

生物炭协同棉隆熏蒸对连作西瓜生长的影响

戚琳¹, 孙启门¹, 许文军¹, 程小娟¹, 郭兆枢², 陈兰道³

(1. 江苏开放大学环境生态学院 南京 210017; 2. 兴化市荻垛农业农村分局 江苏兴化 225700;
3. 兴化市合陈农业农村分局 江苏兴化 225700)

摘要: 为探究不同防控策略对设施连作西瓜生长和土传病害发生情况的影响, 利用田间试验研究了棉隆熏蒸土壤施加不同肥料及生物炭处理的西瓜产量及枯萎病发病率。结果表明, 棉隆熏蒸对控制西瓜土传病原菌数量有一定的效果, 在此基础上追施生物炭+有机肥(Fu + BOF)比单纯施加化肥(Fu+CF)或有机肥(Fu+OF)能更好地缓解西瓜连作障碍, 移栽后期 Fu + BOF 处理的土壤病原菌数量最低, 为 2273 CFU·g⁻¹, 且植株过氧化物酶和苯丙氨酸解氨酶活性最高, 连作西瓜植株发病率控制在 20% 以内。此外, Fu+BOF 处理的西瓜总产量、商品果质量、商品果率及单果质量均高于其他处理, 移栽后期地上部与地下部生物量均最高, 分别为 6.13 kg·株⁻¹ 和 6.94 g·株⁻¹。因此, 在西瓜连作栽培条件下, 棉隆熏蒸+生物炭+有机肥配施能够促进西瓜生长, 在减少病原菌数量的同时改变植株自身生理生化反应, 增强植株抗病相关酶活性, 降低西瓜枯萎病发病率, 有助于缓解西瓜连作障碍。

关键词: 生物炭; 连作障碍; 土壤病原菌; 酶活性

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)11-107-07

Effects of biochar synergized with dazomet fumigation on growth of continuous cropping watermelon

QI Lin¹, SUN Qimen¹, XU Wenjun¹, CHENG Xiaojuan¹, GUO Zhaoshu², CHEN Landao³

(1. School of Environment and Ecology, Jiangsu Open University, Nanjing 210017, Jiangsu, China; 2. Agriculture and Rural Affairs Bureau of Diduo Town, Xinghua 225700, Jiangsu, China; 3. Agriculture and Rural Affairs Bureau of Hechen Town, Xinghua 225700, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the effects of different prevention and control strategies on the growth of continuous cropping watermelon and occurrence of soil borne diseases, field experiments were conducted to study the yield of watermelon and incidence rate of fusarium wilt under different fertilizer treatments in dazomet-fumigated soil. The results showed that dazomet fumigation had positive effect on controlling soil borne pathogen quantity. On this basis, applying biochar and organic fertilizer(Fu + BOF) can alleviate the obstacle of continuous watermelon cultivation than simply applying chemical fertilizer(Fu + CF) or organic fertilizer (Fu + OF). At late transplanting stage, the number of soil pathogenic bacteria under the treatment Fu+BOF was the lowest, which was 2273 CFU·g⁻¹, and the activities of plant peroxidase and phenylalanine ammonialyase were the highest. The incidence rate of watermelon plants can be controlled within 20%. In addition, total yield, commercial fruit mass, commercial fruit rate and average single fruit mass of Fu+BOF treatment were higher than those of other treatment. In the later stage of transplantation, the aboveground and underground biomass of Fu+BOF treatment were the highest, which were 6.13 kg·plant⁻¹ and 6.94 g·plant⁻¹, respectively. Therefore, under the condition of continuous watermelon cultivation, the technical measure of dazomet fumigation + biochar + organic fertilizer can promote the growth of watermelon, as well as reduce the number of pathogenic bacteria, which can change the physiological and biochemical reactions of the plant itself and increase the activity of plant disease resistance related enzymes, this technical measure reduce the incidence rate of watermelon *Fusarium* wilt, which helps alleviating continuous cropping obstacles in watermelon.

Key words: Biochar; Continuous cropping obstacle; Soil pathogen; Enzymatic activity

收稿日期: 2024-01-22; 修回日期: 2024-04-22

基金项目: 江苏开放大学(江苏城市职业学院)“十四五”科研规划课题(2022XK015); 江苏城市职业学院大学生创新训练计划项目(XJ2023013)

作者简介: 戚琳, 女, 实验师, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: qlkatrina@163.com

西瓜是我国重要的园艺作物之一,其种植规模随需求的增加而不断扩大。设施西瓜长期连续种植极易产生连作障碍,引起土壤酸化板结、有机质含量降低、养分失衡,造成土壤病原菌和虫卵大量积累,引发枯萎病和根结线虫病等土传病害,进而导致作物抗逆性和品质变差,产量和种植效益降低,严重影响了西瓜产业的健康发展^[1-2]。

目前,治理西瓜连作障碍的措施主要有传统的耕作调控、物理消毒、化学防控和生物防治等,用以改善土壤环境、控制土传病害传播蔓延^[3-4]。在作物种植前使用土壤熏蒸剂是防治土传病虫害和缓解连作障碍的最有效且稳定的方法^[5],常用的熏蒸剂主要有二甲基二硫、威百亩、氯化苦、棉隆等。其中,棉隆是一种高效、低毒、无残留的环保型广谱性综合土壤熏蒸消毒剂,它在土壤中可水解形成异硫氰酸甲酯(MITC),可迁移至不同深度的土层并有效杀灭土壤害虫、病原菌和萌发的杂草种子^[6-7]。然而,棉隆在杀灭土壤病虫害的同时也可能会破坏土壤的微生态平衡^[8]。曹云等^[9]研究表明,棉隆熏蒸显著降低了西瓜大棚土壤中尖孢镰刀菌的数量,且棉隆熏蒸处理后土壤细菌和真菌的数量显著低于未施用棉隆的对照;刘恩太等^[10]指出,棉隆熏蒸加海藻菌肥处理可使苹果连作土壤中微生物数量降低,细菌与真菌的比值和放线菌与真菌的比值升高。同时,如果棉隆不能与土壤充分混匀,无法接触足够的水分,就会使异硫氰酸甲酯残留在土壤中,对作物产生毒害作用^[11]。有研究表明,棉隆熏蒸后的土壤中添加有机肥或土壤改良剂可缓解熏蒸造成的不良影响,提高有益微生物的数量,达到持续防控病虫害的目的^[12]。

生物炭具有较大的比表面积和丰富的孔隙度,性质稳定,具有改善土壤结构、提高土壤蓄水保肥能力和土壤有机质含量、修复土壤污染和调控微生物群落等作用^[13-14],此外,生物炭还对土壤病虫害有一定的防控作用^[15-17]。Fang 等^[18]研究认为,生物炭可以减轻氯化苦熏蒸对有益微生物的负面影响,促进土壤养分代谢,改善土壤健康状况。Wang 等^[19]认为,单施生物炭能降低连作土壤中有害物质的积

累,提高连作条件下苹果幼苗的生物量及光合作用效率,有助于缓解连作障碍。有机肥可以改善根际土壤微生态及养分状况,减轻作物的自毒作用,进而缓解连作障碍^[20]。目前,在土壤中施用生物炭和有机肥促进作物生长发育的研究较多,但二者同时施用于棉隆熏蒸土壤后对西瓜连作土壤环境、植株生长以及连作障碍的作用鲜有报道。

笔者的研究利用棉隆熏蒸土壤并结合添加稻秆生物炭,同时以有机肥作为调理剂,通过多次追肥,研究生物炭协同棉隆熏蒸对连作西瓜生长及枯萎病发病率的影响,以期在优化土壤环境的同时抑制尖孢镰刀菌数量的增长,推迟枯萎病的发病时间,为缓解西瓜连作障碍提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试西瓜品种为苏蜜 8 号,由江苏省农业科学院蔬菜所提供;98%棉隆颗粒剂,购于江苏南通堇鑫农业科技服务有限公司;试验所用有机肥为猪粪和稻秆(质量比 3:1)高温堆肥后的产物,购于东台市大明生物有机肥有限公司,有机质含量(w ,后同) $229.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总氮含量 $19.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总磷含量 $24.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总钾含量 $17.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;生物炭以水稻秸秆为原料于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 厌氧裂解制得。

1.2 设计

试验点位于南京市六合区金磁村,此前已连续种植西瓜 3 茬。前茬西瓜枯萎病发病率 76%。土壤基本理化性质见表 1,其测定方法参考《土壤农化分析》^[21]。

小区面积 $1.7\text{ m}\times 11\text{ m}=18.7\text{ m}^2$ 。大棚长 60 m、宽 8 m,大棚两头空置 1 m,起垄作为缓冲带。试验共设置 4 个处理:喷水覆膜+化肥调控(对照处理,CK),棉隆熏蒸+化肥调控(Fu+CF),棉隆熏蒸+有机肥调控(Fu + OF),棉隆熏蒸+生物炭+有机肥调控(Fu + BOF),采用随机区组设计,每个处理 3 次重复,共计 12 个小区。

所有处理基肥施用量均为 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 普通有机肥和 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的 15-15-15 复合肥,Fu+BOF 处理

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Elementary properties of experimental soil

指标 Index	pH	w (有机质)	w (速效磷)	w (速效钾)	w (全氮)	w (碱解氮)	w (铵态氮)	w (硝态氮)
		Organic matter content/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Available phosphorus content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Available potassium content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Total nitrogen content/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Alkaline hydrolyzed nitrogen content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Ammonium nitrogen content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Nitrate nitrogen content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
数值 Value	6.5	19.81	122.40	131.70	0.66	172.54	13.40	108.28

基肥额外增施生物炭,施用量为 $4.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,于棉隆熏蒸前均匀撒施于土壤表面,并翻入土壤混合均匀。后期追肥调控措施不同,有机肥处理为西瓜提苗期追施有机肥 $100\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、催蔓期 $100\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、膨瓜期 $200\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$;化肥调控处理将有机肥所含N-P-K用等量尿素、过磷酸钙和硫酸钾替代,具体施用方式为在距主根 15 cm 处开弧形沟,撒入肥料,封土后整平地面,浇小水1次。

棉隆熏蒸时间为2022年7月17至8月6日,施用量为 $450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。将每个小区所需棉隆均匀撒于土壤表面,即刻翻土 15 cm ,浇透水后立即覆膜。熏蒸20 d后揭掉薄膜,放置5 d后移栽西瓜幼苗,栽培方式为畦栽,吊蔓,畦面宽 1.5 m ,沟宽 0.5 m ,每畦栽2行,行间距 1 m ,株距 0.4 m 。

于棉隆熏蒸前(移栽前20 d),西瓜幼苗移栽0、30、65 d(采收期)采用“X”五点取样法采集西瓜根系周围土壤样品,每个小区收集西瓜根际土壤,拣出其中的植物残体及石块等杂物,充分混合均匀后保存于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱,用以测定土壤病原菌数量;于移栽30 d和65 d后随机选5株西瓜植株整株挖出,用去离子水清洗干净,测定植株生物量;将5株西瓜植株的根系剪碎混匀,同时每株选择5片大小相近的叶片剪碎混匀,各取 10 g 于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存,用以测定根系和叶片的酶活性;在西瓜采收期摘下各小区所有西瓜,称质量并计算小区总产量。

1.3 项目指标测定方法

1.3.1 西瓜植株生物量 用蒸馏水将西瓜植株清洗干净后用吸水纸吸干水分,用电子天平称量鲜质量并记录每个小区单株生物量(包括地上部分和地下部分)。采收的西瓜逐个称质量,记录总个数,分别计算单果质量和小区产量,调查商品果率(单果质量 1 kg 以上)。

1.3.2 西瓜枯萎病发病情况 记录试验期间西瓜枯萎病的发病株数,并统计定植15、30、45、55、60、65 d的发病率以反映枯萎病发病情况^[22]。

发病率/ $\%$ =病株数/总株数 $\times 100$ 。

1.3.3 土壤病原菌数量和植物抗性酶活性 采用Komada^[23]选择性培养基法测定土壤尖孢镰刀菌数量;采用愈创木酚法和苯丙氨酸法^[24]测定过氧化物酶(POD)活性和苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性:POD采用 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG、4% PVPP和1% Triton X-100提取,25 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 愈创木酚溶液和 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ H_2O_2 溶液反应,470 nm波长连续测定、计算所得;PAL提取介质为 $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硼酸缓冲液、 $5.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫

基乙醇、 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA- Na_2 、5%甘油和5%聚乙烯吡咯烷酮,反应体系为酶液与 $0.02\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的L-苯丙氨酸和 $\text{pH}=8.8$ 硼酸缓冲液,30 $^{\circ}\text{C}$ 恒温60 min后用 $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl终止反应,290 nm波长连续测定、计算所得。

1.4 数据分析

采用Excel 2016对数据进行整理和图表绘制,采用SPSS 19.0统计软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著极差法(LSD)分析各处理间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同处理对西瓜产量的影响

由表2可知,棉隆熏蒸的各处理西瓜商品果质量、商品果率及单果质量均显著高于对照(CK),化肥处理(Fu+CF)的西瓜总产量比对照增加了20.93%,但未达到显著差异水平。生物炭+有机肥处理(Fu+BOF)各项指标均高于其他处理,西瓜总产量达到 $1\,963.54\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$,比对照显著增加了48.66%,且该处理商品果质量的增产率可达74.46%。土壤消毒处理间追施有机肥比化肥处理对西瓜总产量的增产效果好,但未达到显著差异水平。

表2 各处理采收后西瓜产量指标

Table 2 Watermelon yield index of different treatments

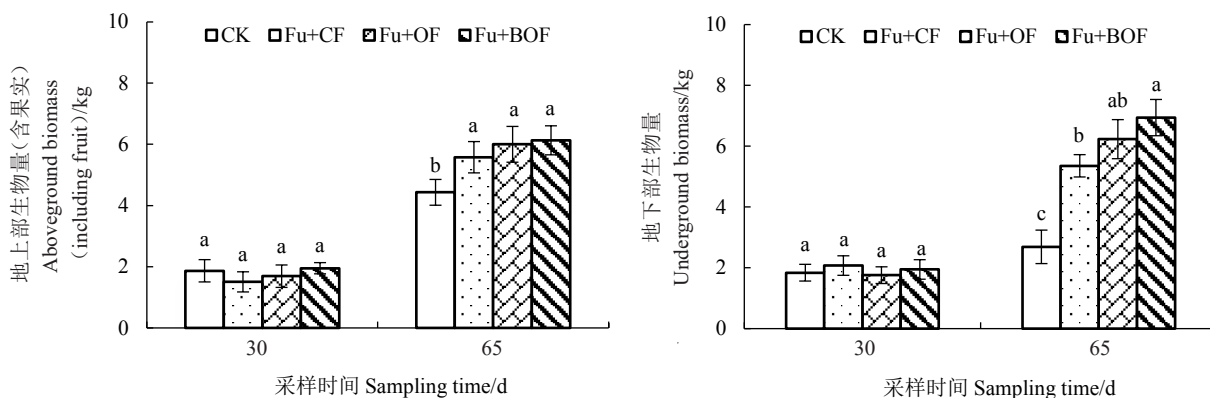
处理 Treatment	总产量 Yield/ ($\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$)	商品果质量 Fruit mass/ ($\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$)	商品果率 Fruit rate/ %	单果质量 Single fruit mass/kg
CK	1 320.80 b	1 104.65 c	83.63 b	0.93 c
Fu + CF	1 597.23 ab	1 520.55 b	95.20 a	1.12 b
Fu + OF	1 876.16 a	1 820.87 a	96.96 a	1.31 a
Fu + BOF	1 963.54 a	1 927.17 a	98.14 a	1.35 a

注:不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 不同处理对西瓜植株生物量的影响

西瓜幼苗移栽后30 d为枯萎病发病初期,未熏蒸处理与熏蒸的3个处理间植株地上部和地下部生物量没有显著差异;在移栽后期,即移栽后65 d,生物量间差异较大,未熏蒸处理生物量显著低于棉隆熏蒸各处理。其中,Fu+BOF处理地上部生物量最大,为 $6.13\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}$,与对照相比增加了38.1%,而地下部生物量为 $6.94\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$,与对照相比增加量超过100%(图1)。这可能是由于西瓜生长过程中藤蔓不断打杈,弱化了地上部生物量差异,而地下部生物量则差异较大。



注:不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters mean significant difference at 0.05 level. The same below.

图 1 不同处理植株生物量

Fig. 1 Plant biomass of different treatments

2.3 不同处理对西瓜病情指数的影响

由图 2 可知,未熏蒸对照处理于移栽后 45 d 最先发病,发病率为 9.7%,且后期发病率几乎达到 100%;棉隆熏蒸加后期调控防病效果明显,尤其是生物炭+有机肥调控处理,发病率最低、发病时间最晚,且移栽后期发病率可控制在 20%以内。Fu+CF 处理发病率仍然接近 50%,说明单独熏蒸虽有一定防效,但仍达不到生产所需效果。

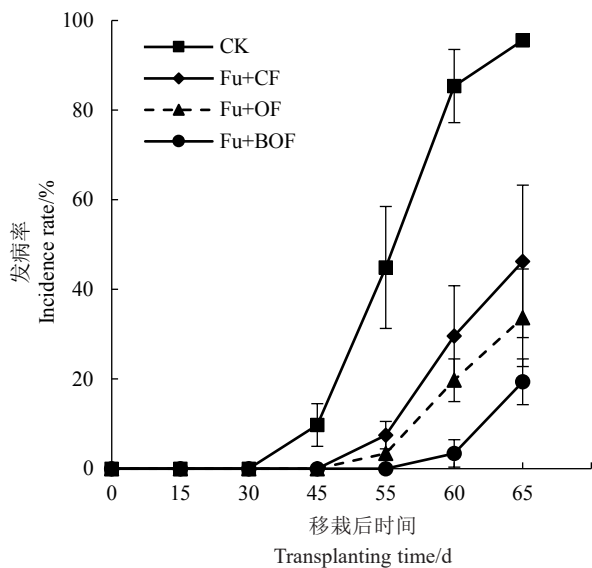


图 2 不同处理西瓜发病率

Fig. 2 Watermelon incidence rate of different treatments

2.4 土壤病原菌分析

于棉隆熏蒸后立即采样,土壤样品中未检测到病原菌(尖孢镰刀菌),但未熏蒸处理中病原菌数量较高,为 1545 CFU·g⁻¹(图 3)。西瓜幼苗移栽 30 d 为病害始发期,未熏蒸对照处理最先发病、病原菌

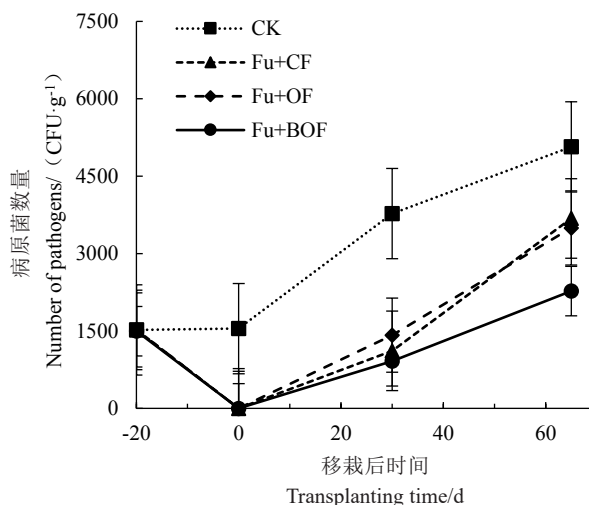


图 3 不同处理土壤病原菌数量分析

Fig. 3 Quantitative analysis of soil pathogens of different treatments

数量最高,达到 3775 CFU·g⁻¹。生长后期各处理土壤病原菌数量均呈增高趋势,这可能是由于前期植株生长较好,对病原菌的抗性增强,也可能是不同处理追肥肥料不同导致植物本身抗性发生变化。各熏蒸处理中,Fu+CF 处理的病原菌数量最高,移栽后期达到 3680 CFU·g⁻¹,Fu+BOF 处理最低,为 2273 CFU·g⁻¹。

2.5 植物抗性酶活性变化

西瓜幼苗移栽 30 d 时对表观健康的植株进行过氧化物酶(POD)活性监测,发现对照处理西瓜叶片和根茎中过氧化物酶活性高于其他熏蒸处理的植株,与 Fu+CF 处理相比,CK 处理叶片和根茎 POD 活性分别高 19.6%和 28.7%,这可能是由于未熏蒸对照土壤中病原菌的增长导致植株自身防御酶活性提高。各熏蒸处理中,追施生物炭+有机肥

处理(Fu+BOF)的 POD 活性最高,到发病后期(移栽后 65 d)时,未消毒对照处理植株的 POD 活性最低,相比之下,熏蒸后用生物炭+有机肥处理显著提高了植株 POD 活性,叶片和根茎分别提高了 25.5% 和 27.3%(图 4)。说明生物炭+有机肥能够提高植株叶片和根茎组织中 POD 活性。

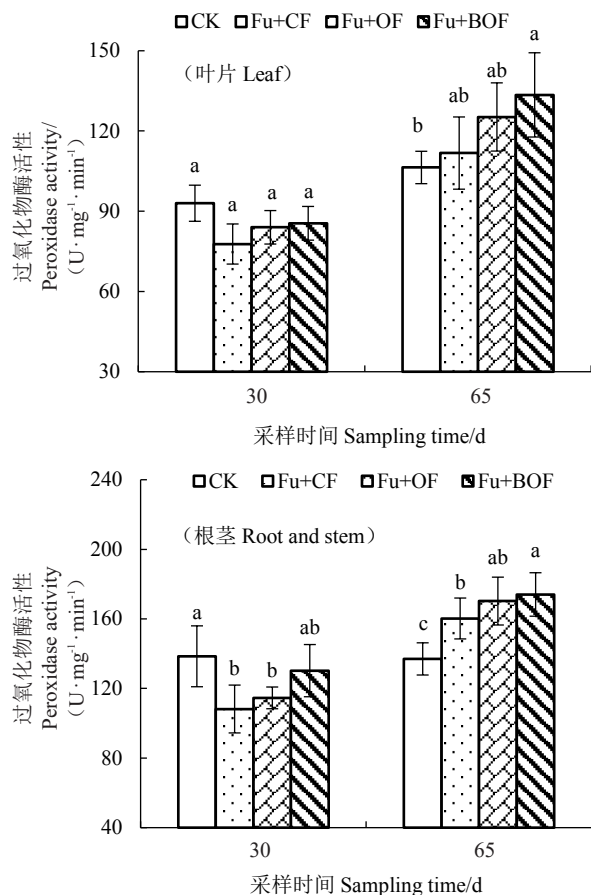


图 4 不同处理植株过氧化物酶活性

Fig. 4 Plant peroxidase activity of different treatments

苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性变化与 POD 趋势相近,在西瓜发病初期,未消毒处理西瓜叶片 PAL 活性最高,随着土壤尖孢镰刀菌数量增长,植株的 PAL 活性整体呈升高趋势;到发病后期,未消毒对照处理的 PAL 活性反而最低,而棉隆熏蒸后追施生物炭+有机肥处理的 PAL 活性最高,相比于对照,叶片和根茎 PAL 活性分别增加了 42.1% 和 58.5% (图 5)。

3 讨论与结论

本研究结果表明,施用生物炭和有机肥可提高西瓜的总产量和商品果质量,分别比对照增加 48.7% 和 74.4%。同时,对植株生物量尤其是地下部

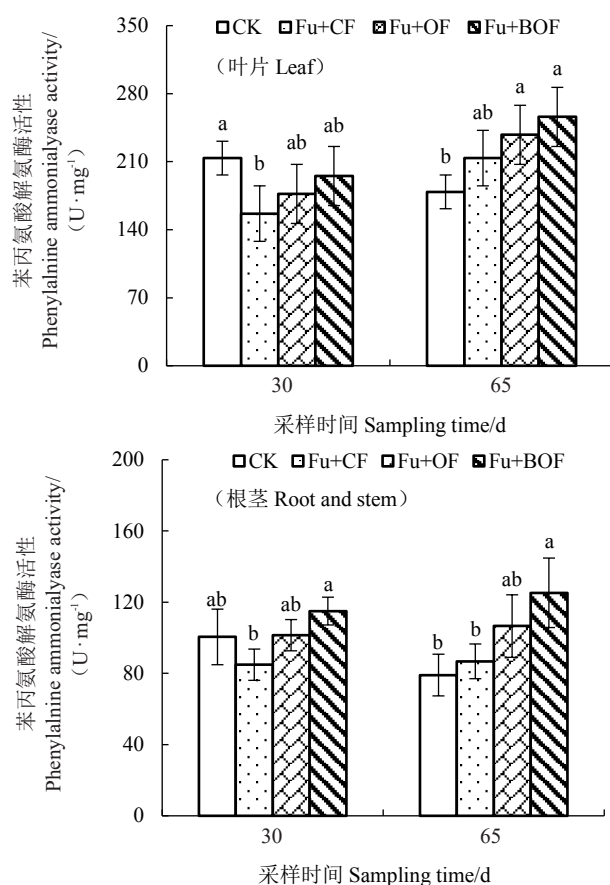


图 5 不同处理植株苯丙氨酸解氨酶活性

Fig. 5 Plant phenylalanine ammoniolyase activity of different treatments

生物量积累也有促进作用。这可能是由于施加生物炭可改善西瓜根际土壤养分状况及微生态环境^[26],在改善土壤理化性状的前提下,促进西瓜根系活力,从而促进植株生长及提高西瓜产量。王彩云等^[25]发现,添加 5% 的生物炭有利于黄瓜植株健康生长、完善叶片结构,减缓连作对黄瓜的生育障碍并提高产量。陈德秀等^[26]通过田间试验发现,生物炭和有机肥混合施用可提高果实品质和产量。

西瓜枯萎病是由尖孢镰刀菌西瓜专化型(*Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*)侵染植株引起的土传病害。在笔者的研究中,棉隆熏蒸的各处理均降低了西瓜连作土壤尖孢镰刀菌的数量,其中,生物炭和有机肥配施对病原菌的抑制效果最好,植株发病率最低。这可能是由于生物炭具有发达的孔隙结构,可吸附土壤中的病原菌分泌物和根系分泌物等,控制土传病原菌对植物的侵染并减轻作物的自毒作用^[17];同时,生物炭可改变土壤微生物群落结构和组成,增加拮抗菌和有益菌活性和数量,降低病原菌数量^[27]。王彩云等^[28]研究发现,施用生物炭能够显著提高 6 a 和 10 a 连作黄瓜土壤细菌的数量,

降低真菌和尖孢镰刀菌数量,尖孢镰刀菌数量是未处理组的 55.9%。常芳娟等^[29]连续 3 a 向西瓜土壤添加生物炭,发现西瓜成熟期根区土壤真菌群落的丰富度和多样性升高、镰刀菌属真菌的相对丰度降低。Wang 等^[30]在研究生物炭对盐碱土微环境的影响时发现,添加生物炭可降低土壤镰刀菌属真菌的丰度,并推测这与生物炭改变了土壤理化性质相关。也有研究认为,生物炭处理对西瓜抗性和枯萎病防效无显著效果,原因可能是施用生物炭浓度较低,导致其无法发挥出最佳效果^[22]。而 Jaiswal 等^[31]研究发现,添加高浓度生物炭反而会促进枯丝核菌引起的立枯病发生。综合以上研究结果表明,生物炭在土传病害防治方面具有两面性,其防治效果可能会受到生物炭理化性质、作物品种、栽培方式、施用浓度和配施方法等因素的影响。

植物抗病性与防御酶活性密切相关^[32],施加生物炭可以提高植株抗氧化酶活性,增强植物胁迫耐受性^[33]。POD 可参与催化木质素合成中最后的聚合反应,并在杀菌自由基浓度的提高中起到重要作用;PAL 是植物抗病性物质生成途径——苯丙烷类代谢途径的关键酶和限速酶,其活性的提高会增加木质素、植保素含量,从而提高西瓜抗性。本研究结果表明,西瓜发病后期 Fu+BOF 处理,植株叶片和根茎的 POD 与 PAL 活性均最高,说明棉隆熏蒸后施加生物炭和有机肥有助于提高植株抗性。Bamagoos 等^[34]发现,生物炭可以提高植物叶片和根茎的抗氧化酶活性,增强作物对低温胁迫的耐受性。龙俊江等^[35]报道,作物在低温胁迫下,增施 5% 生物炭处理的叶和根系中的过氧化物酶、超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性均显著高于常规施肥处理和常规施肥+增施化肥处理,且其丙二醛含量最低,说明生物炭能提高植物在逆境胁迫下的抗逆性。

综上所述,棉隆熏蒸土壤可以有效控制西瓜土传病原菌的数量,在此基础上追施生物炭和有机肥能最大程度降低西瓜枯萎病发病率,提高西瓜总产量、商品果质量、商品果率及单果质量,且植株叶片、根茎 POD 与 PAL 活性均最高。因此,棉隆熏蒸+生物炭+有机肥技术相结合能促进植株生长、提高西瓜产量,提高西瓜的抗病能力和抗病相关酶活性,对缓解西瓜连作障碍、保障西瓜安全可持续生产具有重要意义。

参考文献

[1] LING N, DENG K Y, SONG Y, et al. Variation of rhizosphere bacterial community in watermelon continuous mono-cropping

soil by long-term application of a novel bioorganic fertilizer[J]. Microbiological Research, 2014, 169(7/8): 570-578.

[2] 张曼,郝科星,张焕,等.菌肥与生物炭配施对设施西瓜生长及土壤理化性质的影响[J].中国瓜菜,2023,36(5):72-77.

[3] REN Z J, LI Y, FANG W S, et al. Evaluation of allyl isothiocyanate as a soil fumigant against soil-borne diseases in commercial tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) production in China[J]. Pest Management Science, 2018, 74(9): 2146-2155.

[4] 马江黎,徐红,孙兴祥.不同处理对连作土壤及西瓜产量和品质的影响[J].中国瓜菜,2022,35(7):50-55.

[5] 李青杰,方文生,张大琪,等.棉隆熏蒸联合生物炭和沸石对土壤微生态及土传病原菌的影响[J].植物保护,2022,48(4): 150-157.

[6] 魏晓明,赵银平,杨瑞平.设施西瓜连作障碍及防治措施研究进展[J].中国瓜菜,2016,29(9):1-5.

[7] SLUSARSKI C, PIETR S J. Combined application of dazomet and *Trichoderma asperellum* as an efficient alternative to methyl bromide in controlling the soil-borne disease complex of bell pepper[J]. Crop Protection, 2009, 28(8): 668-674.

[8] 王晴,张大琪,方文生,等.土壤熏蒸对土壤氮循环及其功能微生物的影响研究进展[J].农药学学报,2021,23(6):1063-1072.

[9] 曹云,宋修超,郭德杰,等.棉隆熏蒸与微生物有机肥联用对西瓜枯萎病的防控研究[J].土壤,2018,50(1):93-100.

[10] 刘恩太,李园园,胡艳丽,等.棉隆对苹果连作土壤微生物及平邑甜茶幼苗生长的影响[J].生态学报,2014,34(4):847-852.

[11] LAMBERTI F, D ADDABBO T, GRECO P, et al. Efficacy of the liquid formulation of some nematicides[J]. Mededelingen, 2002, 67(3): 699-702.

[12] 程海燕,张大琪,黄斌,等.微生物菌肥对熏蒸剂处理后土壤微生态的影响研究进展[J].农药学学报,2020,22(5):734-741.

[13] 戚琳,宋修超,韩承辉,等.不同热解温度水稻秸秆生物炭对菠菜生物量和品质的影响[J].江苏农业科学,2017,45(23): 132-135.

[14] 叶晓龙,冯棣,张金磊,等.生物炭用量对拱棚番茄产量和品质的影响[J].中国瓜菜,2022,35(7):86-91.

[15] 李成江,李大肥,周桂凤,等.不同种类生物炭对植烟土壤微生物及根茎病害发生的影响[J].作物学报,2019,45(2):289-296.

[16] SILVA L G, DE ANDRADE C A, BETTIOL W. Biochar amendment increases soil microbial biomass and plant growth and suppresses *Fusarium* wilt in tomato[J]. Tropical Plant Pathology, 2020, 45(1): 73-83.

[17] GU Y, HOU Y G, HUANG D P, et al. Application of biochar reduces *Ralstonia solanacearum* infection via effects on pathogen chemotaxis, swarming motility, and root exudate adsorption[J]. Plant and Soil, 2017, 415(1/2): 269-281.

[18] FANG W S, SONG Z X, TAO S, et al. Biochar mitigates the negative effect of chloropicrin fumigation on beneficial soil microorganisms[J]. Science of the Total Environment, 2020, 738: 139880.

[19] WANG Y F, PAN F B, WANG G S, et al. Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions[J]. Scientia Horticul-

- turae, 2014, 175(1):9-15.
- [20] 付风云,相立,徐少卓,等.多菌灵与微生物有机肥复合对连作平邑甜茶幼苗及土壤的影响[J].园艺学报,2016,43(8):1452-1462.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [22] 张曼,郝科星,张焕,等.设施西瓜连作障碍治理措施对比[J].山西农业科学,2022,50(9):1353-1358.
- [23] KOMADA H. Development of a selective medium for quantitative isolation of *Fusarium oxysporum* from natural soil[J]. Review in Plant Protection Research, 1975(8):114-124.
- [24] 李合生.植物生理生化实验原理与技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [25] 王彩云,武春成,曹霞,等.生物炭对温室连作土壤黄瓜生长、叶片结构及产量的影响[J].北方园艺,2018(19):23-27.
- [26] 陈德秀,王连春,普应斌,等.有机肥和生物炭施用对猕猴桃果实品质的影响[J].北方园艺,2022(2):18-26.
- [27] 蔡昆争,高阳,田纪辉.生物炭介导植物病害抗性及其作用机理[J].生态学报,2020,40(22):8364-8375.
- [28] 王彩云,武春成,曹霞,等.生物炭对温室黄瓜不同连作年限土壤养分和微生物群落多样性的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1359-1366.
- [29] 常芳娟,张贵云,张丽萍,等.生物炭对西瓜连作土壤真菌群落结构和功能类群的影响[J].环境科学,2024,45(6):3553-3561.
- [30] WANG Z H, WANG H Y, ZHAO C J, et al. Effects of biochar on the microenvironment of saline-sodic soil and maize growth[J]. Agronomy, 2022, 12(11):2859.
- [31] JAISWAL A K, ELAD Y, GRABER E R, et al. *Rhizoctonia solani* suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 69:110-118.
- [32] 陈亮,陈年来.西瓜叶片防御酶活性与枯萎病抗性的关系[J].河南农业科学,2019,48(1):77-83.
- [33] ALI S, RIZWAN M, QAYYUM M F, et al. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: A critical review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(14):12700-12712.
- [34] BAMAGOOS A, ALHARBY H, FAHAD S. Biochar coupling with phosphorus fertilization modifies antioxidant activity, osmolyte accumulation and reactive oxygen species synthesis in the leaves and xylem sap of rice cultivars under high-temperature stress[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2021, 27(9):2083-2100.
- [35] 龙俊江,祝孟洋,周丁香,等.增施生物炭对灌浆期低温胁迫下晚稻抗氧化酶活性和产量的影响[J].中国稻米,2023,29(6):33-38.