

生物炭和木霉菌对黄瓜生长及枯萎病防治效果的影响

廉华¹, 刘静依¹, 马光恕¹, 姜海洋², 窦靖玮¹, 李梅³

(1. 黑龙江八一农垦大学园艺园林学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 吉林市农业科学院, 吉林 吉林 132011;

3. 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193)

摘要:为了研究外源物质对黄瓜枯萎病的防治效果, 利用生物炭和拟康氏木霉菌 (*Trichoderma pseudokoningii*) 配合施用, 通过盆栽试验, 测定不同处理对黄瓜幼苗生长、根际土壤酶活性、叶片抗氧化酶活性以及对黄瓜枯萎病的防治效果。结果表明: 生物炭和拟康氏木霉菌均可以改善黄瓜幼苗质量, 提高根际土壤酶活性和叶片保护酶活性, 提高对黄瓜枯萎病的防治效果, 其中以 1×10^4 cfu \cdot g⁻¹ 尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum*) 粉剂 + 40 g \cdot kg⁻¹ 生物炭 + 1×10^6 cfu \cdot g⁻¹ 拟康氏木霉菌剂 (BIT3 处理) 应用效果最好。在黄瓜播种后 30 d, BIT3 处理根际土壤蔗糖酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性、蛋白酶活性均显著高于其他处理, 分别比 CK (1×10^4 cfu \cdot g⁻¹ 尖孢镰刀菌粉剂) 提高 137.44%、143.05%、139.84%、180.00%; 黄瓜幼苗叶片超氧化物歧化酶活性、抗坏血酸过氧化物酶活性、过氧化氢酶活性、过氧化物酶活性分别比 CK 提高 75.67%、97.32%、71.95%、146.06%; 黄瓜幼苗株高、茎粗、根冠比、壮苗指数分别比 CK 提高 86.30%、107.91%、162.50%、228.57%; 黄瓜苗期枯萎病盆栽防治效果达到 91.21%。研究表明生物炭和木霉菌通过提高黄瓜幼苗抗氧化酶活性和根际土壤酶活性, 促进了幼苗形态建成和物质积累, 提高了对黄瓜枯萎病的防治效果。

关键词: 生物炭; 木霉; 黄瓜; 枯萎病; 防治效果

中图分类号: S642.2; S436.421.1 **文献标志码:** A

Effects of biochar and *Trichoderma pseudokoningii* on the growth of cucumber seedlings and control effect against Fusarium wilt

LIAN Hua¹, LIU Jingyi¹, MA Guangshu¹, JIANG Haiyang², DOU Jingwei¹, LI Mei³

(1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 2. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Jilin, Jilin 132011, China;

3. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of

Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: To study the control effect of exogenous substances on cucumber Fusarium wilt, biochar and *Trichoderma pseudokoningii* were used to determine the effects of different treatments on cucumber seedling growth, rhizosphere soil enzyme activity, leaf antioxidant enzyme activity, and control efficiency against cucumber Fusarium wilt through pot experiments. The results showed that both biochar and *Trichoderma pseudokoningii* improved the quality of cucumber seedlings, increased enzyme activity in rhizosphere soil and leaf protective enzyme activity, and enhanced the control effect on Fusarium wilt disease. Among them, BIT3 (1×10^4 cfu \cdot g⁻¹ *Fusarium oxysporum* powder + 40 g \cdot kg⁻¹ biochar + 1×10^6 cfu \cdot g⁻¹ *Trichoderma pseudokoningii*) was the best. Thirty days after cucumber sowing, the activities of sucrase, urease, alkaline phosphatase and protease in the rhizosphere soil of BIT3 were significantly higher than those of other treatments, with 137.44%, 143.05%, 139.84%, and 180.00% higher than those of CK (1×10^4 cfu \cdot g⁻¹ *Fusarium oxysporum* powder), respectively. The activities of superoxide dismutase,

收稿日期: 2024-01-22

修回日期: 2024-04-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0201202)

作者简介: 廉华 (1970-), 女, 黑龙江密山人, 教授, 主要从事蔬菜栽培生理研究。E-mail: yy6819184@126.com

通信作者: 马光恕 (1969-), 男, 山东海阳人, 教授, 主要从事蔬菜栽培生理研究。E-mail: mgs_lh@163.com

李梅 (1972-), 女, 黑龙江伊春人, 研究员, 主要从事生物防治研究。E-mail: limei@caas.cn

ascorbic acid peroxidase, catalase, and peroxidase in the leaves of B1T3 cucumber seedlings were 75.67%, 97.32%, 71.95%, and 146.06% higher than those of CK, respectively. The height, stem diameter, root shoot ratio, and strong seedling index of B1T3 cucumber seedlings were 86.30%, 107.91%, 162.50%, and 228.57% higher than those of CK, respectively. The control effect of potted cucumber wilt disease during seedling stage reached 91.21%. Research has shown that biochar and *Trichoderma pseudokoningii* enhance the antioxidant enzyme activity and rhizosphere soil enzyme activity of cucumber seedlings, promote seedling morphogenesis and material accumulation, and improve the control effect of cucumber wilt disease.

Keywords: biochar; *Trichoderma pseudokoningii*; cucumber; Fusarium wilt; control effect

黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 是我国种植面积和栽培范围最大的主要蔬菜作物之一,2020 年我国黄瓜总生产面积达到 127 万 hm^2 (占全球的 56.4%),我国黄瓜总产量达到 7336 万 t (占全球的 81.2%)^[1]。随着黄瓜种植面积增加,枯萎病等土传病害逐年加重,逐渐成为影响黄瓜生产的最大障碍^[2]。黄瓜枯萎病 (*Fusarium wilt*) 是由尖孢镰孢黄瓜专化型 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerium* Owen, FOC) 感染引起的真菌病害,发病率通常为 10%~30%,造成产量损失为 10%~50%^[3]。长期连作、土壤肥力下降、微生物菌群失衡是导致该病害日渐严重的主要原因^[4]。化学农药被认为是黄瓜枯萎病防治的“利器”,但过度滥用带来了不少安全隐患,生物防治逐渐成为防治该病害的研究热点^[5]。

木霉菌 (*Trichoderma* spp.) 为木霉属真菌^[6],逐渐成为目前应用最为广泛的生防真菌类型之一。关于木霉提高植物抗病性、促进植物生长以及改善植物体内抗氧化系统功能方面的研究报道较多:如 Mohamed 等^[7]研究了阴沟肠杆菌 PS14 与棘孢木霉 (*Trichoderma asperellum*) T34 对马铃薯青枯病的防治效果,表明二者联合施用后提高了植株过氧化物酶 (POD)、脂肪氧合酶 (LOX) 和多酚氧化酶 (PPO) 活性,青枯病的温室发病率下降幅度均达 10.7%~26.5%,大田发病率下降幅度达 26.6%~36.6%; Metwally 等^[8]研究表明,绿色木霉 (*Trichoderma aviride*) 和丛枝菌根真菌 (*Arbuscular mycorrhizal fungi*) 不仅能提高洋葱的鲜质量和干质量,还能促进其叶面积、茎长和根长等增加; Harman^[9] 研究表明,木霉菌通过分泌细胞壁降解酶类和次级代谢产物,可以诱导植物抗性提高。

生物炭是在厌氧或无氧条件下经高温热解转化产生的富含碳的固体材料,近年来,生物炭在土壤改良、提高土壤肥力、降低土壤重金属、改善土壤微生物环境等农业领域应用较多^[10]。何聪莲等^[11]对‘云烟 87’的研究表明,生物炭与氮肥配施可促进烟株生长,有利于提高其内在化学成分和香气前体

物质含量,还可减少氮肥施用量;李珍等^[12] 研究结果显示,随着复合肥和生物炭施用量的增加,穿心莲的株高、叶片数、分蘖数、茎粗、根系表面积等形态指标均呈现先升高后下降趋势,根冠比则呈现先下降后上升趋势;叶绿素含量、根系活力、POD、SOD、CAT 含量等生理指标均呈现先升高后下降趋势。

课题组在前期研究工作中,针对木霉菌施用方式^[13]和施用剂量^[14]对黄瓜促生作用及对枯萎病防治进行了相关研究;同时研究确定了 $80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物炭添加量对改善甜瓜根际土壤物理性状效果较好,而 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物炭添加量对促进甜瓜幼苗质量效果较好^[15]。但前期研究多是针对木霉或者生物炭进行的单一研究,本研究拟采用二者联合施用的方式,明确其对黄瓜幼苗形态建成、根际土壤酶活性、叶片保护性酶活性的作用及其对黄瓜枯萎病的防治效果,为后期木霉菌剂和生物炭的联合开发应用提供理论依据,为黄瓜安全、高产、优质栽培提供技术支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

(1) 品种:‘长春密刺’,购买于山东新泰市裕园种业有限公司。

(2) 土壤:蔬菜营养土(有机质含量 58%~72%,氮、磷、钾总量 2.2%~4.5%),由大庆市长青种子公司提供。

(3) 生物炭:以玉米秸秆为原料制备(制备温度为 450°C ,由沈阳隆泰生物工程有限公司提供)。生物炭基本理化性质为:pH 值 8.43,电导率 $1.27 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ $8.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ $38.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $106.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $3\ 540.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,容重 $0.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

(4) 供试菌株:供试黄瓜枯萎病病原菌为尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerium* Owen)、供试菌株为拟康氏木霉 *Trichoderma pseudokoningii*,均由

中国农业科学院植物保护研究所木霉菌研究组提供。

(5) 供试基质材料: 供试基质材料为蔬菜营养土和生物炭, 将二者分别过 1 mm 筛后, 在烘箱中 160 °C 高温灭菌 2 h, 自然冷却后继续在 160 °C 烘 2 h 后放凉备用。

1.2 尖孢镰刀菌粉剂和拟康氏木霉孢子粉剂的制备

尖孢镰刀菌粉剂和拟康氏木霉分生孢子粉剂的制备均参照马光恕等^[14]方法, 尖孢镰刀菌粉剂孢子含量为 1.9×10^7 cfu · g⁻¹, 拟康氏木霉分生孢子粉剂浓度为 2.8×10^{10} cfu · g⁻¹, 均需要按照试验要求计算应用剂量。

1.3 试验方法和设计

2023 年 4—8 月, 在黑龙江八一农垦大学教学基地塑料大棚内开展相关试验。将灭菌后的基质材料装入塑料材质的育苗盘 (34.5 cm × 24 cm × 11 cm) 中, 每盒装育苗基质 2.5 kg。化肥使用量按照每公斤育苗基质施入 0.075 g 磷酸二胺、0.225 g 硫酸钾、0.125 g 尿素进行计算。将不同剂量的生物炭、拟康氏木霉分生孢子菌剂、尖孢镰刀菌粉剂分别拌入装有灭菌土的育苗盘中。播种催芽处理后的黄瓜种子, 每盘播 180 粒, 出苗后选留 120 株。播种后每隔 2 d 浇施一次无菌水, 每盘浇施 1 000 mL, 保持黄瓜正常生长状态。生物炭含量分别设定为其占风干土质比例为 40 g · kg⁻¹ 和 80 g · kg⁻¹; 木霉分生孢子菌剂剂量分别设置为 1×10^4 、 1×10^5 、 1×10^6 、 1×10^7 。随机区组试验设计, 每个处理 6 盘, 重复 4 次, 试验设计如表 1 所示。

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处理 Treatment	尖孢镰刀菌粉剂 Fusarium oxysporum /(10^4 cfu · g ⁻¹)	生物炭添加量 Biochar addition /(g · kg ⁻¹)	拟康氏木霉菌剂 Trichoderma pseudokoningii /(cfu · g ⁻¹)
CK	1	0	0
B1T0	1	40(B1)	0(T0)
B1T1	1	40(B1)	1×10^4 (T1)
B1T2	1	40(B1)	1×10^5 (T2)
B1T3	1	40(B1)	1×10^6 (T3)
B1T4	1	40(B1)	1×10^7 (T4)
B2T0	1	80(B2)	0(T0)
B2T1	1	80(B2)	1×10^4 (T1)
B2T2	1	80(B2)	1×10^5 (T2)
B2T3	1	80(B2)	1×10^6 (T3)
B2T4	1	80(B2)	1×10^7 (T4)

在黄瓜播种后 30 d 分别取其植株和根际土样, 测定各项指标。其中, 每个处理随机选取 120 株 (每个重复 30 株), 将黄瓜幼苗根系上的附着土壤作为混合根际土壤样品, 除去根系等杂物, 装入无菌聚乙烯塑料自封保鲜袋中带回实验室, 再过孔径 2 mm 的筛, 置于 -40 °C 冰箱保存, 用于测定相关土壤酶活性指标。每个处理选取 80 株 (每个重复 20 株) 黄瓜幼苗, 用于测定黄瓜幼苗叶片抗氧化酶指标。每个处理选取 40 株 (每个重复 10 株), 用于测定黄瓜幼苗形态指标和物质积累量指标, 计算根冠比和壮苗指数。每个处理选取 40 株 (每个重复 10 株), 用于测定防病效果指标。

1.4 试验测定指标与方法

(1) 土壤酶活性指标测定: 参照关松荫^[16]的方法, 其中蔗糖酶活性采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法; 脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法; 碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法; 蛋白酶活性采用茚三酮比色法。

(2) 抗氧化酶指标测定: 参照马光恕等^[14]方法, 其中超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑光化还原法; 抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性采用抗坏血酸法; 过氧化氢酶 (CAT) 活性采用紫外吸收法; 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法。

(3) 形态指标和物质积累量指标测定: 株高为植株茎基部到生长点之间的距离, 用直尺测定; 茎粗为植株子叶节下 1 cm 处直径, 用游标卡尺测定。利用清水反复冲洗植株, 再用吸水纸吸干, 将地上部与地下部分开后测其鲜质量; 然后将鲜样在 105 °C 杀青 15 min 后, 在 70 °C 烘至恒重, 用万分之一电子天平 (TB-4002 型, 湖北孝感亚光医用电子技术有限公司) 分别测定地上部与地下部干质量。

根冠比 = 地下部鲜质量 / 地上部鲜质量

壮苗指数 = (茎粗 / 株高 + 地下部干质量 / 地上部干质量) × 全株干质量

(4) 抗病性指标测定: 抗病性指标包括发病率、病情指数、防治效果。

苗期发病率为各处理发病株数占调查总株数的百分比。

黄瓜枯萎病参照 Elagamey 等^[17]的分级标准, 病情指数参照 Zhang 等^[18]的计算方法。

0 级: 无症状; 1 级: 真叶、子叶黄化或萎蔫面积不超过总面积的 50%; 2 级: 真叶、子叶黄化或萎蔫面积超过总面积的 50%; 3 级: 叶片萎蔫或枯死, 仅生长点存活; 4 级: 全株严重萎蔫, 以致枯死。

病情指数 = \sum (病级株数 × 代表级数) / (植株总

数×最高代表级值)×100%

防治效果=(对照病情指数-处理病情指数)/
对照病情指数×100%

1.5 数据统计与分析

采用 DPS7.05 软件进行数据统计和方差分析,不同处理间数据的多重比较采用 Duncan 新复极差法检验($P<0.05$);采用 Origin 2019 软件作图。

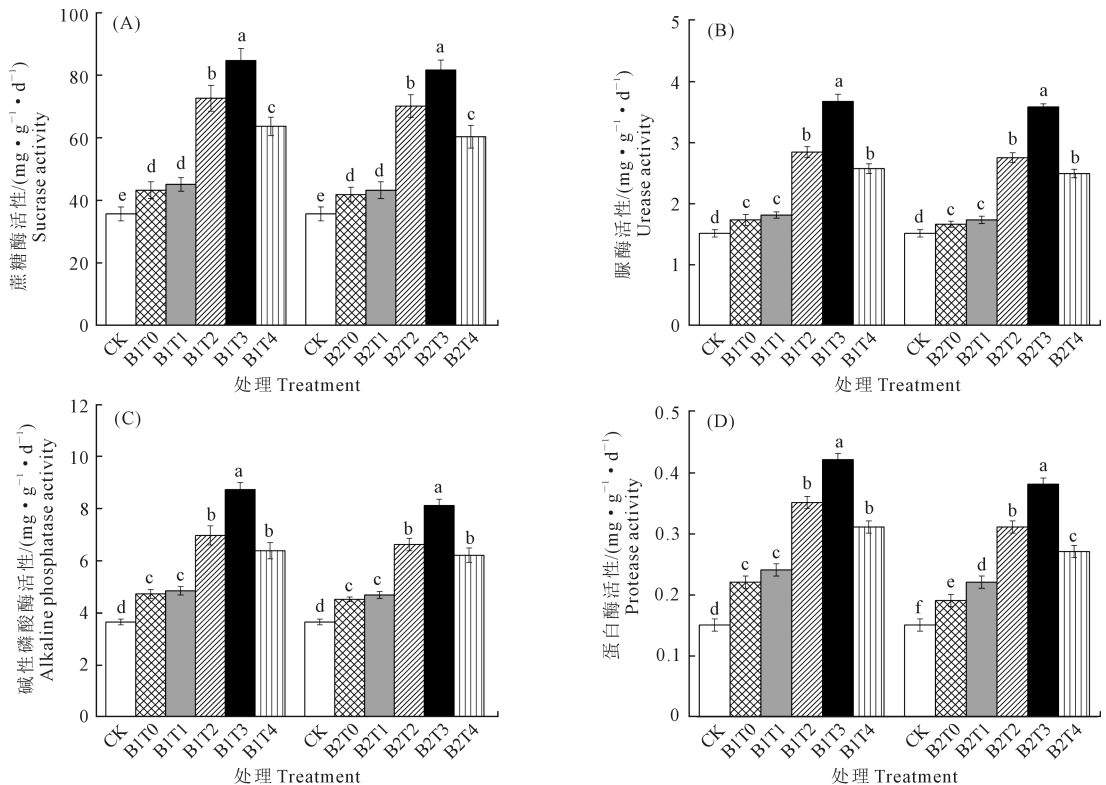
2 结果与分析

2.1 生物炭和木霉菌对黄瓜根际土壤酶活性的影响

在黄瓜播种后 30 d,生物炭和木霉菌对黄瓜幼苗根际土壤酶活性的影响如图 1 所示,在 B1(即 $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭)和 B2(即 $80\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭)下,不同处理土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶和蛋白酶活性均随着拟康氏木霉菌剂浓度增加呈现先上升后下降的变化趋势,均在 T1B3($1\times 10^4\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 尖孢镰刀菌粉剂+ $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭+ $1\times 10^6\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 拟康氏木霉菌剂)和 T2B3($1\times 10^4\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 尖孢镰刀菌粉剂

+ $80\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭+ $1\times 10^6\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 拟康氏木霉菌剂)达到最大值。

生物炭和木霉菌对黄瓜土壤蔗糖酶活性变化如图 1A 所示,在 B1 和 B2 下,B1T3 和 B2T3 的土壤蔗糖酶活性均达到最高值,分别为 $84.72\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $81.67\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。B1T0($1\times 10^4\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 尖孢镰刀菌粉剂+ $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭)、B1T1($1\times 10^4\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 尖孢镰刀菌粉剂+ $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭+ $1\times 10^4\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 拟康氏木霉菌剂)、B1T2($1\times 10^5\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 尖孢镰刀菌粉剂+ $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭+ $1\times 10^5\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 拟康氏木霉菌剂)、B1T3 和 B1T4($1\times 10^4\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 尖孢镰刀菌粉剂+ $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭+ $1\times 10^7\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 拟康氏木霉菌剂)均显著高于 CK($1\times 10^4\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 尖孢镰刀菌粉剂),分别提高 21.24%、26.49%、103.62%、137.44%和 78.50%;B2T0($1\times 10^4\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 尖孢镰刀菌粉剂+ $80\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭)、B2T1($1\times 10^4\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 尖孢镰刀菌粉剂+ $80\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭+ $1\times 10^4\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 拟康氏木霉菌剂)、B2T2($1\times 10^5\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 尖孢镰刀菌粉剂+ $80\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭+ $1\times 10^5\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 拟康氏木霉菌剂)、



注:图中正负误差线表示标准差大小。不同小写字母表示在同一生物炭添加量下各处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Values in the chart are standard error. Different lowercase letters in the same biochar addition indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1 生物炭和木霉菌对黄瓜根际土壤酶活性的影响

Fig.1 Effects of biochar and *Trichoderma pseudokoningii* on enzyme activity in cucumber rhizosphere soil

B2T3 和 B2T4 (1×10^4 cfu · g⁻¹ 尖孢镰刀菌粉剂 + 80 g · kg⁻¹ 生物炭 + 1×10^7 cfu · g⁻¹ 拟康氏木霉菌剂) 均显著高于 CK, 分别提高 17.29%、21.24%、96.66%、128.90% 和 69.23%。B1T3 与 B1T2、B1T4、B1T1、B1T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B2T3 与 B2T2、B2T4、B2T1、B2T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B1T1 与 B1T0、B2T1 与 B2T0 之间均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。在相同浓度的拟康氏木霉菌剂处理下, B1 处理分别比 B2 处理下的土壤蔗糖酶活性提高 3.37%、4.32%、3.53%、3.73% 和 5.48%。

土壤脲酶活性变化如图 1B 所示, 在 B1 和 B2 下, B1T3 和 B2T3 土壤脲酶活性均达到最高值, 分别为 $3.67 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $3.58 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。B1T0、B1T1、B1T2、B1T3 和 B1T4 均显著高于 CK, 分别提高 14.57%、19.87%、288.08%、143.05% 和 70.020%; B2T0、B2T1、B2T2、B2T3 和 B2T4 均显著高于 CK, 分别提高 9.93%、14.57%、282.12%、137.09% 和 64.90%。B1T3 与 B1T2、B1T4、B1T1、B1T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B2T3 与 B2T2、B2T4、B2T1、B2T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B1T2 与 B1T4、B1T0 与 B1T1、B2T2 与 B2T4、B2T0 与 B2T1 之间均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

土壤碱性磷酸酶活性变化如图 1C 所示, 在 B1 和 B2 下, B1T3 和 B2T3 土壤碱性磷酸酶活性均达到最高值, 分别为 $8.73 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $8.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。B1T0、B1T1、B1T2、B1T3 和 B1T4 均显著高于 CK, 分别提高 29.67%、32.97%、291.48%、139.84% 和 75.27%; B2T0、B2T1、B2T2、B2T3 和 B2T4 均显著高于 CK, 分别提高 23.90%、28.57%、281.87%、123.08% 和 70.60%。B1T3 与 B1T2、B1T4、B1T1、B1T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B2T3 与 B2T2、B2T4、B2T1、B2T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B1T2 与 B1T4、B1T0 与 B1T1、B2T2 与 B2T4、B2T0 与 B2T1 之间均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

土壤蛋白酶活性变化如图 1D 所示, 在 B1 和 B2 下, B1T3 和 B2T3 土壤蛋白酶活性均达到最高值, 分别为 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.38 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。B1T0、B1T1、B1T2、B1T3 和 B1T4 均显著高于 CK, 分别提高 46.67%、60.00%、333.33%、180.00% 和 26.67%; B2T0、B2T1、B2T2、B2T3 和 B2T4 均显著高于 CK, 分别提高 26.67%、46.67%、106.67%、153.33% 和 80.00%。B1T3 与 B1T2、B1T4、B1T1、B1T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B2T3 与 B2T2、B2T4、B2T1、B2T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B1T2

与 B1T4、B1T0 与 B1T1 之间均未达到显著水平 ($P > 0.05$), B2T2、B2T4、B2T1、B2T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$)。在相同浓度的拟康氏木霉菌剂处理下, B1 处理下的土壤脲酶活性、土壤碱性磷酸酶活性、土壤蛋白酶活性均高于 B2 处理下的对应值。

2.2 生物炭和木霉菌对黄瓜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

在黄瓜播种后 30 d, 生物炭和木霉菌对黄瓜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响如图 2 所示, 在 B1 和 B2 下, 不同处理下黄瓜叶片 SOD、APX、CAT 和 POD 活性均随着拟康氏木霉菌剂浓度增加呈现先上升后下降的变化趋势, 均在 T1B3 和 T2B3 达到最大值。

黄瓜幼苗叶片 SOD 活性变化如图 2A 所示, 在 B1 和 B2 下, B1T3 和 B2T3 叶片 SOD 活性均达到最高值, 分别为 $416.82 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $403.67 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。B1T0、B1T1、B1T2、B1T3 和 B1T4 均显著高于 CK, 分别提高 11.05%、7.57%、48.71%、75.67% 和 33.52%; B2T0、B2T1、B2T2、B2T3 和 B2T4 均显著高于 CK, 分别提高 12.02%、16.52%、38.98%、70.12% 和 31.23%。B1T3 显著高于 B1T0、B1T1、B1T2 和 B1T4, 分别提高 63.31%、58.19%、18.13% 和 31.57%; B2T3 显著高于 B2T0、B2T1、B2T2 和 B2T4, 分别提高 51.86%、46.00%、22.41% 和 29.63%。B1T2、B1T4 与 B1T1、B1T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B1T1 与 B1T0、B2T2 与 B2T4、B2T1 与 B2T0 之间均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

黄瓜幼苗叶片 APX 活性变化如图 2B 所示, 在 B1 和 B2 下, B1T3 和 B2T3 叶片 APX 活性均达到最高值, 分别为 $267.64 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $253.27 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。B1T0、B1T1、B1T2、B1T3 和 B1T4 均显著高于 CK, 分别提高 24.97%、38.07%、75.10%、97.32% 和 61.67%; B2T0、B2T1、B2T2、B2T3 和 B2T4 均显著高于 CK, 分别提高 20.44%、29.64%、59.85%、86.72% 和 53.06%。B1T3 与 B1T2、B1T4、B1T1、B1T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B2T3 与 B2T2、B2T4、B2T1、B2T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B1T2 与 B1T4、B1T0 与 B1T1、B2T2 与 B2T4、B2T0 与 B2T1 之间均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

黄瓜幼苗叶片 CAT 活性变化如图 2C 所示, 在 B1 和 B2 下, B1T3 和 B2T3 叶片 CAT 活性均达到最高值, 分别为 $148.36 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $139.68 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。B1T0、B1T1、B1T2、B1T3 和 B1T4 均显著高于 CK, 分别提高 24.56%、31.31%、58.10%、71.95% 和 50.25%; B2T0、B2T1、B2T2、B2T3 和 B2T4 均显著高于 CK, 分别提高

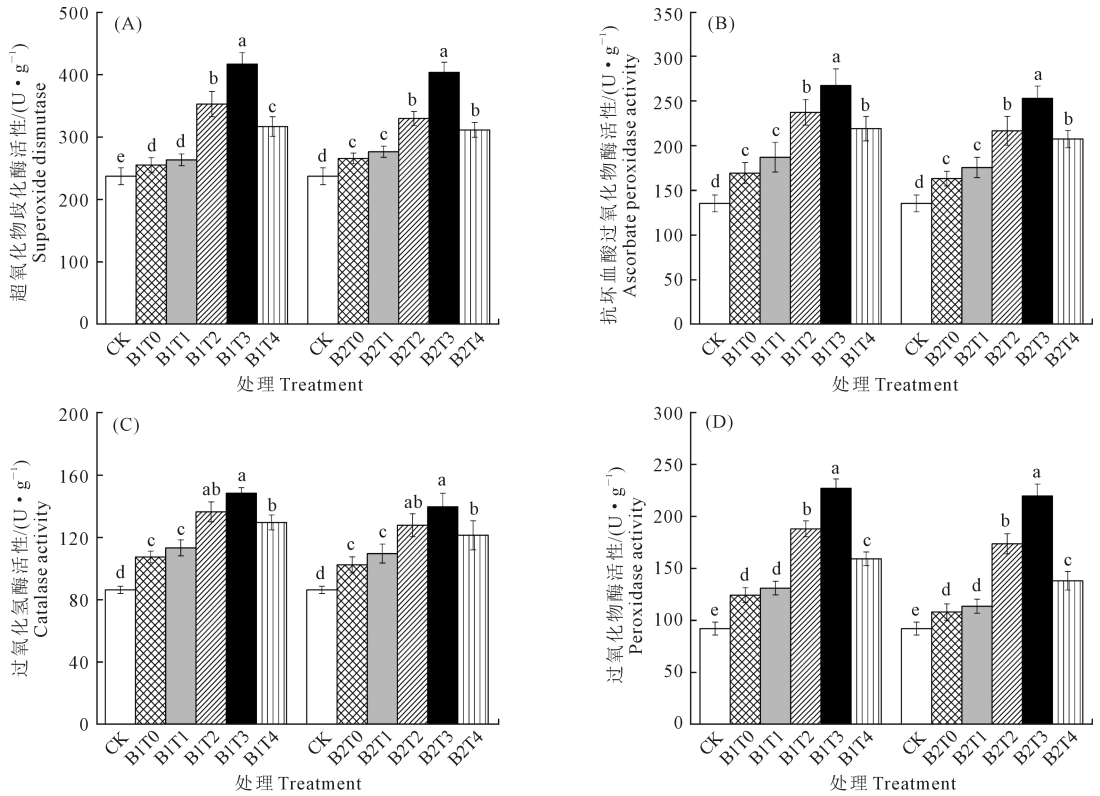


图 2 生物炭和木霉菌对黄瓜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Fig.2 Effects of biochar and *Trichoderma pseudokoningii* on antioxidant enzyme activity in cucumber seedling leaves

18.67%、27.07%、48.16%、61.89%和40.67%。B1T3 与 B1T4、B1T1、B1T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B2T3 与 B2T4、B2T1、B2T0 之间均达到显著水平 ($P < 0.05$), B1T3 与 B1T2、B2T3 与 B2T2、B1T1 与 B1T0、B2T1 与 B2T0 之间均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

黄瓜幼苗叶片 POD 活性变化如图 2D 所示,在 B1 和 B2 下,B1T3 和 B2T3 叶片 POD 活性均达到最高值,分别为 $227.21 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $219.82 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。B1T0、B1T1、B1T2、B1T3、B1T4 均显著高于 CK,分别提高 34.84%、42.16%、103.77%、146.06% 和 72.59%;B2T0、B2T1、B2T2、B2T3 和 B2T4 均显著高于 CK,分别提高 17.22%、23.29%、88.27%、138.06% 和 49.79%。B1T3 显著高于 B1T0、B1T1、B1T2 和 B1T4,分别提高 82.48%、73.09%、20.75% 和 42.57%;B2T3 显著高于 B2T0、B2T1、B2T2 和 B2T4,分别提高 103.09%、93.08%、26.44% 和 58.92%。B1T2 与 B1T4、B2T2 与 B2T4 之间达到显著水平 ($P < 0.05$);B1T0 与 B1T1、B2T0 与 B2T1 之间均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

2.3 生物炭和木霉菌对黄瓜幼苗形态建成的影响

在黄瓜播种后 30 d,生物炭和木霉菌对黄瓜幼苗形态建成指标的影响如表 2 所示。在 B1 和 B2 下,不同处理黄瓜幼苗株高、茎粗、根冠比和壮苗指

数均随着拟康氏木霉菌剂浓度增加呈现先上升后下降的变化趋势,且均在 B1T3 和 B2T3 达到最大值。在相同浓度的拟康氏木霉菌剂处理下,B1 处理下的黄瓜幼苗株高、茎粗、根冠比和壮苗指数均高于 B2 处理下的对应幼苗形态建成指标。

B1T3 和 B2T3 黄瓜幼苗株高、茎粗、根冠比和壮苗指数均最高,分别为 16.32 cm、5.26 mm、0.21、0.23 和 15.95 cm、5.09 mm、0.19、0.21。其中,B1T1、B1T2、B1T3 和 B1T4 株高均显著高于 CK,分别提高 19.06%、62.56%、86.30% 和 45.32%;B2T1、B2T2、B2T3 和 B2T4 株高均显著高于 CK,分别提高 17.12%、58.22%、82.08% 和 42.81%。B1T3 株高显著高于 CK、B1T0、B1T1、B1T2 和 B1T4,分别提高 86.30%、74.17%、56.47%、14.61% 和 28.20%;B2T3 株高显著高于 CK、B2T0、B2T1、B2T2 和 B2T4,分别提高 82.08%、73.18%、55.46%、15.08% 和 27.50%。CK 与 B1T0、CK 与 B2T0 之间未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

B1T0、B1T1、B1T2、B1T3 和 B1T4 茎粗均显著高于 CK,分别提高 13.44%、30.83%、70.36%、107.91% 和 50.99%;B2T1、B2T2、B2T3 和 B2T4 茎粗均显著高于 CK,分别提高 26.88%、64.43%、101.19% 和 48.62%。B1T3 茎粗显著高于 CK、B1T0、B1T1、B1T2 和 B1T4,分别提高 107.91%、83.28%、58.91%、22.04% 和

37.70%; B2T3 茎粗显著高于 CK、B2T0、B2T1、B2T2 和 B2T4, 分别提高 101.19%、85.09%、58.57%、22.36% 和 35.37%。CK 与 B2T0 之间未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

B1T0、B1T1、B1T2、B1T3 和 B1T4 根冠比均显著高于 CK, 分别提高 25.00%、37.50%、112.50%、162.50% 和 87.50%; B2T0、B2T1、B2T2、B2T3 和 B2T4 根冠比均显著高于 CK, 分别提高 12.50%、37.50%、100.00%、137.50% 和 75.00%。B1T3 根冠比显著高于 CK、B1T0、B1T1、B1T2 和 B1T4, 分别提高 162.50%、110.00%、90.91%、23.53% 和 40.00%; B2T3 根冠比显著高于 CK、B2T0、B2T1、B2T2 和 B2T4, 分别提高 137.50%、111.11%、72.73%、18.75% 和 35.71%;

B1T0、B1T1、B1T2、B1T3 和 B1T4 壮苗指数均显著高于 CK, 分别提高 85.71%、57.14%、142.86%、228.57% 和 128.57%; B2T0、B2T1、B2T2、B2T3 和 B2T4 壮苗指数均显著高于 CK, 分别提高 42.86%、71.43%、114.29%、200.00% 和 100.00%。B1T3 壮苗指数显著高于 CK、B1T0、B1T1、B1T2 和 B1T4, 分别提高 228.57%、109.09%、76.92%、35.29% 和 43.75%; B2T3 壮苗指数显著高于 CK、B2T0、B2T1、B2T2 和 B2T4, 分别提高 200.00%、110.00%、75.00%、40.00% 和 50.00%。

2.4 生物炭和木霉菌对黄瓜幼苗枯萎病盆栽防治效果的影响

当黄瓜播种后 30 d, 调查在 B1 和 B2 下, 生物炭和木霉菌对黄瓜幼苗的发病率和发病情况, 计算病情指数及防治效果, 生物炭和木霉菌对黄瓜幼苗枯萎病防治效果的影响如表 3 所示。在 B1 和 B2 下, 不同处理黄瓜幼苗发病率和病情指数均随着拟康氏木霉菌剂浓度增加呈现先下降后上升的变化趋势, 而防治效果则呈现先上升后下降的变化趋势。在相同浓度的拟康氏木霉菌剂处理下, B1 处理下的黄瓜幼苗发病率和病情指数均低于 B2 处理, 而防治效果则高于 B2 处理。

在 B1 下, B1T3 黄瓜幼苗发病率和病情指数均达到最低值, 分别为 7.36% 和 4.78。CK 发病率和病情指数均显著高于 B1T0、B1T1、B1T2、B1T3、B1T4, 分别提高 160.69%、417.06%、879.43%、1258.70%、743.17% 和 163.24%、245.14%、552.58%、1037.24%、434.51%。B1T3 防治效果最高 (91.21%), B1T3 显著高于 B1T0、B1T1、B1T2 和 B1T4, 分别提高 47.09%、28.41%、7.71% 和 12.20%。在 B2 下, B2T3 黄瓜幼苗发病率和病情指数均达到最低值, 分别为 9.17% 和 5.36。CK 发病率和病情指数均显著高于 B2T0、B2T1、B2T2、B2T3、B2T4, 分别提高 131.21%、478.37%、673.40%、990.51%、

表 2 生物炭和木霉菌对黄瓜幼苗形态建成的影响

Table 2 Effects of biochar and *Trichoderma pseudokoningii* on the morphogenesis of cucumber seedlings

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	根冠比 Root-shoot ratio	壮苗指数 Strong seedling index	处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	根冠比 Root-shoot ratio	壮苗指数 Strong seedling index
CK	8.76±0.12e	2.53±0.09f	0.08±0.01e	0.07±0.01e	CK	8.76±0.12e	2.53±0.09e	0.08±0.01f	0.07±0.01e
B1T0	9.37±0.31e	2.87±0.08e	0.10±0.01d	0.11±0.01d	B2T0	9.21±0.24e	2.75±0.08e	0.09±0.01e	0.10±0.01d
B1T1	10.43±0.56d	3.31±0.14d	0.11±0.01d	0.13±0.01c	B2T1	10.26±0.83d	3.21±0.11d	0.11±0.01d	0.12±0.01c
B1T2	14.24±0.78b	4.31±0.19b	0.17±0.01b	0.17±0.01b	B2T2	13.86±0.93b	4.16±0.19b	0.16±0.01b	0.15±0.01b
B1T3	16.32±0.91a	5.26±0.21a	0.21±0.01a	0.23±0.01a	B2T3	15.95±0.76a	5.09±0.25a	0.19±0.01a	0.21±0.01a
B1T4	12.73±0.76c	3.82±0.18c	0.15±0.01c	0.16±0.01b	B2T4	12.51±0.86c	3.76±0.13c	0.14±0.01c	0.14±0.01b

注: 表中的数值为平均值±标准差, 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Values are mean values ± standard error in the table. Different lowercase letters mean significant differences within the same column ($P < 0.05$). The same below.

表 3 生物炭和木霉菌对黄瓜幼苗枯萎病防治效果的影响

Table 3 Effects of biochar and *Trichoderma pseudokoningii* on the control efficiency against cucumber Fusarium wilt

处理 Treatment	发病率/% Incidence ratio	病情指数 Disease index	防治效果/% Control efficacy	处理 Treatment	发病率/% Incidence ratio	病情指数 Disease index	防治效果/% Control efficacy
CK	100.00±5.36a	54.36±2.12a		CK	100.00±5.36a	54.36±2.12a	
B1T0	38.36±1.13b	20.65±1.16b	62.01±1.43d	B2T0	43.25±2.14b	23.57±0.86b	56.64±1.14d
B1T1	19.34±0.95c	15.75±0.93c	71.03±3.24c	B2T1	17.29±0.86c	17.28±0.93c	68.21±2.63c
B1T2	10.21±0.82d	8.33±0.52d	84.68±2.67b	B2T2	12.93±0.73d	9.81±0.62d	81.95±2.84b
B1T3	7.36±0.37e	4.78±0.13e	91.21±3.68a	B2T3	9.17±0.41e	5.36±0.17e	90.14±3.41a
B1T4	11.86±0.84d	10.17±0.86d	81.29±3.47b	B2T4	14.25±0.73d	12.27±0.68d	77.43±3.51b

601.75%和130.63%、214.58%、454.13%、914.18%、343.03%。B2T3防治效果最高(90.14%),B2T3显著高于B2T0、B2T1、B2T2和B2T4,分别提高59.15%、32.15%、9.99%和16.41%。

3 讨论

木霉作为广泛应用的植生防真菌,对植物病原真菌有广谱的拮抗作用,如镰刀菌 *Fusarium* spp.、腐霉菌 *Pythium* spp.、疫霉菌 *Phytophthora* spp.、立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani* 等^[19]。Mao 等^[20]研究了钩状木霉 MHT1134 对连作辣椒枯萎病的防治效果,结果显示,MHT1134 对辣椒枯萎病的防治效果分别为 63.03% 和 70.21%;Zhang 等^[21]研究了不同棘孢木霉 *T.asperellum* 施用量对西瓜枯萎病的防治效果,结果显示,棘孢木霉 M45a 颗粒剂改善了西瓜花期枯萎病防治效果,防治效果可以达到 67.44%。生物炭因具有刺激植物生长和增强植物防御机制的功能而被逐渐用于植物病害防治^[22]。本研究中的 B1T3 处理即 1×10^4 cfu · g⁻¹ 尖孢镰刀菌粉剂 + 40 g · kg⁻¹ 的生物炭 + 1×10^6 cfu · g⁻¹ 拟康氏木霉分生孢子菌剂,黄瓜苗期枯萎病的发病率降至 7.36%、病情指数降至 4.78、盆栽防治效果达到 91.21%,在各处理中的防治效果为最佳,说明生物炭和木霉菌配合施用对防治黄瓜枯萎病具有明显作用效果。匡志豪等^[23]研究发现,施用生物炭后,高抗黑胫病品种 G28、NC82 黑胫病的发病率分别降至 27.65% 和 23.27%,病情指数分别降至 17.26 和 14.94,而防治效果则分别达到 73.65% 和 80.21%,与本研究结果一致。这可能是生物炭改变了植株根际细菌群落组成,增加根际细菌群落多样性,抑制病原菌活动^[24]。本研究结果是生物炭和木霉菌剂共同作用的结果,其中生物炭和木霉菌剂的各自贡献率大小有待进一步试验进行研究。

土壤酶是一类具有催化能力的生物活性物质,由微生物、动植物活体分泌及动植物残体分解释放于土壤中,其活性的高低可以表征土壤养分的循环状况和土壤质量^[25]。在本研究中,利用生物炭和木霉处理,均有效提高了黄瓜根际土壤酶活性,以 B1T3 处理效果最佳。与 CK 相比,B1T3 黄瓜根际土壤蔗糖酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性、蛋白酶活性分别提高了 137.44%、143.05%、139.84%、180.00%。许云翔等^[26]施用生物炭 6 a 后发现土壤脲酶和酸性磷酸酶的活性显著增加,土壤脲酶活性以 BC2 处理增加幅度最为明显,增幅达 36.5%;土壤酸性磷酸酶活性以 BC3 处理土壤酸性磷酸酶活

性最高,达 $7.96 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,与本研究结果相类似。本研究只利用了盆栽试验,且采用了灭菌土壤,研究结论有待于在田间条件下开展更多的调查研究,以验证本文的研究结果,为科学合理地利利用生物炭和木霉菌配合施用防治黄瓜病害,减少化学农药的使用,保障黄瓜安全生产提供依据。

Sofy 等^[27]研究表明木霉、生物炭组合显著增加了盐胁迫下菠菜株高、根长以及地上部和根系的鲜、干质量,有效缓解了盐胁迫对菠菜植株的伤害。本研究中,利用生物炭和木霉处理,均有效提高了黄瓜幼苗形态建成,以 B1T3 处理效果最佳。与 CK 相比,B1T3 黄瓜幼苗株高、茎粗、根冠比和壮苗指数分别比 CK 提高了 86.30%、107.91%、162.50% 和 228.57%。这与 Širic 等^[28]利用菌糠生物炭和植物根际促生菌联合配施显著提高了花椰菜的株高、根长、株幅、叶片数的结果相类似。这是由于生物炭的孔隙构造发达、比表面积大,有助于在土壤中保持更多的水分和养分^[29],从而改善植物的生长和生理活性有关。

木霉是一种重要的植物根际促生菌,不仅具有促进宿主生长、改善植物生理代谢的作用,而且木霉菌与植物互作过程中能诱导植物分泌 SOD、APX、CAT、POD、PPO 等次生代谢产物,这些物质既能抑制病原菌也能诱导植物系统抗性^[30]。Zaw 等^[31]研究表明,绿色木霉 Tv 911 促进了日本芥菜、番茄和萝卜生长;Vij 等^[32]研究结果显示绿色木霉 *Trichoderma viride* 和荧光假单胞菌 *Pseudomonas fluorescens* 的组合处理对甘蓝 (*Brassica oleracea* L.) 幼苗质量和产量参数均表现出有益效果。在本研究中,利用生物炭和木霉处理,均有效提高了黄瓜幼苗叶片抗氧化酶活性,以 B1T3 处理效果最佳。与 CK1 相比,B1T3 黄瓜叶片 SOD、APX、CAT、POD 活性分别提高了 75.67%、97.32%、71.95%、146.06%。这与 Boakye 等^[33]利用长枝木霉 *Trichoderma longibrachiatum* 菌株 (TL6 和 TL13) 降低了雪豌豆根腐病发病程度,提高 SOD、POD、CAT 的活性,促进了豌豆幼苗生长的结果相类似。这是因为木霉通过与作物互作,诱导病原菌感染条件下植株产生 CAT、POD、SOD、APX、PPO 等保护性酶,清除了植物体内活性氧^[34],缓解了病害胁迫下膜脂过氧化作用对细胞膜的伤害。

4 结论

生物炭和木霉菌通过改善黄瓜根际土壤酶活性和幼苗叶片抗氧化酶活性,促进了幼苗形态建成,提高了对枯萎病的防治效果,以 B1T3 即 1×10^4

cfu · g⁻¹尖孢镰刀菌粉剂+40 g · kg⁻¹生物炭+1×10⁶ cfu · g⁻¹拟康氏木霉菌剂应用效果最好。在黄瓜播种后 30 d, B1T3 根际土壤蔗糖酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性、蛋白酶活性均显著高于其他处理, 分别比 CK 提高了 137.44%、143.05%、139.84%、180.00%; B1T3 黄瓜幼苗叶片 SOD、APX、CAT、POD 活性分别比 CK 提高了 75.67%、97.32%、71.95%、146.06%; B1T3 处理黄瓜幼苗株高、茎粗、根冠比和壮苗指数分别比 CK 提高了 86.30%、107.91%、162.50%、228.57%; 黄瓜苗期枯萎病盆栽防治效果达到 91.21%。

参 考 文 献:

- [1] DING X T, NIE W F, QIAN T T, et al. Low plant density improves fruit quality without affecting yield of cucumber in different cultivation periods in greenhouse[J]. *Agronomy*, 2022, 12(6): 1441.
- [2] ZHOU X G, GAO D M, LIU J, et al. Changes in rhizosphere soil microbial communities in a continuously monocropped cucumber (*Cucumis sativus* L.) system[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 60: 1-8.
- [3] AHAMMED G J, MAO Q, YAN Y R, et al. Role of melatonin in arbuscular mycorrhizal fungi-induced resistance to fusarium wilt in cucumber[J]. *Phytopathology*, 2020, 110(5): 999-1009.
- [4] CHANG C L, FU X P, ZHOU X G, et al. Effects of seven different companion plants on cucumber productivity, soil chemical characteristics and pseudomonas community [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(10): 2206-2214.
- [5] XU W, YANG Q, YANG F, et al. Evaluation and genome analysis of bacillus subtilis YB-04 as a potential biocontrol agent against fusarium wilt and growth promotion agent of cucumber[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 885430.
- [6] CHEN J, ZHOU L, DIN IU, et al. Antagonistic activity of *Trichoderma* spp. against *Fusarium oxysporum* in rhizosphere of *Radix pseudostellariae* triggers the expression of host defense genes and improves its growth under long-term monoculture system[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 579920.
- [7] MOHAMED B F F, SALLAM N M A, ALAMRI S A M, et al. Approving the biocontrol method of potato wilt caused by *Ralstonia solanacearum* (Smith) using *Enterobacter cloacae* PS14 and *Trichoderma asperellum* T34[J]. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 2020, 30(1): 61.
- [8] METWALLY R A, AL-AMRI S M. Individual and interactive role of *Trichoderma viride* and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and pigment content of onion plants[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2020, 70(2): 79-86.
- [9] HARMAN G E. Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp [J]. *Phytopathology*, 2006, 96(2): 190-194.
- [10] GETACHEW M. Effect of biochar application on soil acidity reclamation and crop production improvements: a review [J]. *Journal of Chemical, Environmental and Biological Engineering*, 2023, 7(2): 57-66.
- [11] 何聪莲, 顾浩, 张锦韬, 等. 氮肥配施生物炭对烤烟生长及烤后烟叶化学品质的影响[J]. *云南农业大学学报:自然科学*, 2022, 37(6): 1014-1020.
- HE C L, GU H, ZHANG J T, et al. Effects of combined application of biochar and nitrogen fertilizer on growth and chemical quality of flue-cured tobacco [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2022, 37(6): 1014-1020.
- [12] 李珍, 何玉婷, 邹毅辉, 等. 生物炭与复合肥配施对连作穿心莲生长的影响[J]. *热带农业科技*, 2022, 45(4): 34-40.
- LI Z, HE Y T, ZOU Y H, et al. Effects of biochar and compound fertilizer on the growth of continuous cropping *Andrographis paniculata* [J]. *Tropical Agricultural Science & Technology*, 2022, 45(4): 34-40.
- [13] 王依纯, 廉华, 马光恕, 等. 木霉不同施用方式对黄瓜幼苗质量特性及枯萎病防效的影响[J]. *中国生物防治学报*, 2019, 35(3): 416-425.
- WANG Y C, LIAN H, MA G S, et al. Effects of application modes of *Trichoderma* on seedling quality characteristics of cucumber and control effect against fusarium wilt [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2019, 35(3): 416-425.
- [14] 马光恕, 张淳, 李润哲, 等. 拟康氏木霉菌剂对黄瓜幼苗生长、抗氧化系统及枯萎病防效的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(6): 72-81, 107.
- MA G S, ZHANG T, LI R Z, et al. Effects of *Trichoderma pseudokoningii* agents on growth, antioxidant system and control effect against fusarium wilt of cucumber seedlings [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(6): 72-81, 107.
- [15] 马光恕, 梁泉, 张淳, 等. 生物炭对甜瓜幼苗质量与根系生理特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(5): 212-221.
- MA G S, LIANG X, ZHANG T, et al. Effects of biochar on seedling quality and root physiological characteristics of melon [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(5): 212-221.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 89-120.
- GUAN S Y. Soil enzymes and their research methods [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 89-120.
- [17] ELAGAMEY E, ABELLATEF M A E, ARAFAT M Y. Proteomic insights of chitosan mediated inhibition of *Fusarium oxysporum* f.sp.cucumberinum [J]. *Journal of Proteomics*, 2022, 260: 104560.
- [18] ZHANG C Y, WANG W W, HU Y H, et al. A novel salt-tolerant strain *Trichoderma atroviride* HN082102.1 isolated from marine habitat alleviates salt stress and diminishes cucumber root rot caused by *Fusarium oxysporum* [J]. *BMC Microbiology*, 2022, 22(1): 67.
- [19] YOUSSEF S A, TARTOURA K A, ABDELRAOUF G A. Evaluation of *Trichoderma harzianum* and *Serratia proteamaculans* effect on disease suppression, stimulation of ROS-scavenging enzymes and improving tomato growth infected by *Rhizoctonia solani* [J]. *Biological Control*, 2016, 100: 79-86.
- [20] MAO T T, JIANG X L. Changes in microbial community and enzyme activity in soil under continuous pepper cropping in response to *Trichoderma hamatum* MHT1134 application [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 21585.
- [21] ZHANG Y, TIAN C, XIAO J L, et al. Soil inoculation of *Trichoderma asperellum* M45a regulates rhizosphere microbes and triggers watermelon resistance to *Fusarium* wilt [J]. *AMB Express*, 2020, 10(1): 189.
- [22] 刘悦, 史文琦, 曾凡松, 等. 生物炭对小麦赤霉病的防治效果及产量的影响[J]. *植物保护*, 2020, 46(4): 270-274, 281.
- LIU Y, SHI W Q, ZENG F S, et al. Effect of biochar on controlling wheat *Fusarium* head blight and yield [J]. *Plant Protection*, 2020, 46(4): 270-274, 281.
- [23] 匡志豪, 殷金玉, 李想, 等. 生物炭对不同烤烟品种生理及烟草黑胫病的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(15): 100-105.

- KUANG Z H, YIN Q Y, LI X, et al. The effects of biochar on the physiology of different tobacco varieties and tobacco black shank disease[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(15): 100-105.
- [24] MUKHERJEE M, MUKHERJEE P K, HORWITZ B A, et al. *Trichoderma*-plant-pathogen interactions: advances in genetics of biological control[J]. *Indian Journal of Microbiology*, 2012, 52(4): 522-529.
- [25] 周冉冉, 马司光, 张文晶, 等. 生物炭与生物基质对设施黄瓜连作土壤改良效果研究[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43(3): 537-546.
- ZHOU R R, MA S G, ZHANG W J, et al. The effect of biochar and biological substrate on soil amending under protected cucumber continuous cropping[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition)*, 2021, 43(3): 537-546.
- [26] 许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 等. 施用生物炭6年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1110-1118.
- XU Y X, HE L L, LIU Y X, et al. Effects of biochar addition on enzyme activity and fertility in paddy soil after six years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1110-1118.
- [27] SOFY M, MOHAMED H, DAWOOD M, et al. Integrated usage of *Trichoderma harzianum* and biochar to ameliorate salt stress on spinach plants[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2022, 68(14): 2005-2026.
- [28] ŠIRIC I, EID E M, TAHER M A, et al. Combined use of spent mushroom substrate biochar and PGPR improves growth, yield, and biochemical response of Cauliflower (*Brassica oleracea var. botrytis*): a preliminary study on greenhouse cultivation[J]. *Horticulturae*, 2022, 8(9): 830.
- [29] MEDEIROS E V D, MORAES M D C H S, COSTA D P D, et al. Effect of biochar and inoculation with *Trichoderma aureoviride* on melon growth and sandy entisol quality[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2020, 14(6): 971-977.
- [30] ELKELISH A A, ALHAITHLOUL H A S, QARI S H, et al. Pre-treatment with *Trichoderma harzianum* alleviates waterlogging-induced growth alterations in tomato seedlings by modulating physiological, biochemical, and molecular mechanisms[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 171: 103946.
- [31] ZAW M, MATSUMOTO M. Plant growth promotion of *Trichoderma virens*, Tv911 on some vegetables and its antagonistic effect on fusarium wilt of tomato[J]. *Environment Control in Biology*, 2020, 58(1): 7-14.
- [32] VIJ S, SHARMA N, SHARMA M, et al. Application of *Trichoderma viride* and *Pseudomonas fluorescens* to cabbage (*Brassica oleracea L.*) improves both its seedling quality and field performance[J]. *Sustainability*, 2022, 14(13): 7583.
- [33] BOAKYE T A, LI H X, OSEI R, et al. Antagonistic effect of *Trichoderma longibrachiatum* (TL6 and TL13) on *Fusarium solani* and *Fusarium avenaceum* causing root rot on snow pea plants[J]. *Journal of Fungi*, 2022, 8(11): 1148.
- [34] WANG Z Q, WANG Z Q, LU B H, et al. Antagonistic potential of *Trichoderma* as a biocontrol agent against *Sclerotinia asari*[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 997050.

(上接第180页)

- [21] 周珊珊. 黄土塬区旱作春玉米蒸腾与农田蒸散过程及其对地膜覆盖的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- ZHOU S S. Processes of transpiration and evapotranspiration in a rainfed maize field and their responses to plastic mulch on the loess tableland[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [22] 王亮, 林涛, 严昌荣, 等. 地膜残留量对新疆棉田蒸散及棵间蒸发的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 120-128.
- WANG L, LIN T, YAN C R, et al. The impact of residual plastic film on evapotranspiration and inter plant evaporation in cotton fields in Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 120-128.
- [23] 吕娜娜, 白洁, 常存, 等. 近50年基于农作物种植结构的新疆绿洲农田蒸散发时空变化分析[J]. *地理研究*, 2017, 36(8): 1443-1454.
- LV N N, BAI J, CHANG C, et al. Analysis of spatiotemporal changes in evapotranspiration of oasis farmland in Xinjiang based on crop planting structure in the past 50 years[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(8): 1443-1454.
- [24] ANAPALLI S S, FISHER D K, PINNAMANENI S R, et al. Quantifying evapotranspiration and crop coefficients for cotton (*Gossypium hirsutum L.*) using an eddy covariance approach[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 233: 106091.
- [25] WU F Q, GUO S M, HUANG W B, et al. Soil water movement may regulate soil water consumption and improve cotton yields under different cotton cropping systems[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 211: 118278.
- [26] HUNSAKER D J, FRENCH A N, WALLER P M, et al. Comparison of traditional and ET-based irrigation scheduling of surface-irrigated cotton in the arid southwestern USA[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 209-224.
- [27] 赖虹雨, 吕德生, 朱艳, 等. 生物炭施加对微咸水滴灌棉田土壤水热盐及棉花生长的影响[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(2): 326-338.
- LAI H Y, LV D S, ZHU Y, et al. Effects of biochar application on soil hydrothermal salinity and cotton growth in brackish water drip irrigation cotton field[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(2): 326-338.
- [28] 雷杰. 不同矿化度水源膜下滴灌棉田盐分累积规律及作物生长模拟研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2023.
- LEI J. Study on salt accumulation and crop growth simulation of drip irrigation cotton fields with different mineralization degrees of water sources under film[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.
- [29] 杨天一, 王军, 张红梅, 等. 基于单作物系数法的华北平原典型农业生态系统蒸散规律研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(3): 356-366.
- YANG T Y, WANG J, ZHANG H M, et al. Evapotranspiration of typical agroecosystems in the North China plain based on single crop coefficient method[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(3): 356-366.
- [30] SHENG Z, ABUDU S, GANJEGUNTE G. Impacts of graywater irrigation and soil conditioning with mulch on cotton growth and soil properties[J]. *Water Supply*, 2019, 19(4): 1080-1087.