05$ ,图3c)。其中CT1、CT2处理的番茄秸秆钾素含量显著高于CT3处理,CT1处理下番茄果实钾素含量显著高于CT2、CT3处理,分别提高20.1%和9.90%。如表5所示,与CF处理相比,CT处理组均显著提高了番茄的钾素吸收量( $P<0.05$ ),其中CT1处理下番茄钾素吸收量最高。这表明CT1处理可以更好地促进番茄对钾素的吸收。

#### 2.4 炭基有机肥对番茄品质的影响

炭基有机肥对番茄品质的影响如图4所示。与CF处理相比,CT2、CT3处理下番茄VC含量分别显著提高16.5%和19.5%(图4a),可溶性糖含量分别显著

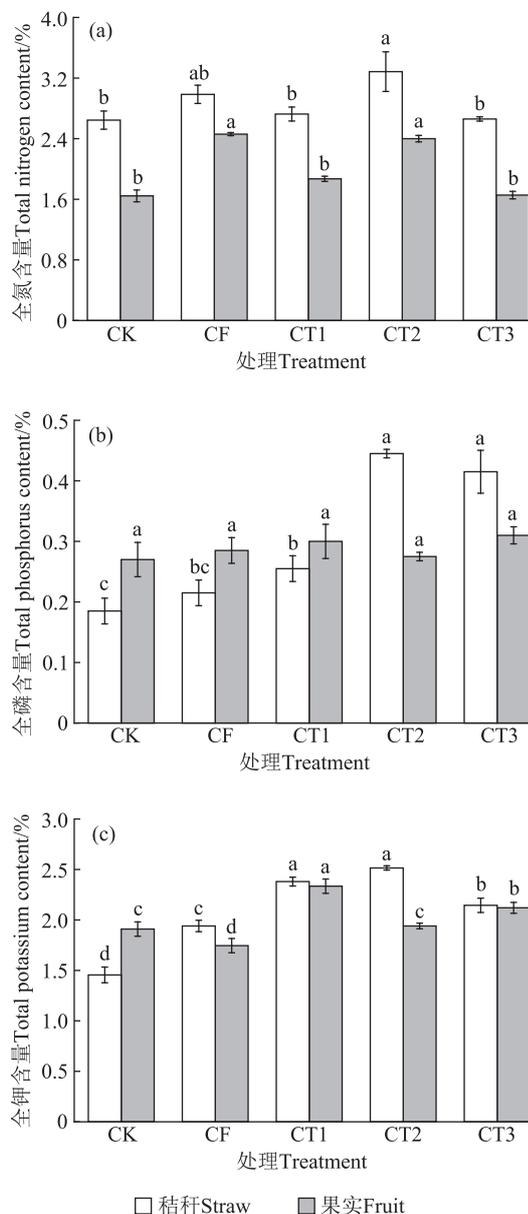


图3 炭基有机肥对番茄养分含量的影响

Figure 3 Effects of biochar-based organic fertilizers on nutrient content of tomato

表5 炭基有机肥对番茄养分吸收的影响( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ )Table 5 Effects of biochar-based organic fertilizer on nutrient absorption of tomato( $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ )

处理 Treatment	氮素吸收量 Nitrogen absorption	磷素吸收量 Phosphorus absorption	钾素吸收量 Potassium absorption
CK	1.57±0.07d	0.18±0.01d	1.31±0.04e
CF	2.48±0.06b	0.23±0.02c	1.68±0.03d
CT1	2.13±0.03c	0.27±0.02b	2.20±0.01a
CT2	2.69±0.14a	0.34±0.01a	2.11±0.03b
CT3	1.97±0.01c	0.34±0.01a	1.99±0.01c

增加14.7%和12.1%(图4a),硝酸盐含量显著下降36.9%和34.9%(图4b,  $P<0.05$ )。CT处理间可溶性糖含量无显著性差异。CT2、CT3处理更有利于提高番茄VC和可溶性糖含量,降低硝酸盐含量。

炭基有机肥对番茄可溶性固形物含量影响如图4b所示,CT1、CT2处理下番茄可溶性固形物含量最高,与CF处理相比分别显著增加14.8%和25.9%( $P<0.05$ )。可见,CT1、CT2处理均能提高番茄可溶性固形物含量。

### 3 讨论

#### 3.1 炭基有机肥对番茄土壤理化性质的影响

炭基有机肥可以改善土壤结构,调节作物生长所需的适宜pH,提高土壤氮磷钾含量,平衡中微量元素含量,延缓养分释放,从而促进作物养分吸收<sup>[18-20]</sup>。本研究表明,与常规施肥处理相比,3种炭基有机肥处理下土壤pH得到显著性提高,这是因为3种生物炭本身含有较高的pH(表1),其灰分中含有较多的氧化物和氢氧化物等,均有利于提升土壤pH<sup>[21-22]</sup>。矿物

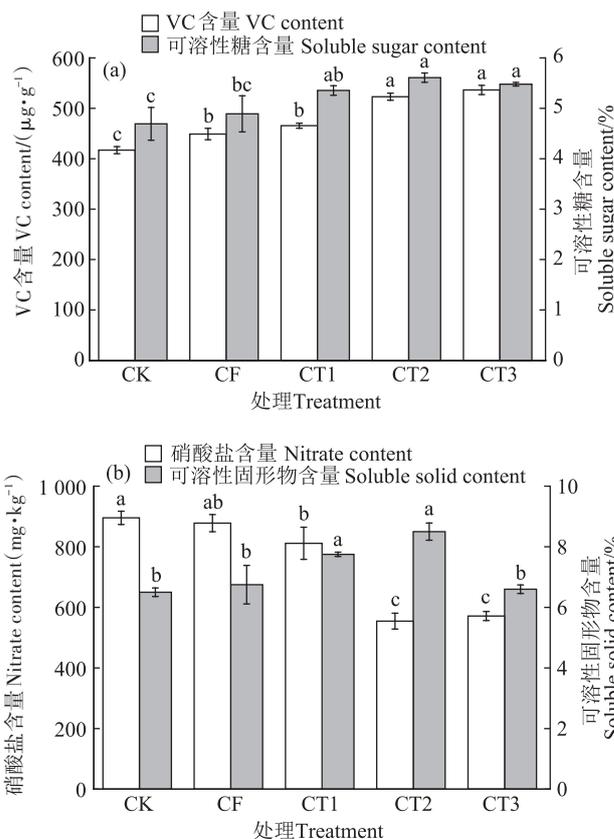


图4 炭基有机肥对番茄品质的影响

Figure 4 Effects of biochar-based organic fertilizers on tomato quality

型炭基有机肥处理下土壤pH显著高于其他两种炭基有机肥,这可能是因为凹凸棒土-稻壳炭复合材料pH高于稻壳炭和污泥炭(表1),使炭基有机肥对土壤pH调节能力不同。矿物型炭基有机肥和稻壳炭基有机肥较常规施肥处理显著提高了土壤有机质含量,这可能是因为生物炭通过与有机矿物作用而形成有机-矿物复合物,促进有机肥中碳的稳定,增加土壤有机质含量<sup>[23]</sup>。3种炭基有机肥处理下土壤有机质含量表现为稻壳炭基有机肥>矿物型炭基有机肥>污泥炭基有机肥,这可能与3种生物炭的碳含量不同有关(表1)。土壤氮素大部分以有机态氮形式存在,主要来源于有机质,有机质含量与全氮含量有一定的相关性<sup>[23]</sup>。炭基有机肥施用也可提高土壤的有机氮含量。矿物型炭基有机肥和稻壳炭基有机肥处理较常规施肥和污泥炭基有机肥处理相比均显著增加土壤的全氮含量,可能是这两种炭基有机肥处理下土壤有机氮含量高于常规施肥的原因。生物炭的吸附性能也可能是影响土壤全氮的重要因素之一,在等氮处理条件下,凹凸棒土-稻壳炭复合材料和稻壳炭的H/C值小于污泥炭(表1),吸附能力较高,可吸收固定土壤和有机肥中的氮素,减少氮素的流失,从而提高土壤全氮含量<sup>[24]</sup>。可见,炭基有机肥处理下土壤有机质和全氮含量高于常规施肥处理(图1),提升了土壤肥力的可持续性,进一步提高作物的生产力。与常规施肥处理相比,3种炭基有机肥处理下土壤有效磷含量均显著增加,其有效磷含量表现为稻壳炭基有机肥>污泥炭基有机肥>矿物型炭基有机肥,这可能与稻壳炭基有机肥处理的磷投入量有关。3种炭基有机肥处理较常规施肥显著提高土壤速效钾含量,其速效钾含量表现为矿物型炭基有机肥>污泥炭基有机肥>稻壳炭基有机肥。稻壳炭基有机肥处理下钾投入量低于常规施肥处理,土壤速效钾含量高于常规施肥,这可能是因为稻壳炭本身H/C值较低(表1),芳香性较高,吸附能力较好,能够有效减少有机肥中钾养分流失,有机肥也能够补偿养分,从而提高了土壤速效钾含量<sup>[24]</sup>。

土壤酶主要是由土壤微生物、植物根系和土壤动物产生,与土壤养分的转化有关,其活性可以用来评价土壤肥力和质量<sup>[25]</sup>。研究表明,土壤脲酶和过氧化氢酶活性与土壤pH、全氮含量有关<sup>[26-27]</sup>,土壤酸性磷酸酶活性与土壤有效磷含量有关<sup>[28]</sup>,土壤蔗糖酶对增加土壤中易溶性营养物质起重要作用,与土壤中有有机质、全氮、磷含量有关<sup>[29]</sup>。本试验表明不同的炭基有

机肥较常规施肥处理均可提高土壤酶活性,这是因为生物炭具有较好的孔隙结构,为微生物提供良好的生存环境,提高土壤微生物的活性,从而提高土壤肥力,促进酶活性的增强。其中,矿物型炭基有机肥处理下土壤脲酶和过氧化氢酶活性最高,其土壤pH和全氮含量均高于稻壳炭基有机肥和污泥炭基有机肥处理(图1),改良了土壤性质,从而使脲酶和过氧化氢酶活性增加。稻壳炭基有机肥处理下土壤酸性磷酸酶活性和蔗糖酶活性最高,与土壤有效磷和有机质含量高于其他两种炭基有机肥处理有关(图1)。

### 3.2 炭基有机肥对番茄叶绿素含量及产量的影响

叶绿素含量的高低能反映植物的生长状况和叶片光合能力,与叶片的氮含量相关<sup>[30]</sup>。本试验中番茄叶片SPAD值呈现先增大后减小的变化趋势,在定植7~35 d内,3种炭基有机肥处理均高于常规施肥处理。因为炭基有机肥较常规施肥处理提高了土壤的养分含量(图1),为番茄根系的生长提供营养,而根系能够从土壤中吸收较多的矿质元素,促进番茄生长,从而增强番茄光合作用<sup>[31]</sup>。在定植35~56 d内,稻壳炭基有机肥处理叶片SPAD值大于其他两种炭基有机肥处理,这可能是因为稻壳炭吸附性更好(表1),能够更好地控制养分的流失,使养分能够满足番茄后续的生长需求。

炭基有机肥可以促进植株生长,增加作物产量<sup>[32]</sup>。本试验发现,与常规施肥处理相比,炭基有机肥处理有效地提高了番茄的产量。生物炭本身具有较好的吸附作用,可以增加土壤的养分含量(图1),改善土壤的孔隙结构和持水性,为作物生长提供良好的生长环境,从而提高作物产量<sup>[33]</sup>。稻壳炭基有机肥处理番茄产量最高,可能是稻壳炭本身H/C值低于凹凸棒土-稻壳炭复合材料和污泥炭(表1),吸附性更佳,可以控制氮磷钾养分流失,同时也提高了土壤的养分含量(图1),促进番茄根系生长,从而有利于番茄对养分的吸收能力,因此产量得到提升。常规施肥处理、矿物型炭基有机肥处理和稻壳炭基有机肥处理下的番茄秸秆干质量差异不显著,这与魏存<sup>[28]</sup>的研究结果相似。

因此,炭基有机肥可能通过前期对土壤有机质、酶活以及叶绿素含量的提升,进而影响番茄前期的生长,主要体现在植株前期的株高和茎粗的差异,最终实现番茄产量的提升。

### 3.3 炭基有机肥对番茄养分吸收的影响

作物养分吸收与土壤肥力和肥料的养分供应状

况有关。影响作物产量与品质好坏的重要因素是氮素。本试验中,与常规施肥处理相比,稻壳炭基有机肥处理下番茄氮素吸收量显著提高,在等氮条件下,可能是因为稻壳炭基有机肥提高了番茄叶片的叶绿素含量(表4),增强了番茄的光合作用,促进番茄对氮素的吸收利用,此外,稻壳炭吸附性较好,能够减少氮素的流失,改善土壤的氮素供应状况,使土壤氮养分能被番茄吸收,从而提高番茄的氮素吸收量<sup>[34]</sup>。其他两种炭基有机肥处理下番茄氮素吸收量低于常规施肥处理,从表4分析出,在定植42 d后,凹凸棒土-稻壳炭基有机肥和污泥炭基有机肥处理下叶绿素含量与常规施肥相差较小,甚至显著降低,影响了番茄的光合作用,从而限制了番茄对氮素的吸收;另外,凹凸棒土-稻壳炭复合材料目前在重金属修复领域应用广泛,在果实氮吸收方面可能效果欠佳,污泥炭H/C值较高(表1),吸附性较差,在改善土壤环境方面较弱(图1),影响了番茄的氮吸收。

与常规施肥处理相比,稻壳炭基有机肥和污泥炭基有机肥处理番茄磷素吸收量显著提高,可能与磷投入量有关,与土壤有效磷含量规律一致。较常规施肥处理相比,3种炭基有机肥处理均促进了番茄对钾素的吸收,这是因为3种炭基有机肥处理下土壤的速效钾含量均增加(图1),提高了土壤养分的供应能力,从而促进番茄对钾素的吸收。稻壳炭基有机肥处理番茄钾素吸收量高于常规施肥,钾投入量低于常规施肥,这可能是因为相比化学肥料,稻壳炭具有较好的吸附性,能够减少养分的流失,促进养分在番茄生殖器官中积累,提高番茄的钾素吸收量,与土壤速效钾的结果一致。

### 3.4 炭基有机肥对番茄品质指标的影响

炭基有机肥可提高番茄的品质<sup>[35-37]</sup>。本试验中,施入炭基有机肥后,番茄VC、可溶性糖、可溶性固形物含量较常规施肥处理均有所提高,硝酸盐含量降低。这可能是因为炭基有机肥具有肥效稳定、养分持续释放的特点,有利于番茄营养代谢的协调与均衡,从而使其品质提升<sup>[38]</sup>,生物炭具有较强的吸附作用,可以增加养分的吸持,提高土壤养分含量(图1),促进番茄根系对养分的利用吸收<sup>[39]</sup>,从而提高番茄的品质。从图4可看出,稻壳炭基有机肥对番茄品质改良具有更显著的作用,这可能是因为施入稻壳炭基有机肥增加了番茄叶绿素含量,促进光合产物向果实运输,这与吴伟建等<sup>[22]</sup>的研究结果相似,此外,稻壳炭基有机肥显著提高了土壤的有机质和全氮含量(图1),为番

茄生长提供适宜的生长环境,从而提高番茄品质。

## 4 结论

(1)炭基有机肥显著增加了脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性,提高了土壤pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾含量,改善了土壤环境。

(2)炭基有机肥促进番茄叶绿素含量的积累,提高番茄产量。炭基有机肥增加番茄的VC、可溶性糖和可溶性固形物含量,降低了硝酸盐含量。

(3)研究表明,稻壳炭基有机肥部分替代化肥处理对土壤理化性质和番茄的生长影响效果最佳,在化肥减量增效、土壤的理化性质改良以及番茄品质提升方面均具有广阔的应用前景。

(4)炭基有机肥应用减少了化肥的施用量,且具有控制养分流失,减少其在土壤中的迁移转化能力,改善土壤环境,具有较好的资源再利用与环境保护效应;但与常规施肥相比,施入炭基有机肥投入成本仍高于常规化肥的施用成本,本试验研究的3种炭基有机肥料中,稻壳炭基有机肥用量最少,效果最好,成本最低;但在产业化应用与推广方面仍需农业部门通过生态补贴等方式,支持炭基有机肥的应用推广。

### 参考文献:

- [1] 柳美玉,曹红霞,杜贞其,等. 营养液浓度对番茄营养生长期干物质累积及养分吸收的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 119-126, 133. LIU M Y, CAO H X, DU Z Q, et al. Effect of nutrient concentration on dry matter accumulation and nutrients absorption of tomato[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(4): 119-126, 133.
- [2] 杨阳,宋炳彦,刘云,等. 氮磷钾配比对日光温室番茄产量和品质的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(增刊1): 191-194. YANG Y, SONG B Y, LIU Y, et al. Effect of N, P and K ratio on yield and quality of tomato in solar greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(Suppl1): 191-194.
- [3] 方胜志,高佳蕊,王虹桥,等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤净矿化氮动态变化的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1173-1181. FANG S Z, GAO J R, WANG H Q, et al. Effects of combined application of nitrogen fertilizer and manure on the dynamics of net mineralized nitrogen in greenhouse soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(5): 1173-1181.
- [4] 王育红,肖辉,程文娟,等. 炭基肥对设施土壤肥力、番茄产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(16): 390-392. WANG Y H, XIAO H, CHENG W J, et al. Effects of biochar fertilizer on soil fertility, tomato yield and quality in greenhouse[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(16): 390-392.
- [5] 刘玉学,刘微,吴伟祥,等. 土壤生物炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982. LIU Y X, LIU W, WU W X,

- et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4):977-982.
- [6] 曾猛, 潘玉蕊, 彭银, 等. 减量化肥配合炭基有机肥对设施切花月季生长及土壤性状的影响[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(8):2202-2210. ZENG M, PAN Y R, PENG Y, et al. Effects of reduced fertilizer combined with carbon-based organic fertilizer on growth of cut rose and soil properties in greenhouse[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(8):2202-2210.
- [7] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. *土壤*, 2011, 43(6):857-861. XIE Z B, LIU Q, XU Y P, et al. Advances and perspectives of biochar research[J]. *Soils*, 2011, 43(6):857-861.
- [8] 陈坤, 徐晓楠, 彭靖, 等. 生物炭及炭基肥对土壤微生物群落结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(10):1920-1930. CHEN K, XU X N, PENG J, et al. Effects of biochar and carbon based fertilizer on soil microbial community structure[J]. *Chinese Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 51(10):1920-1930.
- [9] 季鑫, 金爱武, 朱强根. 竹炭基有机肥对茶园土壤酶活性及微生物群落的影响[J]. *东北农业科学*, 2022, 47(2):64-68. JI X, JIN A W, ZHU Q G. Effects of bamboo charcoal organic fertilizer on soil enzyme activity and microbial community in tea garden[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2022, 47(2):64-68.
- [10] 赵彦敏, 梁玉红, 刘齐光, 等. 生物炭基有机肥对西葫芦生物性状、土壤营养和微生物群落的影响[J]. *农学学报*, 2022, 12(1):39-44. ZHAO Y M, LIANG Y H, LIU Q G, et al. Effects of biochar-based organic fertilizers on biological characters, soil nutrients and microbial communities of *Cucurbita pepo*[J]. *Journal of Agriculture*, 2022, 12(1):39-44.
- [11] 常建宁, 李丹洋, 王劲举, 等. 炭基有机肥配施菌糠木醋液对污灌区土壤铬形态及玉米吸收的影响[J]. *河南农业科学*, 2019, 48(1):57-65. CHANG J N, LI D Y, WANG X J, et al. Effects of biochar-based organic fertilizer combined with bacterial chaff wood vinegar on Cr forms and corn absorption in sewage irrigation district[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(1):57-65.
- [12] 杨芳芳. 盐碱胁迫下炭基有机肥对甜菜生长及其根际土壤特性的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2019:34-38. YANG F F. Effects of biochar-based organic fertilizer on sugar beet growth and rhizosphere soil property under saline alkali stress[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019:34-38.
- [13] 尤凌聪, 汪玉瑛, 刘玉学, 等. 生物炭-凹凸棒土复合材料对水稻土锌镉的钝化及土壤养分和酶活性的影响研究[J]. *核农学报*, 2021, 35(7):1717-1723. YOU L C, WANG Y Y, LIU Y X, et al. Effects of biochar-attapulgite composite on zinc and cadmium passivation of paddy soil and soil nutrients and enzyme activities[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(7):1717-1723.
- [14] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京:科学出版社, 1983:338-343. Agricultural Chemistry Committee of Chinese Soil Society. Conventional analytical methods of soil agrochemistry[M]. Beijing:Science Press, 1983:338-343.
- [15] 王学奎. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:202-204. WANG X K. Principle and technology of plant physiological and biochemical experiment[M]. Beijing:High Education Press, 2006:202-204.
- [16] 曹行行, 杨官凯, 祁瑞雪, 等. 有机营养液灌溉下发酵秸秆添加生物炭对番茄生长和品质影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(2):134-142. CAO X X, YANG G K, QI R X, et al. Effects of straw block with biochar addition and fruit quality of tomato under the irrigation of organic nutrient solution[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(2):134-142.
- [17] 李建勇, 高俊杰, 徐守国, 等. 化肥施用量对有机基质栽培番茄养分吸收利用的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(3):602-606. LI J Y, GAO J J, XU S G, et al. Effect of chemical fertilizer dose on nutrient absorption and utilization of tomato cultured in organic substrate[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3):602-606.
- [18] ZHANG P F, YANG F F, ZHANG H, et al. Beneficial effects of biochar-based organic fertilizer on nitrogen assimilation, antioxidant capacities, and photosynthesis of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under saline-alkaline stress[J]. *Agronomy*, 2020, 10(10):1562-1562.
- [19] CHEN J T, WANG X R, LIU X Y, et al. Beneficial effects of biochar-based organic fertilizers on nitrogen assimilation, photosynthesis, and sucrose synthesis of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) [J]. *International Journal of Plant Production*, 2022, 16(4):755-768.
- [20] 梁元振, 赵京考, 吴德亮, 等. 秋施有机肥对土壤生物学、理化性状及玉米产量的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(3):113-118. LIANG Y Z, ZHAO J K, WU D L, et al. Effects of application of organic fertilizer in autumn on the soil biological, physical and chemical properties and maize yield[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(3):113-118.
- [21] ZEESHAN M, AHMAD W, HUSSAIN F, et al. Phytostabilization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 255:120318.
- [22] 吴伟健, 陈艺杰, 李高洋, 等. 水稻秸秆生物炭对镉污染农田中番茄产量和品质的影响机制[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(3):492-503. WU W J, CHEN Y J, LI G Y, et al. Effects of rice straw biochar on tomato yield and quality in farmland affected by Cd contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3):492-503.
- [23] 唐杰, 王昌全, 李启全, 等. 川北植烟土壤有机质和全氮空间变异研究[J]. *中国烟草学报*, 2014(5):66-72. TANG J, WANG C Q, LI Q Q, et al. Study on spatial variability of organic matter and total nitrogen in tobacco planting soil in north Sichuan[J]. *Chinese Journal of Tobacco*, 2014(5):66-72.
- [24] 陈丽美, 李小英, 李俊龙, 等. 竹炭与有机肥配施对土壤肥力及紫甘蓝生长的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(4):774-783. CHEN L M, LI X Y, LI J L, et al. Effects of combined application of bamboo charcoal and organic fertilizer on soil fertility and growth of *Brassica oleracea* var. *Capitata* f. *rubra*[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, 38(4):774-783.
- [25] 韩忠明, 杨颂, 韩梅, 等. 不同菌剂对人参连作土壤酶活性的影响[J]. *东北农业科学*, 2016, 41(1):50-53. HAN Z M, YANG S, HAN M, et al. Effects of different microbial agents on enzymes activi-

- ty of soil in *Panax ginseng* continuous cultivating field[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2016, 41(1):50-53.
- [26] 唐海滨, 廖超英, 刘莉丽, 等. 蔬菜大棚土壤脲酶、过氧化氢酶活性与土壤养分的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3):165-168, 179. TANG H B, LIAO C Y, LIU L L, et al. Relationship between soil urease, catalase activities and soil nutrient in vegetable greenhouse[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(3):165-168, 179.
- [27] 黄华乾, 王金叶, 凌大炯, 等. 不同土地利用方式下土壤过氧化氢酶活性与土壤化学性质的关系研究——以雷州半岛为例[J]. 西南农业学报, 2013, 26(6):2412-2416. HUANG H Q, WANG J Y, LING D J, et al. Study on relationship between soil catalase activity and soil chemical properties under different land use patterns: Take Leizhou Peninsula for example[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(6):2412-2416.
- [28] 魏存. 马铃薯炭基肥料开发与应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021:11-12, 31-32. WEI C. Development and application of potato biochar-based fertilizer[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021:11-12, 31-32.
- [29] 刘瑞丰, 李新平, 李素俭, 等. 商洛地区土壤蔗糖酶及过氧化氢酶与土壤养分的关系研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5):182-185. LIU R F, LI X P, LI S J, et al. Research on relationship between soil invertase, catalase and soil nutrient in the area of Shangluo[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(5):182-185.
- [30] 李杰, 冯跃华, 王旭, 等. 水稻叶片SPAD值分布特征及其与施氮量的关系[J]. 南方农业学报, 2017, 48(1):38-45. LI J, FENG Y H, WANG X, et al. Distribution characteristics of SPAD value in rice leaf and its relationship with nitrogen application rate[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2017, 48(1):38-45.
- [31] 叶胜兰, 徐福利, 王渭玲, 等. 不同有机肥对黄土丘陵区梨枣生长、光合特性及果实品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2):370-378. YE S L, XU F L, WANG W L, et al. Effects of the different organic fertilizers on growth, photosynthetic characteristics and quality of pear-jujube of in the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2):370-378.
- [32] 王海候, 陆长婴, 沈明星, 等. 炭基有机肥对水稻产量及土壤养分的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7):104-107. WANG H H, LU C Y, SHEN M X, et al. Effects of biochar-based organic fertilizer on rice yield and soil nutrients[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(7):104-107.
- [33] 杨劲峰, 江彤, 韩晓日, 等. 连续施用炭基肥对花生土壤性质和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(3):68-73. YANG J F, JIANG T, HAN X R, et al. Effects of continuous application of biochar-based fertilizers on soil properties and yield under peanuts continuous cropping[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(3):68-73.
- [34] KAMAR A A, KANARAH S, KAMAR A M S. Effect of rice straw biochar on soil quality and the early growth and biomass yield of two rice varieties[J]. *Agricultural Sciences*, 2015, 6(8):798-806.
- [35] 姜莉莉, 王开运, 武玉国, 等. 施用生物有机肥对番茄果实品质及土壤生物学特性的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(6):141-147. JIANG L L, WANG K Y, WU Y G, et al. Effect of application of bioorganic fertilizer on tomatoes fruit quality and soil biological characteristics[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(6):141-147.
- [36] 李吉进, 邹国元, 宋东涛, 等. 有机肥和化肥对番茄产量和品质的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(6):1330-1332. LI J J, ZOU G Y, SONG D T, et al. Effects of organic fertilizer and chemical fertilizer on tomato yield and quality[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(6):1330-1332.
- [37] 王光梅, 胡兵辉. 有机肥施用量和干旱时期对番茄产量及品质的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(4):1040-1049. WANG G M, HU B H. Effects of organic fertilizer application rate and intermittent drought period on yield and quality of tomato[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(4):1040-1049.
- [38] 王允圃, 刘玉环, 阮榕生, 等. 有机肥改良农产品品质的科学探索[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9):51-56. WANG Y P, LIU Y H, RUAN R S, et al. Study on the effect of organic manure on improving the quality of farm products[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(9):51-56.
- [39] 索桂芳, 吕豪豪, 汪玉瑛, 等. 不同生物炭对氮的吸附性能[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6):1193-1202. SUO G F, LÜ H H, WANG Y Y, et al. Study on the adsorption properties of nitrogen by different biochars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6):1193-1202.

(责任编辑:叶飞)