

# 消毒、伴生和微生物菌对连作基质性质及黄瓜生长发育的影响

董 宇<sup>1</sup>, 郭世荣<sup>1</sup>, 李向雨<sup>2</sup>, 王 健<sup>1</sup>, 王 玉<sup>1</sup>, 束 胜<sup>1\*</sup>

(1 南京农业大学 园艺学院, 南京 210095; 2 江苏谱发生态农业有限公司, 江苏宿迁 223600)

**摘 要:**以连续种植 2 茬的连作基质为对象, 采用室内盆栽试验, 设置连作基质太阳能消毒、热水消毒、多菌灵消毒、大蒜伴生栽培和施入微生物菌处理以及新基质对照, 在种植黄瓜后观测基质理化性质、养分含量、酚类物质含量、相关酶活性的变化以及黄瓜结果期生长发育、光合作用和果实产量的变化, 探究不同处理对连作基质栽培黄瓜生长发育影响的机制, 以期在生产上为废旧基质重复利用提供新的思路和方法。结果表明: 在连作基质栽培黄瓜后, 太阳能消毒和热水消毒处理均能显著提高连作基质的 pH, 同时降低电导率; 施入微生物菌处理的基质 EC 值、速效氮、速效磷、速效钾和总酚含量均显著低于连作基质, 而其基质磷酸酶活性和过氧化氢酶活性显著高于连作基质。热水消毒还显著降低连作基质的总酚含量和复合态酚含量。黄瓜生长至结果期, 太阳能消毒、热水消毒、多菌灵消毒、大蒜伴生栽培和施入微生物菌均显著增强黄瓜的根系活力和株高; 其中热水消毒和施入微生物菌处理的产量增加最为显著, 分别比连作基质栽培提高了 16.56% 和 18.40%。可见, 连作基质进行热水消毒处理和施入微生物菌处理均能降低基质盐分积累, 减少总酚含量, 进而显著提高黄瓜的根系活力和光合作用, 从而增加产量。

**关键词:**连作基质; 伴生栽培; 消毒; 微生物菌; 产量; 酶活性; 酚酸类物质

中图分类号: S626.5

文献标志码: A

## Effects of Disinfection, Accompanying Cultivation and Microbial Agent on the Properties of Continuous Cropping Substrate and Growth of Cucumbers

DONG Yu<sup>1</sup>, GUO Shirong<sup>1</sup>, LI Xiangyu<sup>2</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, SHU Sheng<sup>1\*</sup>

(1 College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Jiangsu Pufa Ecological Agriculture Co., Ltd., Suqian, Jiangsu 223600, China)

**Abstract:** Taking the continuous cropping substrate for two consecutive times as the object, we conducted the pot experiment to set up the solar disinfection, hot water disinfection, carbendazim disinfection, garlic associated cultivation, microbial agent and new substrate as control. After cucumber planting, we analyzed the changes of the physical and chemical properties, nutrient content, phenolic substance content, related enzyme activities of the substrate, as well as the changes of the growth and development, photosynthesis and fruit yield of cucumber in the fruiting period, to explore the mechanism of the effects of different treatments on the growth and development of cucumber in continuous cropping substrate cultivation, and to provide new ideas and methods for the reuse of waste substrate in production. The results

收稿日期: 2022-05-03; 修改稿收到日期: 2023-04-17

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目[ CX(20)3137 ]; 宁夏回族自治区农业科技自主创新资金项目(NGSB-2021-8-02); 江苏省苏北科技专项(SZ-SQ202062)

作者简介: 董 宇(1997—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事无土栽培研究。E-mail: 1825121923@qq.com

\* 通信作者: 束 胜, 博士, 教授, 主要从事设施蔬菜与无土栽培研究。E-mail: shusheng@njau.edu.cn

showed that both solar disinfection and hot water disinfection treatments significantly increased the pH of the continuous cropping substrate and decreased the electrical conductivity value after cucumber cultivation in the continuous cropping substrate. The electrical conductivity value, available nitrogen, available phosphorus, available potassium, and total phenol content of the substrate treated with microbial bacteria were significantly lower than those of the continuous cropping substrate, while the substrate phosphatase and catalase activities were significantly higher than those of the continuous cropping substrate. In addition, hot water disinfection significantly reduced the total phenolic content and composite phenolic content of the continuous cropping substrate. When cucumber grew to fruiting stage, solar disinfection, hot water disinfection, carbendazim disinfection, garlic associated cultivation and application of microbial bacteria significantly enhanced the root activity and plant height of cucumber. The most significant increase in yield was observed in hot water disinfection and the application of microbial bacteria, which increased by 16.56% and 18.40% compared to continuous cropping substrate cultivation, respectively. It could be seen that both hot water disinfection treatment and application of microbial bacteria in continuous cropping substrate could reduce the accumulation of substrate salt, reduce total phenolic content, and significantly improve the root vitality and photosynthesis of cucumber, thereby increasing cucumber yield.

**Key words:** continuous cropping substrate; accompanying cultivation; disinfection; microorganisms; yield; enzyme activity; phenolic acids

目前,世界上 90% 的无土栽培形式都是基质栽培,基质是无土栽培的重要因素。常见的栽培基质有草炭、蛭石和珍珠岩等,而草炭是不可再生资源,过度开采会破坏湿地环境,蛭石锻烧条件要求高,都是高成本基质材料<sup>[1]</sup>。从经济成本 and 环境保护的角度来看,基质多次利用是必然趋势。

基质重复利用可能出现的问题和土壤连作出现的问题类似,包括但不限于理化性质发生改变、盐分积累、根系残留和有害分泌物的累积、微生物群落的失衡以及病虫害的传播等。基质消毒是解决基质连作的有效途径,有研究发现淋洗+太阳热+杀菌药剂的消毒处理再结合一定量的石灰或有机肥能有效杀死连作基质中的致病菌,并使基质重要的理化指标达到正常生长水平<sup>[2]</sup>。周雪青等<sup>[3]</sup>基于微波电磁场作用的生物效应和热效应,研发了基质微波消毒设备,平均灭菌率可达 95.57%。不同的药剂消毒也可改变连作基质菌群多样性、结构和组成,恶霉灵+乙酸钠、2.2% 酒精和甲醛处理均能显著降低真菌 OTU 序列、Chao1 指数和 Ace 指数,并且甲醛处理在短期内对番茄连作基质微生物群落的影响较为明显的<sup>[4]</sup>。种植模式的改变也有利于缓解连作障碍,如连作豇豆与芹菜和紫背天葵伴生均可以提高叶片抗氧化酶活性和根际土壤酶活性,提高作物产量<sup>[5]</sup>。通过向废旧基质添加丛枝菌根可以减轻连作基质对番茄生长造成的影响,并促进番茄幼苗生长,提高幼苗根系活力,为连作基质再利用提供了新的途径<sup>[6]</sup>。

栽培后基质的处理是基质栽培亟待解决的问题,但是使用过的基质如何合理重复利用的相关研

究,与方兴未艾的设施基质栽培的发展速度并不一致。目前有关连作基质消毒处理后,其理化特性变化对连作基质栽培黄瓜生长发育方面的影响尚缺乏深入了解。因此,本试验以设施主栽的黄瓜品种为材料,研究 3 种消毒方式、大蒜伴生栽培和施入微生物菌对连作基质种植黄瓜后基质的理化性质的变化,以及对黄瓜的生长发育的影响,为栽培基质重复利用并达到最佳效果提供理论依据和实践指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试黄瓜品种为‘戴多星’水果型黄瓜,购自荷兰瑞克斯旺公司;供试基质为第一茬种植番茄第二茬种植黄瓜的连作基质(pH 5.79,电导率 1.02 mS/cm);供试大蒜购买于当地菜场,品种为‘邳州大蒜’;供试微生物菌为绿农林微生物菌,购自市场,其有效活菌数 $\geq 2.0 \times 10^8$ /g,有效菌种主要有哈茨木霉菌和枯草芽孢杆菌;供试新基质购自江苏兴农基质科技有限公司。

### 1.2 试验设计

试验于 2021 年 7—11 月在南京农业大学白马基地塑料大棚内进行。7 月 15 日到 8 月 15 日进行连作基质消毒试验,9 月 3 日进行黄瓜催芽、播种和育苗,当黄瓜幼苗两叶一心时,定植于 NAU-G1 栽培桶<sup>[7]</sup>中(外桶为聚乙烯制成,上口直径为 35 cm,下底直径为 22.5 cm,高 30 cm;内部网芯盘直径为 26.5 cm,网芯上口直径为 13.5 cm,下口为 11.5 cm,高 12 cm),每桶种植 2 株,缓苗 3 d 后开始连作

基质第三茬栽培试验,具体设计见表 1。其中,太阳能消毒是指利用夏季高温在空闲的塑料大棚里进行,消毒前给基质喷水,使基质含水量保持在 70% 以上,然后把基质堆成堆体(其基质堆体高度不超过 10 cm,长度和宽度根据地形而定),用塑料薄膜覆盖,曝晒 30 d。热水消毒是采用 90~100 ℃ 的热水浸泡基质 3 h,其含水量达 85%,然后用塑料薄膜覆盖,曝晒 30 d。夏季温室内温度最高可达 60 ℃。多菌灵消毒方法是每 1 m<sup>3</sup> 基质上施 50% 多菌灵粉剂 40 g,拌匀后用塑料薄膜覆盖,覆盖 30 d,揭去薄膜后待药味挥发掉再使用。大蒜伴生栽培是使用未进行处理的连作基质,在 1 株黄瓜 3 cm 处附近种植 2 株已出芽的大蒜;施入微生物菌剂则是将微生物原液激活稀释 1 000 倍,然后在黄瓜定植后进行灌根,

每桶浇灌 600 mL。

试验采用随机区组排列,每个处理 3 个重复。育苗、定植、定植后的管理、病虫害防治和温室环境管理各处理均保持一致。在基质种植前和种植结束后分别取基质样品,重复 3 次。剔除植物残体后分为两部分,一部分装入自封袋中迅速保存于 4 ℃ 的冰箱中,用于测定基质的磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和多酚氧化酶活性,以及基质总酚、水溶性酚、复合态酚、阿魏酸、对羟基苯甲酸、苯甲酸和香草醛含量;另一部分风干,磨碎过筛(0.25 mm),保存测定基质理化性状。

另外,于黄瓜结果期(30 d)测定其株高、茎粗、叶绿素相对含量(SPAD)、地上部干(鲜)重、地下部干(鲜)重、根系活力和光合气体交换参数。

| 表 1 试验设计                       |                                               |                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Table 1 Experimental treatment |                                               |                                                                                                                                                                                          |
| 处理 Treatment                   | 试验设计 Test set                                 | 备注 Note                                                                                                                                                                                  |
| CK                             | 新基质 New substrate                             | 未使用过的新基质 Unused new substrate                                                                                                                                                            |
| T <sub>0</sub>                 | 连作基质 Continuous cropping substrate            |                                                                                                                                                                                          |
| T <sub>1</sub>                 | 连作基质太阳能消毒 Solar disinfection                  | 连作基质为连续种植两茬(第一茬番茄、第二茬黄瓜)后的栽培基质<br>Continuous cropping substrate is the cultivation substrate after planting two successive crops (the first crop of tomato, the second crop of cucumber) |
| T <sub>2</sub>                 | 连作基质热水消毒 Hot water disinfection               |                                                                                                                                                                                          |
| T <sub>3</sub>                 | 连作基质多菌灵消毒 Carbendazim disinfection            |                                                                                                                                                                                          |
| T <sub>4</sub>                 | 连作基质大蒜伴生 Garlic concomitant cultivation       |                                                                                                                                                                                          |
| T <sub>5</sub>                 | 连作基质施入微生物菌剂 Application of microbial bacteria |                                                                                                                                                                                          |

### 1.3 指标测定及方法

**1.3.1 基质理化性状** 基质酸碱度、电导率、容重和孔隙度的测定采用郭世荣等<sup>[8]</sup>的方法。

**1.3.2 基质养分含量** 基质速效氮含量、速效磷含量和速效钾含量采用鲍士旦<sup>[9]</sup>的方法测定。基质的全磷、全钾、钙和铁等矿质元素的含量通过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP,Optima 8000)测定。

**1.3.3 基质酚类物质含量** 基质总酚、复合态酚酸和水溶性酚酸含量用改良的 Folin-Ciocalteau 法测定<sup>[10]</sup>。苯甲酸、对羟基苯甲酸、阿魏酸和香草醛含量采用谭秀梅等<sup>[11]</sup>的方法测定。

**1.3.4 基质酶活性** 基质脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性参考关松荫等<sup>[12]</sup>的方法测定。多酚氧化酶活性采用 Solarbio 土壤多酚氧化酶活性检测试剂盒测定,活性结果以 U/g 表示。

**1.3.5 植株生长指标和 SPAD** 株高采用卷尺测量;茎粗采用游标卡尺测量;SPAD 值采用 SPAD502 叶绿素含量测定仪测定;地上部、地下部干鲜重的测定参照周冉冉等<sup>[13]</sup>的方法。

**1.3.6 根系活力和叶片光合气体交换参数** 根系活力采用氯化三苯基四氯唑(TTC)比色法测定;于晴天上午,采用 LI-6400XT 便携式光合系统测量仪测定黄瓜结果期的叶片气体交换参数:净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ ),在测定时光合仪的光强控制在 800  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,叶室温度控制在  $(25 \pm 1)$  ℃,参比室 CO<sub>2</sub> 浓度为  $(400 \pm 10)$   $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,相对湿度 60%~70%。

**1.3.7 果实产量和品质** 黄瓜结果期记录单株结果数和单果重,统计其单株产量。每个处理随机选取同一节位的果实,测定其果实品质。果实可溶性固形物、可溶性糖、维生素 C、可溶性蛋白质和可滴定酸含量测定参照鲍士旦<sup>[9]</sup>的方法。

### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 25.0 进行数据统计和方差分析,采用 Duncan 多重极差检验进行单因素方差分析( $P < 0.05$ )。采用 Origin 2018 pro 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 消毒、伴生和微生物菌对连作基质种植黄瓜后理化性质和养分含量的影响

如表 2 所示,与新基质(CK)相比,连作基质(T<sub>0</sub>)的电导率显著增加,其余指标均无显著变化。与 T<sub>0</sub> 相比,基质的 pH 值在太阳能消毒(T<sub>1</sub>)和热水消毒(T<sub>2</sub>)处理下分别显著提高了 7.29%和 10.19%,在其余处理下无显著变化,其中的 T<sub>2</sub> 处理还显著高于 CK;基质的电导率在各处理下均比 T<sub>0</sub> 显著降低,且除大蒜伴生(T<sub>4</sub>)处理外比 CK 增加 9.09%~63.64%;基质的容重除 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理比 T<sub>0</sub> 显著降低外,其余处理均与 T<sub>0</sub> 无显著差异,且所有处理比 CK 降低 3.85%~23.98%,降幅大多达到显著水平;基质间总孔隙度在各处理及对照间均无显著差异。

表 2 消毒、伴生和微生物菌处理连作基质理化性质在种植黄瓜后的变化

Table 2 The physico-chemical properties of continuous cropping substrates treated by disinfection, accompanying cultivation and microbial agent after planting cucumber

| 处理<br>Treatment | 酸碱度<br>Power of hydrogen (pH) | 电导率<br>Electrical conductivity/(mS/cm) | 容重<br>Bulk density/(g/cm <sup>3</sup> ) | 总孔隙度<br>Total porosity/% |
|-----------------|-------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|
| CK              | 6.45±0.11bc                   | 1.21±0.01d                             | 0.26±0.01a                              | 63.76±5.44a              |
| T <sub>0</sub>  | 6.17±0.42c                    | 1.98±0.03a                             | 0.24±0.00ab                             | 71.64±4.25a              |
| T <sub>1</sub>  | 6.62±0.31ab                   | 1.32±0.02cd                            | 0.21±0.01c                              | 65.12±4.76a              |
| T <sub>2</sub>  | 6.87±0.27a                    | 1.44±0.04c                             | 0.20±0.01c                              | 69.83±3.63a              |
| T <sub>3</sub>  | 6.41±0.15bc                   | 1.68±0.05b                             | 0.22±0.00bc                             | 62.93±6.82a              |
| T <sub>4</sub>  | 6.30±0.18bc                   | 0.97±0.03e                             | 0.22±0.01bc                             | 73.17±3.22a              |
| T <sub>5</sub>  | 6.07±0.23c                    | 1.48±0.05c                             | 0.25±0.02a                              | 64.54±4.99a              |

注:同列不同小写字母表示不同处理之间在 0.05 水平存在显著性差异( $P < 0.05$ )。下同。  
Note: Different normal letters within same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level ( $P < 0.05$ ). The same as below.

表 3 消毒、伴生和微生物菌剂处理连作基质养分含量在种植黄瓜后的变化

Table 3 The nutrient contents of continuous cropping substrates treated by disinfection, accompanying cultivation and microbial agent after planting cucumber

| 处理<br>Treatment | 全磷<br>Total P/<br>(g/kg) | 全钾<br>Total K/<br>(g/kg) | 速效氮<br>Available N/<br>(mg/kg) | 速效磷<br>Available P/<br>(mg/kg) | 速效钾<br>Available K/<br>(mg/kg) | 钙<br>Ca/<br>(mg/kg) | 铁<br>Fe/<br>(mg/kg) | 锰<br>Mn/<br>(mg/kg) |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| CK              | 3.93±0.31b               | 6.79±0.76b               | 251.19±5.68b                   | 332.04±16.67b                  | 753.40±19.89b                  | 80.97±6.67c         | 18.91±1.65b         | 3.57±0.78b          |
| T <sub>0</sub>  | 4.85±0.46a               | 10.14±0.59a              | 250.75±11.52b                  | 335.08±13.33b                  | 897.37±18.67a                  | 110.13±9.69b        | 46.46±5.43a         | 4.70±0.97ab         |
| T <sub>1</sub>  | 4.92±0.44a               | 10.00±0.82a              | 287.64±14.75a                  | 401.76±18.84a                  | 1 009.54±28.78a                | 135.07±8.54a        | 43.64±6.82a         | 4.65±0.56ab         |
| T <sub>2</sub>  | 4.69±0.25a               | 10.26±0.53a              | 227.85±13.22b                  | 299.78±17.65c                  | 721.74±21.48b                  | 130.81±6.21a        | 44.16±7.91a         | 4.67±0.62ab         |
| T <sub>3</sub>  | 5.14±0.39a               | 10.15±0.61a              | 186.72±8.63c                   | 249.06±8.79d                   | 661.42±23.39bc                 | 114.32±10.01b       | 47.39±9.89a         | 5.12±0.31a          |
| T <sub>4</sub>  | 4.84±0.35a               | 9.64±0.98a               | 160.37±7.59d                   | 220.57±7.99e                   | 579.84±32.89c                  | 113.96±7.75b        | 46.85±4.22a         | 5.13±0.63a          |
| T <sub>5</sub>  | 4.81±0.21a               | 10.01±0.45a              | 197.73±9.66c                   | 266.50±11.23d                  | 718.36±27.61b                  | 102.92±5.48b        | 43.92±8.79a         | 4.36±0.73b          |

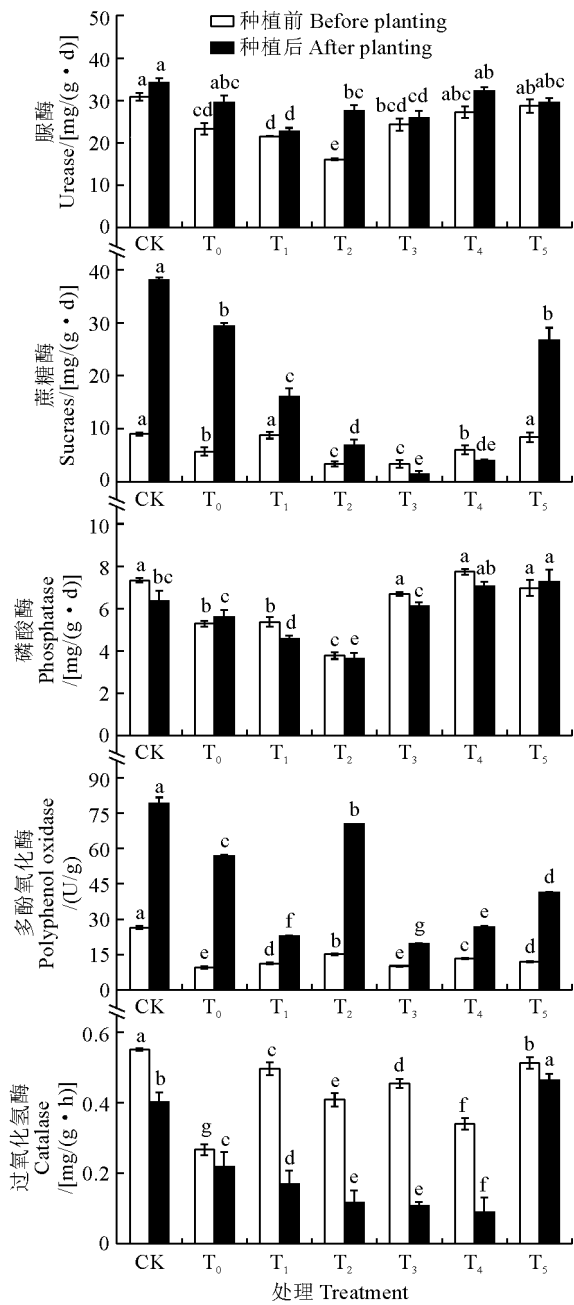
### 2.2 消毒、伴生和微生物菌对连作基质种植前后基质酶活性的影响

经过黄瓜种植后,各处理基质的过氧化氢酶活

同时,表 3 显示,在基质全磷和全钾含量上,T<sub>1</sub>~T<sub>5</sub> 处理均与 T<sub>0</sub> 没有显著差异,但均显著高于相应对照。而在速效养分方面,基质的速效氮、速效磷和速效钾含量在 T<sub>0</sub> 处理下均不同程度地高于 CK,但仅速效钾含量增幅显著,并均以 T<sub>1</sub> 处理最高,T<sub>4</sub> 处理最低;与 T<sub>0</sub> 相比,T<sub>1</sub> 的速效氮、速效磷、速效钾含量分别提高了 14.76%、19.91%和 12.48%,T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub> 的速效氮含量降低了 21.38%~36.25%,T<sub>2</sub>~T<sub>5</sub> 的速效磷和速效钾含量分别降低了 10.53%~34.12%和 19.61%~35.42%;同时,在基质钙、铁和锰含量方面,T<sub>0</sub> 均不同程度高于 CK,且钙、铁增幅显著;与 T<sub>0</sub> 相比,T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理钙含量分别显著提高了 22.65%和 18.78%,而 T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub> 处理钙含量以及各处理的铁、锰含量均没有显著变化,但各处理钙、铁含量以及 T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理的锰含量与相应 CK 相比均显著提高。

性和除 T<sub>5</sub>、T<sub>0</sub> 处理外的磷酸酶活性均不同程度下降,而各处理的脲酶和多酚氧化酶活性,以及除 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 处理外的蔗糖酶活性均总体呈上升趋势(图 1)。





同期不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。下同。

图 1 消毒、伴生和微生物菌处理连作基质酶活性在种植黄瓜前后的变化

The different normal letters within same stage indicate significant difference among treatments at 0.05 level ( $P < 0.05$ ). The same as below.

Fig. 1 The enzyme activities of continuous cropping substrates treated by disinfection, accompanying cultivation and microbial agent before and after planting cucumbers

其中,在基质脲酶活性上,黄瓜种植前表现为,T<sub>0</sub>比CK显著降低,T<sub>5</sub>处理比T<sub>0</sub>显著提高,T<sub>2</sub>处理比T<sub>0</sub>显著降低,而其余处理与T<sub>0</sub>没有显著差异;黄瓜

种植后,T<sub>0</sub>比CK稍低,T<sub>1</sub>处理比T<sub>0</sub>显著降低,其他处理与T<sub>0</sub>之间均无显著差异,且T<sub>4</sub>和T<sub>5</sub>处理与CK均没有显著差异。在基质磷酸酶活性上,黄瓜种植前的T<sub>0</sub>处理比CK显著降低,而与T<sub>0</sub>相比,T<sub>2</sub>处理显著降低,T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>显著提高了26.49%~46.36%,并与CK相近;种植后T<sub>0</sub>处理比CK稍低,与T<sub>0</sub>相比,T<sub>1</sub>和T<sub>2</sub>处理分别显著降低18.39%和35.51%,T<sub>4</sub>和T<sub>5</sub>分别显著提高了25.93%和29.55%。在基质蔗糖酶活性方面,黄瓜种植前的T<sub>0</sub>比CK显著降低,与T<sub>0</sub>相比,T<sub>1</sub>和T<sub>5</sub>处理显著提高,T<sub>2</sub>和T<sub>3</sub>处理显著降低;黄瓜种植后T<sub>0</sub>仍比CK显著降低,T<sub>1</sub>~T<sub>5</sub>处理均比T<sub>0</sub>降低,且除T<sub>5</sub>处理外均达显著水平,T<sub>1</sub>~T<sub>4</sub>降幅在45.25%~95.06%之间;CK的蔗糖酶活性在种植前后一直最高。在过氧化氢酶活性上,黄瓜种植前的各处理均比CK显著降低,但T<sub>1</sub>~T<sub>5</sub>处理均比T<sub>0</sub>显著提高,增幅在25.93%~89.91%之间;黄瓜种植后,T<sub>5</sub>比CK显著提高,其余处理均比CK显著降低,而T<sub>1</sub>~T<sub>4</sub>又均比T<sub>0</sub>显著降低,降幅在22.73%~59.10%之间,T<sub>5</sub>比T<sub>0</sub>显著提高了110.60%;各处理及对照种植后的过氧化氢酶活性均不同程度低于种植前。

另外,黄瓜种植前后各处理的多酚氧化酶活性均显著低于CK;与T<sub>0</sub>处理相比,种植前的T<sub>1</sub>~T<sub>5</sub>处理均不同程度提高且大多达到显著水平,种植后的T<sub>2</sub>处理显著提高了23.51%,而其余处理则显著降低了27.63%~65.49%。

### 2.3 消毒、伴生和微生物菌对连作基质种植后基质酚类物质的影响

表4显示,种植3茬后T<sub>0</sub>基质酚类物质含量均不同程度地高于CK,且除苯甲酸含量外均达到显著水平。其中,消毒、伴生和微生物菌处理基质总酚含量和复合态酚含量均比T<sub>0</sub>不同程度降低,且T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>5</sub>处理总酚含量和T<sub>2</sub>处理复合态酚含量显著降低,降幅分别为16.37%、19.27%、9.87%和21.15%,但各处理总酚含量均显著高于CK,而它们的复合态酚含量与CK相比均差异不显著。T<sub>3</sub>处理的水溶性酚含量比T<sub>0</sub>显著提高90.99%,其余处理均比T<sub>0</sub>不同程度降低,T<sub>1</sub>和T<sub>4</sub>处理达到显著水平,降幅分别为33.28%和54.89%。同时,T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>和T<sub>5</sub>处理的对羟基苯甲酸含量和T<sub>3</sub>和T<sub>5</sub>处理的苯甲酸含量均比T<sub>0</sub>提高,其余处理均比T<sub>0</sub>降低,且T<sub>5</sub>和T<sub>4</sub>处理的升降幅度均达到显著水平,T<sub>4</sub>的对羟基苯甲酸和苯甲酸含量降幅分别达到78.54%和86.21%,T<sub>5</sub>处理的增幅分别达到23.76%和37.93%。另外,与T<sub>0</sub>相比,各处理的

香草醛和阿魏酸含量皆不同程度下降,但仅 T<sub>1</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理降幅达到显著水平,两者的香草醛含量分别降低了 31.14%和 56.29%,香草醛含量分别降低了 30.30%和 54.55%,其余处理间差异不显著。

表 4 消毒、伴生和微生物菌处理连作基质酚类物质含量在种植黄瓜后的变化  
Table 4 The phenols content of continuous cropping substrates treated by disinfection, accompanying cultivation and microbial agent after planting cucumber

| 处理<br>Treatment | 总酚含量<br>Total phenolic content<br>(μg/g) | 复合态酚含量<br>Complex phenolic content/(μg/g) | 水溶性酚含量<br>Water-soluble phenolic content<br>(μg/g) | 对羟基苯甲酸含量<br>P-hydroxy benzoic acid content/(μg/kg) | 香草醛含量<br>Vanillin content<br>(μg/kg) | 阿魏酸含量<br>Ferulic acid content<br>(μg/kg) | 苯甲酸含量<br>Benzoic acid content<br>(μg/kg) |
|-----------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| CK              | 103.99±7.91d                             | 25.74±4.43bc                              | 10.42±0.92cd                                       | 2.33±0.04c                                         | 3.26±0.05cd                          | 0.71±0.01b                               | 0.22±0.01cd                              |
| T <sub>0</sub>  | 158.02±11.13a                            | 30.12±3.33a                               | 13.10±0.87b                                        | 3.12±0.11b                                         | 5.17±0.12a                           | 0.99±0.02a                               | 0.29±0.00bc                              |
| T <sub>1</sub>  | 144.83±13.54ab                           | 28.82±2.78ab                              | 8.74±0.99d                                         | 2.47±0.08c                                         | 3.56±0.08bc                          | 0.69±0.02b                               | 0.20±0.00d                               |
| T <sub>2</sub>  | 132.16±14.67bc                           | 23.75±3.74c                               | 11.87±1.01bc                                       | 3.51±0.08ab                                        | 4.64±0.09ab                          | 0.84±0.03ab                              | 0.22±0.00cd                              |
| T <sub>3</sub>  | 144.93±13.33ab                           | 26.58±2.25abc                             | 25.02±1.79a                                        | 3.41±0.09ab                                        | 4.95±0.40a                           | 0.90±0.01a                               | 0.35±0.01ab                              |
| T <sub>4</sub>  | 127.58±15.56c                            | 27.54±2.14ab                              | 5.91±0.28e                                         | 0.67±0.02d                                         | 2.26±0.06d                           | 0.45±0.00c                               | 0.04±0.00e                               |
| T <sub>5</sub>  | 142.42±14.56b                            | 28.91±1.99ab                              | 11.19±0.83bc                                       | 3.86±0.07a                                         | 4.59±0.09ab                          | 0.82±0.01ab                              | 0.40±0.01a                               |

2.4 消毒、伴生和微生物菌剂对连作基质栽培黄瓜生理指标的影响

2.4.1 根系活力和叶片 SPAD 黄瓜结果期的根系活力在 T<sub>0</sub> 处理下比 CK 显著大幅度降低,消毒、伴生和微生物菌剂处理均比 T<sub>0</sub> 显著提高, T<sub>1</sub>~T<sub>5</sub> 处理的根系活力增幅在 14.63%(T<sub>3</sub>)~146.34%(T<sub>5</sub>)之间,其中的 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>5</sub> 的根系活力又显著高于 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>(图 2)。

同时,黄瓜结果期的叶片 SPAD 也在 T<sub>0</sub> 处理下比 CK 显著降低,消毒、伴生和微生物菌剂处理均比 T<sub>0</sub> 提高,且 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub> 和 T<sub>5</sub> 处理的 SPAD 分别比 T<sub>0</sub> 显著增加了 16.19%、27.90%、29.29%和 22.74%,而 T<sub>3</sub> 与 T<sub>0</sub> 没有明显差异(图 2)。以上结果说明所有消毒、伴生和微生物菌剂处理黄瓜根系活力均未恢复到新基质栽培水平,而其 SPAD 除 T<sub>3</sub> 处理外均接近新基质栽培水平。

2.4.2 叶片光合气体交换参数 图 3 显示,黄瓜结果期叶片的净光合速率(P<sub>n</sub>)在 T<sub>0</sub> 处理下均比 CK 显著降低,而在消毒、伴生和微生物菌剂处理下均比 T<sub>0</sub> 不同程度提高,且各处理的蒸腾速率(T<sub>r</sub>)、气孔导度(G<sub>s</sub>)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(C<sub>i</sub>)及 T<sub>2</sub>、T<sub>5</sub> 处理的 P<sub>n</sub> 增幅均达到显著水平,各处理的光合气体交换参数大多接近或者超过对照水平,并多以 T<sub>5</sub> 处理最高。其中黄瓜结果期叶片的 P<sub>n</sub>、T<sub>r</sub>、G<sub>s</sub>、C<sub>i</sub> 在 T<sub>5</sub> 处理下比 T<sub>0</sub> 分别显著提高了 190.75%、300.00%、150.00%和 67.02%。

2.5 消毒、伴生和微生物菌剂对连作基质栽培黄瓜生长的影响

如表 5 所示,消毒、伴生和微生物菌剂处理连作基质栽培黄瓜的茎粗与 CK、T<sub>0</sub> 均无显著差异,各处理的其余生长指标在 T<sub>0</sub> 处理下均比 CK 显著降低,在消毒、伴生和微生物菌剂处理下均比 T<sub>0</sub> 处理不同程度提高。其中,株高和地上鲜重在 T<sub>1</sub>~T<sub>5</sub> 处理下均比 T<sub>0</sub> 显著提高,增幅分别为 6.91%~26.53%和 14.19%~35.02%,且 T<sub>2</sub> 处理株高以及 T<sub>1</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>5</sub> 处理的地上鲜重已接近相应 CK 水平;地上干重在 T<sub>4</sub> 和 T<sub>5</sub> 处理下显著高于 T<sub>0</sub>,且各处理与 CK 均无显著差异;地下鲜重在 T<sub>1</sub> 和 T<sub>5</sub> 处理下比

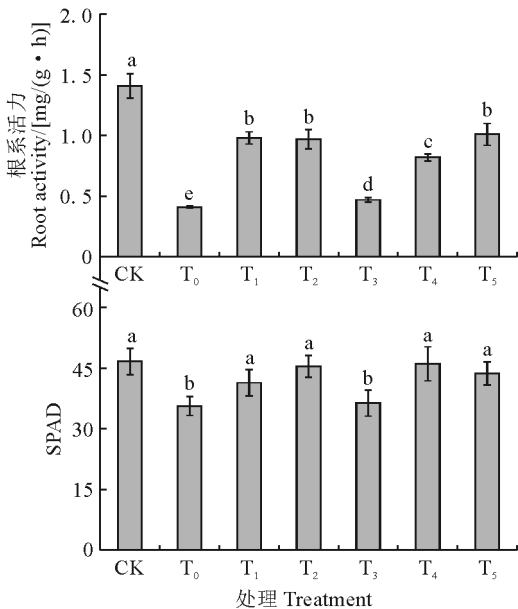


图 2 消毒、伴生和微生物菌处理连作基质上栽培黄瓜结果期根系活力和 SPAD 的变化  
Fig.2 The root activity and SPAD of cucumber at fruiting stage under continuous cropping cultivation substrates treated by disinfection, accompanying cultivation and microbial agent

T<sub>0</sub> 分别显著提高 12.00% 和 21.79%，但各处理均比 CK 显著降低；地下干重仅在 T<sub>5</sub> 处理下比 T<sub>0</sub> 显著提高了 27.50%，并接近 CK 水平，但 T<sub>1</sub>~T<sub>5</sub> 各处理之间没有显著差异。

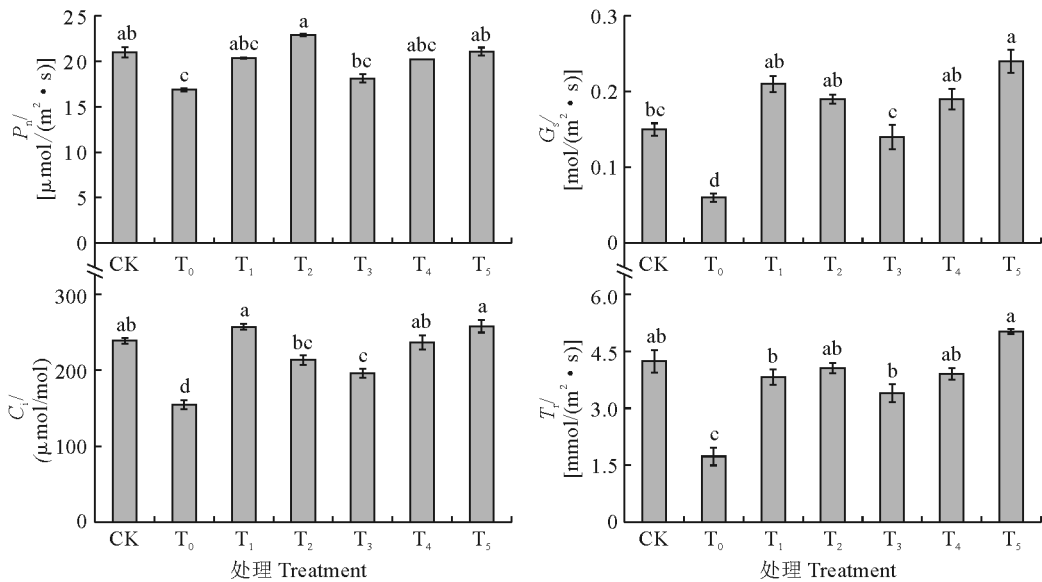


图 3 消毒、伴生和微生物菌处理连作基质上栽培黄瓜结果期光合参数的变化  
Fig. 3 The photosynthetic parameters of cucumber at fruiting stage under continuous cropping cultivation substrates treated by disinfection, accompanying cultivation and microbial agent

表 5 消毒、伴生和微生物菌处理连作基质上栽培黄瓜结果期生长的变化

Table 5 The growth indices of cucumber at fruiting stage under continuous cropping cultivation substrates treated by disinfection, accompanying cultivation and microbial agent

| 处理<br>Treatment | 株高<br>Plant height<br>/cm | 茎粗<br>Stem diameter<br>/mm | 地上鲜重<br>Shoot fresh<br>weight/g | 地上干重<br>Shoot dry<br>weight/g | 地下鲜重<br>Root fresh<br>weight/g | 地下干重<br>Root dry<br>weight/g |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| CK              | 165.73±6.34a              | 6.54±0.92a                 | 120.10±8.79a                    | 8.26±0.74a                    | 15.51±1.08a                    | 1.09±0.10a                   |
| T <sub>0</sub>  | 121.63±5.67d              | 6.43±0.56a                 | 88.73±5.67d                     | 6.30±0.27b                    | 10.42±0.99d                    | 0.80±0.15c                   |
| T <sub>1</sub>  | 153.87±6.67b              | 6.81±0.62a                 | 119.80±7.69a                    | 7.57±0.42ab                   | 11.67±0.84c                    | 0.84±0.18bc                  |
| T <sub>2</sub>  | 160.13±4.78ab             | 6.82±0.99a                 | 112.88±6.33b                    | 7.81±0.63ab                   | 10.66±0.67d                    | 0.84±0.17bc                  |
| T <sub>3</sub>  | 130.03±5.54c              | 6.92±0.76a                 | 101.32±4.56c                    | 7.21±0.52ab                   | 10.73±1.44d                    | 0.86±0.26bc                  |
| T <sub>4</sub>  | 132.63±4.98c              | 7.00±0.90a                 | 117.77±5.54a                    | 7.69±0.34a                    | 10.56±1.23d                    | 0.83±0.11bc                  |
| T <sub>5</sub>  | 153.90±7.78b              | 6.56±0.88a                 | 116.78±9.11ab                   | 8.09±0.41a                    | 12.69±1.02b                    | 1.02±0.38ab                  |

2.6 消毒、伴生和微生物菌剂对连作基质栽培黄瓜果实品质和产量的影响

在黄瓜果实品质方面(表 6),可溶性糖含量和维生素 C 含量在消毒、伴生、微生物菌剂、连作处理及 CK 之间均没有显著差异,可溶性蛋白含量在各处理下也与 CK 无显著差异,但 T<sub>5</sub> 处理显著高于 T<sub>1</sub> 处理;可溶性固形物含量在 T<sub>0</sub> 处理下比 CK 显著降低,在消毒、微生物菌剂处理下均比 T<sub>0</sub> 显著提高,增幅在 5.59%(T<sub>1</sub>)~12.73%(T<sub>5</sub>)之间,而伴生处理与 T<sub>0</sub> 相比无显著变化,但各处理均比 CK 显著降低;可滴定酸含量在 T<sub>0</sub> 处理下比 CK 显著提高,在消毒、伴生、微生物菌剂处理下均比 T<sub>0</sub> 不同程度

降低,且 T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub> 和 T<sub>5</sub> 分别显著下降了 32.86%、18.57%和 15.71%,但各处理均不同程度高于 CK。总体而言,T<sub>2</sub> 处理的果实品质指标最接近新基质(CK)栽培的果实。

同时,在黄瓜果实产量方面(图 4),所有消毒、伴生、微生物菌剂处理的单果重和单株产量均比 T<sub>0</sub> 处理不同程度提高,且 T<sub>2</sub> 处理的单果重和各处理的单株产量增幅均达到显著水平,但各处理单果重和单株产量均未恢复到新基质(CK)栽培的正常水平。其中,T<sub>2</sub> 处理单果重比 T<sub>0</sub> 显著增加 4.76%,各处理单株产量比 T<sub>0</sub> 显著提高了 3.68%(T<sub>4</sub>)~18.40%(T<sub>5</sub>)。

表 6 消毒、伴生和微生物菌处理连作基质上栽培黄瓜果实品质

Table 6 The fruit quality of cucumber under continuous cropping cultivation substrates treated by disinfection, accompanying cultivation and microbial agent

| 处理<br>Treatment | 可溶性糖<br>Soluble sugar/% | 可溶性固形物<br>Soluble solid/% | 可溶性蛋白<br>Soluble protein/(mg/g) | 可滴定酸<br>Titratable acid/% | 维生素 C<br>Vitamin C/(μg/g) |
|-----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| CK              | 1.08±0.01a              | 3.79±0.31a                | 1.12±0.06ab                     | 0.40±0.01d                | 22.45±0.99a               |
| T <sub>0</sub>  | 0.86±0.04a              | 3.22±0.22d                | 1.12±0.02ab                     | 0.70±0.01a                | 18.49±1.35a               |
| T <sub>1</sub>  | 1.34±0.05a              | 3.40±0.36c                | 1.08±0.02b                      | 0.61±0.00ab               | 20.14±1.54a               |
| T <sub>2</sub>  | 1.11±0.02a              | 3.63±0.32b                | 1.12±0.04ab                     | 0.47±0.01cd               | 21.73±1.67a               |
| T <sub>3</sub>  | 0.90±0.00a              | 3.49±0.28c                | 1.12±0.05ab                     | 0.64±0.00ab               | 19.90±1.83a               |
| T <sub>4</sub>  | 1.02±0.03a              | 3.20±0.49d                | 1.09±0.03b                      | 0.57±0.00bc               | 21.57±2.11a               |
| T <sub>5</sub>  | 1.09±0.01a              | 3.42±0.42c                | 1.15±0.01a                      | 0.59±0.01b                | 20.92±1.48a               |

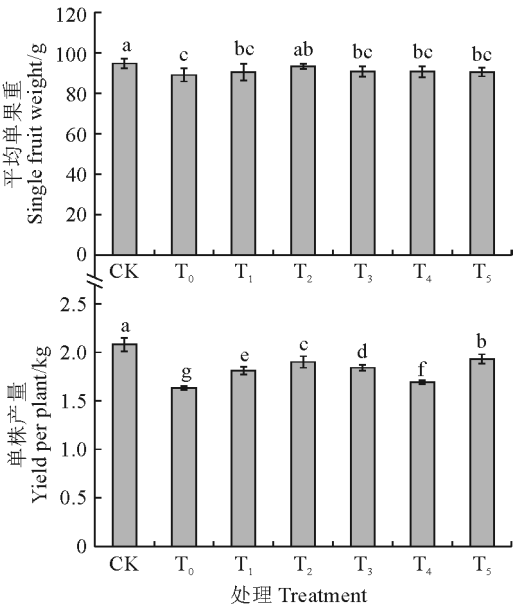


图 4 消毒、伴生和微生物菌处理连作基质上栽培黄瓜果实产量的变化

Fig. 4 The yield of cucumber fruit under continuous cropping cultivation substrates treated by disinfection, accompanying cultivation and microbial agent

3 讨 论

连作障碍是指同一植物在同一块土地上持续种植两茬或多茬以后,即使在正常管理的情况下,也会发生作物生长水平下降的现象<sup>[14]</sup>。而同一批基质连续种植作物多次则使该基质成为了连作基质。连作可能会引起基质性质改变、植物化感作用、微生物区系的改变等<sup>[15]</sup>。要缓解连作基质对作物的影响,则要对症下药,采取较为经济、科学且实用的消毒方式。研究表明物理消毒在土壤消毒中因其成本低且操作简单而使用较为广泛,尤其是热水消毒可以提高基质 pH,降低电导率,可使作物增产 30%<sup>[16]</sup>。这一研究结果与本试验所得结果相一致,太阳能消

毒方式和热水消毒方式能够提高连作基质的 pH,并且热水消毒基质增加了连作基质栽培产量,与新基质栽培获得的产量无显著差异。本试验中太阳能消毒基质的速效养分含量最高,这与胡杰等<sup>[17]</sup>研究结果相一致。而太阳能消毒(T<sub>1</sub>)和热水消毒(T<sub>2</sub>)处理的根系活力显著高于连作基质(T<sub>0</sub>),可能是因为基质消毒后有害微生物数量大量减少,盐分也被稀释,根系生长环境优于连作基质。多菌灵消毒(T<sub>3</sub>)基质也消除了基质中部分微生物,微生物菌剂(T<sub>5</sub>)则是往连作基质中加入大量促生与拮抗菌,使连作基质的微生物群落结构向有利于植物生长的方向进行<sup>[18]</sup>。因此本试验中 T<sub>3</sub> 和 T<sub>5</sub> 处理的黄瓜株高、地上部干鲜重以及果实产量均显著高于 T<sub>0</sub> 处理,而大蒜伴生栽培(T<sub>4</sub>)植株的生长势与其他处理相比差异不大,但其果实产量却是除 T<sub>0</sub> 外最低的。这与李志萌等<sup>[19]</sup>的结论一致,大葱伴生栽培处理的植株长势和对根结线虫病害的防控效果是各项处理中最好的,但其产量却不是最高的。进一步分析可知,大蒜伴生栽培是 2 种作物栽培,其他处理都是单作,大蒜与黄瓜可能存在养分竞争关系,并且种植结束后 T<sub>4</sub> 的速效养分含量皆是最低的,说明有一部分养分是被大蒜吸收,因此导致伴生栽培处理黄瓜产量低于其他处理。

基质酶活性是评价基质性状的重要指标。蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶均参与了土壤的生物化学反应<sup>[20]</sup>。磷酸酶可提高土壤中速效磷的含量<sup>[21]</sup>。但本试验基质中磷酸酶活性与速效磷含量不是成正比的关系,如 T<sub>5</sub> 处理基质的磷酸酶活性最高,而其速效磷含量却较低。具体分析可知,磷酸酶活性还受到基质酸碱度影响,基质酸碱度不平衡时也会影响磷酸酶化学活性,从而降低速效磷含量<sup>[22]</sup>。而 T<sub>5</sub> 处理基质的酶活高是因为人为添加了微生物菌。



蔗糖酶直接参与有机物质的代谢过程,其活性大小与土壤肥力呈正相关,而在本试验中,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 的蔗糖酶活性较低,但其养分含量表现则与之相反。这可能是因为物理消毒时环境温度高达 60 ℃,破坏了相关酶的活性;而养分含量的变化可能是因为物理消毒加速了有机质的分解。过氧化氢酶能减轻基质中过氧化氢对植物的毒害<sup>[23]</sup>。T<sub>5</sub> 处理因施入微生物菌剂提高了过氧化氢酶活性,从而减轻过氧化氢对植物的毒害使黄瓜生长指标和光合作用指标高于连作基质种植。

酚酸类化合物是一类具有化感作用的物质,通过植物残体分解和根系分泌等途径进入土壤,导致植物连作障碍、发生自毒作用。鉴于前人用 GC-MS 法鉴定出黄瓜根系分泌物中的主要化感物质<sup>[24]</sup> 有苯甲酸、对羟基苯甲酸、香草酸和阿魏酸等苯甲酸的衍生物,本试验除了测定总酚含量外,也测定了这些酚酸物质的含量。黄瓜连作多茬会导致基质中总酚和复合态酚积累<sup>[25]</sup>,本试验也证实了这一点,T<sub>0</sub> 处理在连续种植多茬后基质总酚含量与复合态酚含量高于其他处理。酚酸类自毒物质对根系生长来说较为敏感,能明显抑制根系的伸长和分布,影响植株生长<sup>[26]</sup>。本试验中连作基质 T<sub>0</sub> 种植后的酚酸类含量最高,其黄瓜地下部鲜重、干重值都较低,光合作用也较差。T<sub>4</sub> 处理基质的 4 个酚酸类组分含量皆为

最低,因此其根系活力值高于 T<sub>0</sub>。有研究表明,对羟基苯甲酸对黄瓜的鲜重、株高、茎粗和叶面积均有一定的抑制作用,并随着处理浓度的增加抑制作用逐渐增强<sup>[26]</sup>。在本试验中,T<sub>5</sub> 处理基质的对羟基苯甲酸含量最高,其黄瓜株高、茎粗和 SPAD 值均低于对羟基苯甲酸含量值最低的 T<sub>1</sub> 处理。有研究初步表明酚酸类物质中的阿魏酸和香草醛能阻碍光合速率,改变渗透压,关闭气孔,从而改变根系功能,抑制生物量积累<sup>[27]</sup>。本试验中,T<sub>0</sub> 处理基质的香草醛和阿魏酸含量都很高,T<sub>0</sub> 处理植株的 C<sub>i</sub> 和 G<sub>s</sub> 最低,其 T<sub>r</sub> 和 P<sub>n</sub> 也皆受到抑制,其光合作用效率最差。进一步分析可知,栽培基质的微生物数量和活性与根系化感物质是密切相关<sup>[28]</sup>。T<sub>0</sub> 处理是连作基质,种植过一茬番茄后连续种植两茬黄瓜,其基质本身的微生物环境已失衡,根系分泌物大量积累,因此 T<sub>0</sub> 处理黄瓜植株的生长发育皆受到影响。

综合各项指标表现来看,本研究中,3 种消毒方式、伴生栽培和施入微生物菌处理均可以促进连作基质栽培黄瓜的生长、增强根系活力、加强光合作用并且提高产量,同时降低连作基质中积累的总酚含量,提高基质中相关酶活性,尤其是热水消毒和施入微生物菌处理表现较好。因此,本研究认为热水消毒连作基质和向连作基质中施入微生物菌的措施可在生产上推广使用。

参考文献:

[1] 李瑞杰. 无土栽培技术创新发展研究进展[J]. 南方农机, 2021, **52**(17): 50-52.  
LI R J. Research progress on innovation and development of soilless culture technology[J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2021, **52**(17): 50-52.  
[2] 徐云焕, 张豫超, 杨肖芳, 等. 基质不同处理方式对草莓生长及产量品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, **28**(11): 1 890-1 894.  
XU Y H, ZHANG Y C, YANG X F, *et al.* Effects of different substrate treatments on strawberry growth and fruit quality in stereoscopic cultivation systems[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, **28**(11): 1 890-1 894.  
[3] 周雪青, 张晓文, 邹 岚, 等. 基质微波消毒设备设计[J]. 农业工程, 2016, **6**(5): 100-104.  
ZHOU X Q, ZHANG X W, ZOU L, *et al.* Design on substrate microwave disinfection machine[J]. *Agricultural Engineering*, 2016, **6**(5): 100-104.  
[4] 闫思华, 王慧茹, 李建设, 等. 不同药剂处理对番茄连作培养基质微生物群落的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 273-282.  
YAN S H, WANG H R, LI J S, *et al.* Effects of different pharmaceutical treatments on microbial community of tomato

continuous culture substrate[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4): 273-282.  
[5] 陈 昱, 张福建, 杨有新, 等. 伴生芹菜和紫背天葵对连作豇豆生长发育及根际土壤环境的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(5): 1 406-1 414.  
CHEN Y, ZHANG F J, YANG Y X, *et al.* Effect of celery and *Gynura bicolor* as companion crops on growth and development of cowpea as continuous crop and soil rhizosphere[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, **24**(5): 1 406-1 414.  
[6] 张文泽. 丛枝菌根真菌促进连作基质中作物生长的效应及其作用机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.  
[7] 卜崇兴. NAU-G1 型南方网纹甜瓜无土栽培新系统及其技术基础的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2001.  
[8] 郭世荣, 孙 锦. 无土栽培学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2018.  
[9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
[10] ZHOU X, YU G, WU F. Soil phenolics in a continuously monocropped cucumber (*Cucumis sativus* L.) system and their effects on cucumber seedling growth and soil microbial communities[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, **63**(3): 332-340.  
[11] 谭秀梅, 王华田, 孔令刚, 等. 杨树人工林连作土壤中酚酸积累规律及对土壤微生物的影响[J]. 山东大学学报(理学

- 版), 2008, **43**(1): 14-19.
- TAN X M, WANG H T, KONG L G, *et al.* Accumulation of phenolic acids in soil of a continuous cropping poplar plantation and their effects on soil microbes[J]. *Journal of Shandong University (Natural Science)*, 2008, **43**(1): 14-19.
- [12] 关松荫, 等. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [13] 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*, 2021, **43**(3): 537-546.
- [14] 吴凤芝, 赵凤艳, 刘元英. 设施蔬菜连作障碍原因分析与防治措施[J]. 东北农业大学学报, 2000, **31**(3): 241-247.
- WU F Z, ZHAO F Y, LIU Y Y. On the reasons of continuous cropping obstacles in vegetable facility gardening[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2000, **31**(3): 241-247.
- [15] 张浩然, 杨 宁, 温 丹, 等. 土壤消毒技术在设施蔬菜生产中的研究进展[J]. 山东农业科学, 2020, **52**(5): 149-156.
- ZHANG H R, YANG N, WEN D, *et al.* Research progress of application of soil disinfection technology in production of protected vegetables[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, **52**(5): 149-156.
- [16] 张彩虹, 姜鲁艳, 邹 平, 等. 基质高温消毒对戈壁日光温室辣椒根际微生物的影响[J]. 农业工程技术, 2020, **40**(10): 56-59.
- ZHANG C H, JIANG L Y, ZOU P, *et al.* Effect of high temperature disinfection of substrate on rhizosphere microorganism of pepper in Gobi solar greenhouse[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2020, **40**(10): 56-59.
- [17] 胡 杰, 陈昭斌. 太阳光消毒作用研究进展[J]. 中国消毒学杂志, 2020, **37**(2): 148-152.
- HU J, CHEN Z B. Research progress of sunlight disinfection[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2020, **37**(2): 148-152.
- [18] 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): 1 452-1 462.
- FU F Y, XIANG L, XU S Z, *et al.* Effects of carbendazim and bio-organic fertilizer on *Malus hupehensis* seedlings and soil under replant condition[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, **43**(8): 1 452-1 462.
- [19] 李志萌, 崔丽朋, 田朝辉, 等. 5 种不同处理对温室黄瓜植株农艺性状、产量及根结线虫病害防控的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2021(2): 70-72.
- LI Z M, CUI L P, TIAN Z H, *et al.* Effects of five different treatments on agronomic traits, yield and root knot nematode disease prevention and control of cucumber in greenhouse[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2021(2): 70-72.
- [20] 曲成闯, 陈效民, 张志龙, 等. 施用生物有机肥对黄瓜连作土壤有机碳库和酶活性的持续影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(9): 3 147-3 154.
- QU C C, CHEN X M, ZHANG Z L, *et al.* Long-term effects of bio-organic fertilizer application on soil organic carbon pool and enzyme activity of cucumber continuous cropping[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(9): 3 147-3 154.
- [21] 贺文员, 宋清晖, 杨尚霖, 等. 生物有机肥对水稻土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 中国农学通报, 2019, **35**(27): 106-113.
- HE W Y, SONG Q H, YANG S L, *et al.* Biological fertilizer: Effects on enzyme activity and microbial community structure in rice soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, **35**(27): 106-113.
- [22] 张 博. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响[J]. 农家参谋, 2019(23): 67.
- ZHANG B. Effects of rice straw returning on soil phosphatase activity and available phosphorus content [J]. *The Farmers Consultant*, 2019(23): 67.
- [23] 高晶霞, 高 昱, 吴雪梅, 等. 辣椒连作土壤微生物群落及土壤离子对微生物菌剂的响应[J]. 西南农业学报, 2020, **33**(8): 1 659-1 664.
- GAO J X, GAO Y, WU X M, *et al.* Response of soil microbial community and soil ions to microbial agents in pepper continuous cropping[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, **33**(8): 1 659-1 664.
- [24] 胡元森, 李翠香, 杜国营, 等. 黄瓜根分泌物中化感物质的鉴定及其化感效应[J]. 生态环境, 2007, **16**(3): 954-957.
- HU Y S, LI C X, DU G Y, *et al.* Identification of allelochemicals in cucumber root exudates and its allelopathy to radicle and *Fusarium oxysporum*[J]. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(3): 954-957.
- [25] 余朝阁, 吕亭辉, 解智慧, 等. 人工营养基质对黄瓜连作土壤酸化和酚类物质积累的影响[J]. 河南农业科学, 2020, **49**(6): 115-119.
- YU C G, LÜ T H, XIE Z H, *et al.* Effects of artificial nutrient substrate on acidification and accumulation of phenols in continuous cropping cucumber soil[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, **49**(6): 115-119.
- [26] 李 菊, 李玉梅, 苟亚妮, 等. 酚酸类物质代谢及其化感效应研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2019(8): 175-182.
- LI J, LI Y M, GOU Y N, *et al.* Research progress in phenolic acid metabolism and allelopathic effect [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2019(8): 175-182.
- [27] 刘晓丽, 赵 娜, 贾钰莹, 等. 酚酸类物质在植物-土壤-环境中的作用[J]. 园艺与种苗, 2020, **40**(8): 56-58, 63.
- LIU X L, ZHAO N, JIA Y Y, *et al.* The role of phenolic acids in plant-soil-environment[J]. *Horticulture and Seed*, 2020, **40**(8): 56-58, 63.
- [28] 马云华, 王秀峰, 魏 珉, 等. 黄瓜连作土壤酚酸类物质积累对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(11): 2 149-2 153.
- MA Y H, WANG X F, WEI M, *et al.* Accumulation of phenolic acids in continuously cropped cucumber soil and their effects on soil microbes and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(11): 2 149-2 153.