

棘孢木霉对向日葵幼苗抗氧化酶活性及菌核病防效的影响

马光恕¹, 姜 博¹, 廉 华¹, 陈玉蓉¹,
赵振涵¹, 李 梅², 李润哲¹, 张 婷¹

(1. 黑龙江八一农垦大学园艺园林学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100081)

摘 要: 试验于 2021 年 5—8 月, 采用筛选出的对向日葵菌核病菌有较好拮抗作用的棘孢木霉 *Trichoderma asperellum* 581, 通过盆栽试验, 测定不同施用浓度对向日葵幼苗生长、抗氧化酶活性以及对向日葵菌核病防效的影响。结果显示: *T. asperellum* 581 不同施用浓度均能提高对向日葵菌核病的防效, 以 T3 (即木霉菌处理浓度为 1×10^5 个 $\cdot$ mL^{-1}) 应用效果最好, 对向日葵菌核病的防效达到 98.77%。与 CK1 (即只利用向日葵菌核病菌灌根且不施用木霉悬浮液) 相比, *T. asperellum* 581 不同施用浓度均能提高向日葵幼苗株高、茎粗、全株鲜质量和根冠比, 以 T3 处理对向日葵幼苗形态建成和物质积累的促进效果最好, 株高、茎粗、全株鲜质量、全株干质量、根冠比和壮苗指数分别比 CK1 提高 64.71%、193.55%、99.15%、188.24%、50.00%、416.67%; *T. asperellum* 581 不同施用浓度均能提高向日葵幼苗叶片中过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD)、苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、多酚氧化酶 (PPO) 活性, 以 T3 处理对向日葵幼苗抗氧化酶促进效果最好, 在播种后 35 d, 向日葵幼苗叶片中 POD、CAT、SOD、PAL、APX 和 PPO 活性分别比 CK1 提高了 64.35%、35.62%、59.14%、50.02%、43.39%、41.16%。研究表明 *T. asperellum* 581 通过提高向日葵幼苗抗氧化酶活性促进了幼苗形态建成和物质积累, 提高了对向日葵菌核病的防治效果。

关键词: 棘孢木霉; 向日葵; 菌核病; 抗氧化酶活性; 防治效果

中图分类号: S435.655 **文献标志码:** A

Effects of *Trichoderma asperellum* on antioxidant enzyme activity of sunflower seedlings and control of *Sclerotinia sclerotiorum*

MA Guangshu¹, JIANG Bo¹, LIAN Hua¹, CHEN Yurong¹,
ZHAO Zhenhan¹, LI Mei², LI Runzhe¹, ZHANG Ting¹

(1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 2. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: *Trichoderma asperellum* 581 with good control effect against sunflower *Sclerotinia sclerotiorum* was selected, and the effects of different strains application concentrations on the seedling growth, antioxidant enzyme activity and control effects against *Sclerotinia sclerotiorum* of sunflower through pot culture were evaluated from May to August 2021. The results showed that application concentrations of *T. asperellum* 581 effectively improved the control effect of *Sclerotinia sclerotiorum* of sunflower, and T3 of *T. asperellum* 581 (1×10^5 spores $\cdot$ mL^{-1} of *Trichoderma asperellum* application concentration) was the most effective, with disease control efficacy of 98.77%. Different application concentrations of *T. asperellum* 581 all improved the plant height, stem diameter, whole plant fresh weight and root shoot ratio of sunflower seedlings compared with CK1 (only using sunflower *Sclerotinia sclerotiorum* to irrigate roots without *Trichoderma* suspension). Of which the T3 treatment of *T. asperellum* 581 had the best promoting effect on the morphogenesis and material accumulation of sunflower seedlings. Compared with CK1, plant

height, stem diameter, whole plant fresh weight, whole plant dry weight, root shoot ratio and strong seedling index of sunflower seedlings increased by 64.71%、193.55%、99.15%、188.24%、50.00% and 416.67% respectively. Different application concentrations of *T. asperellum* 581 all increased the activity of peroxidase (POD), catalase (CAT), superoxide dismutase(SOD), phenylalanine ammonialyase(PAL), ascorbate peroxidase(APX) and polyphenol oxidase(PPO)in the leaves of sunflower seedlings. Of which the T3 treatment of *T. asperellum* 581 had the best effect on promoting the antioxidant enzyme activity of sunflower seedlings. Compared with CK1, the activity of POD, CAT, SOD, PAL, APX and PPO in the leaves of sunflower seedlings increased by 64.35%, 35.62%, 59.14%, 50.02%, 43.39% and 41.16% respectively at 35 days after sowing. The results showed that *T. asperellum* 581 in this study increased the antioxidant enzyme activity, promoted the morphogenesis and material accumulation of sunflower seedlings and improved the control effect of sunflower *Sclerotinia sclerotiorum*.

Keywords: *Trichoderma asperellum*; sunflower; *Sclerotinia sclerotiorum*;antioxidant enzyme activity; control efficacy

向日葵 (*Helianthus annuus* L.) 是一种草本植物,属菊科 (Asteraceae)向日葵属 (*Helianthus*),其原产美国,在明代中期引入国内,是世界四大油料作物之一^[1-2]。2019 年,全国向日葵种植面积达 85.00 万 hm²,总产能为 242.00 万 t,单产为 2 847.06 kg · hm⁻²^[3],主要分布在中国西北、华北、东北的轻盐碱类地区及半干旱地区^[4]。

向日葵菌核病是一种世界性普遍发生的土传病害,又称烂盘病、白腐病,其病原菌为病原真菌核盘菌 (*Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary),核盘菌的寄主范围十分广泛,危害极严重^[5]。随着国内种植向日葵面积的不断增加,菌核病对向日葵生产的危害也日益加剧。在中国东北、内蒙古等产区,因菌核病造成向日葵地块平均发病率达到 40% ~ 60%,最高可达到 90%以上^[6],严重影响着向日葵产量和品质。

目前,对向日葵菌核病的防治主要采用农业防治、选育抗病品种、化学防治和生物防治等措施,但是农业防治和筛选抗病品种周期长,耗时耗力^[7];化学防治虽然效果显著,但常伴随病菌抗药性增强和农药残留、食品安全和环境污染等问题^[8]。利用生物防治是当前非常提倡的一项措施^[9],木霉 (*Trichoderma* spp.) 是目前研究和应用最为广泛的生防真菌类型之一。国内已有报导对核盘菌有效的生防菌类包括盾壳霉 (*Coniothyrium minitans*)、蠕形青霉 (*Penicillium vermiculatum*)、蕈孢霉 (*Sporidesmium sclerotivorum*)、绿色木霉 (*Trichoderma viride*)、链孢粘帚霉 (*Gliocladium catenulatum*)、红蛋巢菌 (*Nidula candida*) 等类型^[10]。欧洲已有两种盾壳霉商品制剂成功应用于生产实际^[11]。食菌核蕈孢霉 (*Sporidesmium sclerotivorum*) 是土壤中一种专门寄生于多种核盘菌菌核上的重寄生菌,作为一种有潜力的菌核病生防菌,对各类作物菌核病的防治具有重要意

义^[12];红蛋巢菌是中国农业大学首次筛选出的对核盘菌有较强拮抗作用的生防菌,对油菜菌核病表现出较好的防治效果^[13]。曹翠玲等^[14]的研究表明,康氏木霉对向日葵菌核病具有一定的拮抗性。胡俊等^[15]通过对向日葵菌核病重病地土样中拮抗细菌的分离培养,已初步确认对于向日葵菌核病有较好抑制效果的拮抗菌是 AO3 和 DE,二者均为芽孢杆菌属。本研究拟采用前期平板对峙试验筛选出的对向日葵菌核病防治效果达 91.46%的棘孢木霉 *Trichoderma asperellum* 581 菌株,系统研究其不同施用浓度对向日葵幼苗生长、抗氧化酶活性及对向日葵菌核病防治效果的影响,为木霉菌剂未来研发和推广提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

(1)供试向日葵品种。丰葵杂 1 号,由中国农业科学院植物保护研究所廊坊试验基地提供。

(2)供试培养基。马铃薯葡萄糖琼脂固体培养基(PDA):马铃薯 200 g,葡萄糖 20 g,琼脂粉 20 g,蒸馏水 1 000 ml,pH 值 7.0~7.2,121℃ 高压蒸汽灭菌 30 min,冷却后备用。

马铃薯葡萄糖液体培养基(PD):马铃薯 200 g,葡萄糖 20 g,蒸馏水 1 000 ml,121℃ 高压蒸汽灭菌 30 min,冷却后备用。

(3)供试菌株。棘孢木霉 *Trichoderma asperellum* 581,由中国农业科学院植物保护研究所木霉菌研究组提供。

向日葵菌核病病原菌:核盘菌 (*Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary),由中国农业科学院植物保护研究所土传病害生物防治研究组提供。

(4)供试土壤。将营养土和蛭石按照 4 : 1 均匀混合。营养土壤基本理化性质为:全氮 0.84%,碱

解氮 $137.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $130.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $198.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质 5.63% , pH 值 7.31 。

1.2 木霉发酵液和病原菌孢子悬浮液的制备

(1) 木霉发酵液的制备。将木霉菌在 PDA 培养基上于 28°C 黑暗条件培养 3 d, 从菌落边缘取直径 5 mm 的菌饼 5 块, 接种在含有 100 mL 马铃薯葡萄糖液体培养基 (PD) 的 250 mL 三角瓶中, 在摇床 (250 rpm) 上于 28°C 黑暗条件下振荡培养 7 d, 制成木霉发酵液。用血球记数板测定孢子数, 并将木霉发酵液的孢子数调整至 $1.2 \times 10^8 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 备用。

(2) 核盘菌菌丝悬浮液的制备。将向日葵病原菌在 PDA 培养基上于 28°C 黑暗条件下培养 3 d, 从菌落边缘取直径 5 mm 的菌饼 5 块, 接种在含有 100 mL PD 的 250 mL 三角瓶中, 28°C 、 $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡培养 3 d, 用双层纱布滤出菌丝团, 将菌丝搅碎, 用无菌水调整为 $1.2 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的菌丝悬浮液, 备用。

1.3 木霉菌对向日葵抗氧化酶活性影响和菌核病防治试验

1.3.1 试验方法 2021 年 5—8 月, 在中国农业科学院植物保护研究所温室内开展相关试验研究。试验采用盆栽方式, 将营养土和蛭石按照 4:1 均匀混合, 装入塑料材质的育苗盆 ($11 \text{ cm} \times 11.5 \text{ cm} \times 11.5 \text{ cm}$) 中, 每盆土重 300 g。向日葵种子催芽后, 每盆播种 2 粒, 出苗后每盆保留 1 棵, 置于阳光充足的地方, 每隔 1 d 每盆浇无菌水 100 mL。待植株长出 4 片真叶即播种后 20 d, 利用向日葵菌核病病原菌菌丝悬浮液灌根, 每盆 20 mL。木霉菌施用方式选择前期试验筛选出的最佳模式, 即播种前 5 d 利用 $100 \text{ mL} \cdot \text{盆}^{-1}$ 木霉菌悬浮液拌土+接种菌核病菌前 2 d 利用 $100 \text{ mL} \cdot \text{盆}^{-1}$ 木霉菌悬浮液灌根, 两次均按照下面设置浓度 (T1~T4) 处理。

试验共设 6 个处理, 木霉孢子悬浮液浓度按照单位体积孢子数设置为 4 个水平, 分别为 T1: $1 \times 10^3 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、T2: $1 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、T3: $1 \times 10^5 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、T4: $1 \times 10^6 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$; CK1: 单独利用向日葵菌核病菌灌根且不施用木霉悬浮液; CK2: 单独利用无菌水灌根且不施用向日葵菌核病菌和木霉悬浮液。每个处理设 60 盆, 随机区组设计, 4 次重复。

1.3.2 测定指标与方法 接种后 15 d 即播种后 35 d 取其植株, 每个处理选取 20 株 (每个重复 5 株), 用于测定向日葵幼苗形态指标和物质积累量指标, 计算根冠比; 同时期取其植株, 每个处理选取 40 株 (每个重复 10 株), 用于测定向日葵抗氧化酶活性和抗病性指标。

(1) 形态指标测定。株高: 植株的茎基部到生长点之间的距离, 用直尺测定; 茎粗: 植株子叶节下 1 cm 处粗度, 用游标卡尺测定。

(2) 物质积累量指标测定。利用清水反复冲洗植株, 再用吸水纸吸干, 按照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。按照下面公式计算根冠比和壮苗指数:

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) $\times$ 全株干质量

(3) 抗氧化酶活性测定。在接种后 15 d 即播种后 35 d, 以幼苗自上至下的 3~5 片叶为目标源, 采样时间在 9:00 左右, 每个处理采取 4 个样, 每个样含有 3~6 片叶。样品采好后迅速用锡箔纸包住并贴好标签放入液氮中速冻 30 min, 然后放入超低温冰箱中 -80°C 保存。以后每隔 5 d 取样 1 次, 共取样 5 次。

抗氧化酶活性利用酶标分析仪 (Rayto RT-6100) 测定分析, 采用植物过氧化物酶 (POD) ELISA 检测试剂盒测定 POD 活性, 以每分钟每克鲜质量样品在 470 nm 下吸光度变化值表示酶活性大小; 采用植物过氧化氢酶 (CAT) ELISA 检测试剂盒测定 CAT 活性, 以每分钟每克鲜质量样品在 240 nm 下吸光度变化值表示酶活性大小; 采用植物超氧化物歧化酶 (SOD) ELISA 检测试剂盒测定 SOD 活性, 以每分钟样品的反应体系对 NBT (氮蓝四唑) 光化还原的抑制为 50% 时为 1 个酶活性单位; 采用植物苯丙氨酸解氨酶 (PAL) ELISA 检测试剂盒测定 PAL 活性, 以每分钟每克鲜质量样品在 290 nm 下吸光度变化值表示酶活性大小; 采用植物抗坏血酸过氧化物酶 (APX) ELISA 检测试剂盒测定 APX 活性, 以每分钟每克鲜质量样品在 290 nm 下吸光度变化值表示酶活性大小; 采用植物多酚氧化酶 (PPO) ELISA 检测试剂盒测定 PPO 活性, 以每分钟每克鲜质量样品在 420 nm 下吸光度变化值表示酶活性大小。酶活性均以 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 表示。每个处理重复 4 次。

(4) 抗病性指标调查, 包括植株发病率、病情指数、防治效果。接种病原菌后第 6 d 开始调查发病情况, 以后每隔 1 d 调查 1 次, 连续调查 5 次。

向日葵菌核病分级标准参照陈娴等^[16]方法, 分为 5 级: 0 级表示无病; 1 级表示病斑面积占全叶 10% 以下; 2 级表示病斑面积占全叶 10%~30%; 3

级表示病斑面积占全叶 31%~50%;4 级表示病斑面积占全叶 51% 以上。病情指数参照宗兆锋和康振生^[17]的计算方法。植株发病率为接种后 15 d 各处理发病株数占调查总株数的百分比。

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

1.4 数据统计与分析

利用 Microsoft Excel 2010 软件进行图表制作, 试验数据取 4 次重复的平均值和标准差, 利用 DPS 7.05(Data processing system) 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 木霉菌对向日葵幼苗形态建成和物质积累的影响

向日葵播种后 35 d, *T. asperellum* 581 不同施用浓度对幼苗形态和物质积累指标影响如表 1 所示: T3 即木霉菌悬浮液施用浓度为 1×10^5 个 · mL⁻¹ 的株高和茎粗最高, 分别为 19.60 cm 和 0.91 cm; T3 株高显著高于 CK1(单独利用向日葵菌核病菌灌根且不施用木霉悬浮液)、CK2(单独利用无菌水灌根且不施用向日葵菌核病菌和木霉悬浮液)、T1(木霉菌悬浮液施用浓度为 1×10^3 个 · mL⁻¹)、T2(木霉菌悬浮液施用浓度为 1×10^4 个 · mL⁻¹)、T4(木霉菌悬浮液施用浓度为 1×10^6 个 · mL⁻¹), 分别高 64.71%、42.03%、18.79%、7.10%、13.95%; T2 株高显著高于 CK1、CK2、T1、T4, 分别高 53.78%、32.61%、10.91%、6.40%; T4 与 T1 株高之间的差异不显著但二者均显著高于 CK1 和 CK2, 分别高 44.54%、24.64% 和

38.66%、19.57%; CK2 株高显著高于 CK1 (15.97%)。T3 与 T2、T2 与 T4 之间茎粗差异均不显著, T2、T3、T4 均显著高于 T1, 分别高 31.25%、42.19%、17.19%; T1 显著高于 CK1 和 CK2, 分别高 106.45% 和 39.13%; CK2 茎粗显著高于 CK1 (48.39%); CK1 的茎粗最低, 为 0.31 cm。

同时, T3 全株鲜质量和全株干质量均最高, 分别为 7.01 g 和 1.47 g; T3 与 T2、T4 与 T1 之间的全株鲜质量差异均不显著, 但 T1、T2、T3、T4 的全株鲜质量均显著高于 CK1 和 CK2, 分别高 69.03%、91.76%、99.15%、82.10% 和 41.67%、60.71%、66.90%、52.62%; CK2 全株鲜质量显著高于 CK1 (19.32%)。T3 全株干质量显著高于 CK1、CK2、T1、T2 与 T4, 分别高 188.24%、162.50%、68.97%、19.51%、32.43%; T2 与 T4、T4 与 T1、CK2 与 CK1 之间差异均不显著; CK1 全株干质量最低, 为 0.51 g。

同时, T3 根冠比和壮苗指数均最高, 分别为 0.18 和 0.31; T3 与 T2、T4 与 T1 之间的根冠比差异均不显著, 但 T1、T2、T3、T4 的根冠比均显著高于 CK1 和 CK2, 分别高 16.67%、41.67%、50.00%、16.67% 和 7.69%、30.77%、38.46%、7.69%; CK2 与 CK1 之间差异不显著。T3 壮苗指数显著高于 CK1、CK2、T1、T2 与 T4, 分别高 416.67%、181.82%、93.75%、29.17% 和 55.00%; T2 与 T4、T4 与 T1 之间差异均不显著; CK2 显著高于 CK1 (83.33%); CK1 壮苗指数最低, 为 0.06。

以上结果说明木霉不同施用浓度对向日葵幼苗株高、茎粗、全株鲜质量、全株干质量、根冠比和壮苗指数的作用效果有差异性表现, T3 处理对向日葵幼苗形态建成和物质积累促进效果最强, 为提高向日葵幼苗抗逆性提供了基础保证。

表 1 *T. asperellum* 581 对向日葵幼苗形态和物质积累指标的影响
Table 1 Effects of *T. asperellum* 581 on morphological formation and matter accumulation indexes of sunflower seedlings

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem diameter	全株鲜质量/g Whole-plant fresh mass	全株干质量/g Whole-plant dry mass	根冠比 Root shoot ratio	壮苗指数 Strong seedling index
CK1	11.90±0.48e	0.31±0.02e	3.52±0.11d	0.51±0.02d	0.12±0.01c	0.06±0.01e
CK2	13.80±0.63d	0.46±0.01d	4.20±0.16c	0.56±0.01d	0.13±0.01c	0.11±0.01d
T1	16.50±0.62c	0.64±0.04c	5.95±0.21b	0.87±0.03c	0.14±0.04b	0.16±0.01c
T2	18.30±0.43b	0.84±0.04ab	6.75±0.31a	1.23±0.04b	0.17±0.01a	0.24±0.01b
T3	19.60±0.09a	0.91±0.03a	7.01±0.27a	1.47±0.08a	0.18±0.01a	0.31±0.01a
T4	17.20±0.56c	0.75±0.03b	6.41±0.37b	1.11±0.03bc	0.14±0.01b	0.20±0.01bc

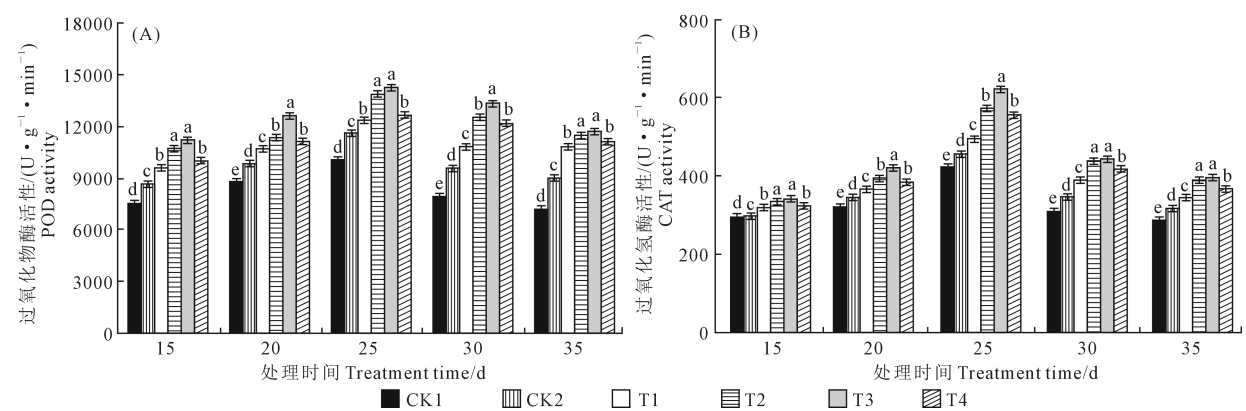
注: 表中的数值分别代表平均值±标准差, 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Values are mean values±standard error in the table. Different lowercase letters within the same column mean significant differences among treatments ($P<0.05$).

2.2 木霉菌对向日葵幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

2.2.1 木霉菌对向日葵幼苗叶片过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的影响 *T. asperellum* 581 不同施用浓度对向日葵幼苗叶片过氧化物酶(POD)活性的影响如图 1A 所示:在接种后 15~35 d,不同处理的向日葵幼苗叶片中的 POD 活性变化有明显规律性,即随时间的推移 POD 活性先上升后下降,且在接种后 25 d 达到最大值。在接种后 15 d, T3 的 POD 活性最高,为 $11\ 238.12\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; T3 与 T2、T4 与 T1 之间 POD 活性差异不显著; T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1、CK2, 分别高 25.72%、40.24%、47.66%、29.88% 和 10.85%、23.65%、30.20%、14.52%; CK2 显著高于 CK1 (13.41%); CK1 的 POD 活性最低,为 $7\ 610.85\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在接种后 20 d, T3 显著高于 CK1、CK2、T1、T2 和 T4, 分别高 43.21%、27.70%、18.30%、11.70% 和 13.54%; T2 与 T4 之间差异不显著,但二者均显著高于 CK1、CK2、T1, 分别高 28.21%、14.33%、5.91% 和 26.13%、12.47%、4.19%; T1 显著高于 CK1 和 CK2, 分别高 21.06% 和 7.95%; CK2 显著高于 CK1 (12.14%); CK1 的 POD 活性最低,为 $8\ 795.72\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在接种后 25 d, 各处理 POD 活性均达到最大值,其中 T3 的 POD 活性最高,为 $14\ 254.98\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; T3 与 T2、T4 与 T1 之间 POD 活性差异不显著; T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1、CK2, 分别高 22.19%、37.87%、41.88%、25.16% 和 7.95%、14.33%、27.70%、12.47%; CK2 显著高于 CK1 (12.14%), CK1 的 POD 活性最低,为 $10\ 047.19\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在接种后 30 d, T3 显著高于 CK1、CK2、T1、T2 和 T4, 分别高 69.14%、39.22%、22.78%、7.07%、10.70%; T2 与 T4 之间差异不显著但二者均显著高于 CK1、CK2、T1, 分别高 57.97%、30.03%、14.67% 和 52.80%、25.77%、10.91%; T1 显著高于 CK1 和 CK2, 分别高 37.76% 和 13.39%; CK2 显著高于 CK1 (21.49%); CK1 的 POD 活性最低,为 $7\ 871.89\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在接种后 35 d, T3 的 POD 活性最高,为 $11\ 738.10\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; T3 与 T2、T4 与 T1 之间 POD 活性差异不显著; T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1、CK2, 分别高 52.12%、60.73%、64.35%、54.41% 和 19.33%、26.09%、28.93%、21.13%; CK2 显著高于 CK1 (27.48%); CK1 的 POD 活性最低,为 $7\ 142.02\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

T. asperellum 581 不同施用浓度对向日葵幼苗

叶片过氧化氢酶(CAT)活性的影响如图 1B 所示:在接种后 15~35 d,不同处理的向日葵幼苗,其叶片中的过氧化氢酶活性变化有明显的规律性,即随时间的推移 CAT 活性先上升后下降,且在接种后 25 d 达到最大值。在接种后 15 d, T3 的 CAT 活性最高,为 $339.05\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; T3 与 T2、T4 与 T1 之间 CAT 活性差异不显著; T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1、CK2, 分别高 7.52%、13.08%、15.15%、9.25% 和 3.94%、9.32%、11.32%、5.62%; CK2 显著高于 CK1 (3.44%); CK1 的 CAT 活性最低,为 $294.43\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在接种后 20 d, T3 的 CAT 活性最高,为 $424.40\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; T3 显著高于 CK1、CK2、T1、T2 和 T4, 分别高 31.13%、22.37%、15.15%、7.01%、10.14%; T2 与 T4 之间差异不显著但二者均显著高于 CK1、CK2、T1, 分别高 22.54%、14.36%、7.61% 和 19.06%、11.11%、4.55%; T1 显著高于 CK1 和 CK2, 分别高 13.88% 和 6.27%; CK2 显著高于 CK1 (7.15%); CK1 的 CAT 活性最低,为 $323.66\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在接种后 25 d, 各处理的 CAT 活性均达到最高值,其中 T3 的 CAT 活性最高,为 $620.64\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; T3 显著高于 CK1、CK2、T1、T2 和 T4, 分别高 46.74%、36.28%、25.40%、8.96%、12.06%; T2 与 T4 之间差异不显著但二者均显著高于 CK1、CK2、T1, 分别高 34.67%、25.08%、15.09% 和 30.94%、21.62%、11.90%; T1 显著高于 CK1 和 CK2, 分别高 17.02% 和 8.68%; CK2 显著高于 CK1 (7.67%); CK1 的 CAT 活性最低,为 $422.96\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在接种后 30 d, T3 的 CAT 活性最高,为 $446.11\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; T3 与 T2 之间差异不显著但二者均显著高于 CK1、CK2、T1 和 T4, 分别高 43.57%、29.02%、14.94%、7.21% 和 40.71%、26.45%、12.65%、5.08%; T4 显著高于 CK1、CK2 和 T1, 高 33.91%、20.33% 和 7.20%; T1 显著高于 CK1、CK2, 分别高 24.91% 和 12.25%; CK2 显著高于 CK1 (11.28%); CK1 的 CAT 活性最低,为 $310.73\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在接种后 35 d, T3 的 CAT 活性最高,为 $395.53\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; T3 与 T2 之间差异不显著但二者均显著高于 CK1、CK2、T1 和 T4, 分别高 35.62%、24.51%、15.14%、7.38% 和 32.92%、22.04%、12.86%、5.25%; T4 显著高于 CK1、CK2 和 T1, 分别高 26.30%、15.95% 和 7.23%; T1 显著高于 CK1、CK2, 高 17.78% 和 8.14%; CK2 显著高于 CK1 (8.92%); CK1 的 CAT 活性最低,为 $291.65\ \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。



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处理时间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 treatment time indicate that the differences reach a significant level ($P<0.05$) among different treatments. The same below.

图 1 *T. asperellum* 581 对向日葵幼苗叶片过氧化物酶和过氧化氢酶活性的影响

Fig.1 Effects of *T. asperellum* 581 on peroxidase activity and catalase activity of sunflower seedlings leaves

2.2.2 木霉菌对向日葵幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)和苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性的影响

T. asperellum 581 不同施用浓度对向日葵幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响如图 2A 所示:在接种后 15~35 d,不同处理的向日葵幼苗叶片中 SOD 活性变化有明显规律性,即随时间的推移呈现先上升后下降的变化趋势,且在接种后 25 d 均达到最大值。在接种后 15 d,T3 的 SOD 活性最高,为 $1\,613.51\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$;T3 与 T2 之间差异不显著且二者均显著高于 CK1、CK2、T1 和 T4,分别高 48.46%、39.26%、25.21%、10.11% 和 43.49%、34.59%、21.01%、6.42%;T4 显著高于 CK1、CK2 和 T1,分别高 34.83%、26.47%和 13.71%;T1 显著高于 CK1 和 CK2,分别高 18.57%和 11.22%;CK2 显著高于 CK1(6.61%);CK1 的 SOD 活性最低,为 $1\,086.81\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ 。在接种后 20 d,T3 的 SOD 活性最高,为 $1\,888.29\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$;T3 与 T2 之间差异不显著且二者均显著高于 CK1、CK2、T1 和 T4,分别高 62.90%、53.44%、39.43%、19.01% 和 52.17%、43.34%、30.24%、11.18%;T4 显著高于 CK1、CK2 和 T1,分别高 36.88%、28.93%、17.15%;T1 显著高于 CK1 和 CK2,分别高 16.84%和 10.05%;CK2 显著高于 CK1(6.61%);CK1 的 SOD 活性最低,为 $1\,159.16\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ 。在接种后 25 d,T3 的 SOD 活性最高,为 $2\,189.21\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$;T3 显著高于 CK1、CK2、T1、T2 和 T4,分别高 62.79%、51.88%、41.79%、13.08%、34.43%;T2 显著高于 CK1、CK2、T1 和 T4,分别高 43.96%、34.32%、25.40%、18.88%;T4 与 T1 之间差异不显著但二者均显著高于 CK1、CK2,分别高 21.10%、12.98% 和 14.81%、7.11%;

CK2 显著高于 CK1(7.18%)。在接种后 30 d,T3 的 SOD 活性最高,为 $1\,847.55\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$;T3 与 T2、T4 与 T1 之间差异均不显著,T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1 和 CK2,分别高 24.63%、52.82%、63.41%、29.97% 和 13.10%、38.69%、48.29%、17.95%;CK2 显著高于 CK1(10.19%);CK1 的 SOD 活性最低,为 $1\,130.63\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ 。在接种后 35 d,T3 的 SOD 活性最高,为 $1\,680.68\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$;T3 与 T2、T4 与 T1 之间差异均不显著,T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1 和 CK2,分别高 25.78%、47.93%、59.14%、31.30%和 9.86%、29.22%、39.00%、14.69%;CK2 显著高于 CK1(14.49%);CK1 的 SOD 活性最低,为 $1\,056.10\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ 。

T. asperellum 581 不同施用浓度对向日葵幼苗叶片苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性的影响如图 2B 所示:在接种后 15~35 d,不同处理的向日葵幼苗叶片中 PAL 活性变化有明显规律性,即随时间的推移呈现先上升后下降的变化趋势,且在接种后 30 d 均达到最大值。在接种后 15 d,T3 的 PAL 活性最高,为 $200.62\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$;T3 与 T2、T4 与 T1 之间差异均不显著,T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1 和 CK2,分别高 30.61%、58.95%、70.51%、44.20%和 13.75%、38.44%、48.51%、25.60%;CK2 显著高于 CK1(14.81%);CK1 的 PAL 活性最低,为 $117.66\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ 。在接种后 20 d,T3 的 PAL 活性最高,为 $256.48\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$;T3 与 T2、T4 与 T1 之间差异均不显著,T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1 和 CK2,分别高 19.15%、30.17%、39.33%、23.50% 和 11.81%、22.14%、30.74%、15.89%;CK2 显著高于 CK1(6.57%);CK1 的 PAL 活性最低,为 $184.08\,U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ 。在接

种后 25 d,T3 的 PAL 活性最高,为 $282.89\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 与 T2、T4 与 T1 之间差异均不显著,T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1 和 CK2,分别高 16.70%、29.41%、37.60%、22.54%和 6.79%、18.42%、25.91%、12.13%;CK2 显著高于 CK1 (9.28%);CK1 的 PAL 活性最低,为 $205.59\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在接种后 30 d,T3 的 PAL 活性最高,为 $335.82\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 显著高于 CK1、CK2、T1、T2 和 T4,分别高 52.57%、35.50%、23.88%、9.56%、17.79%;T2 显著高于 CK1、CK2、T1 和 T4,分别高 39.26%、23.68%、13.07%、

7.52%;T4 与 T1 之间差异不显著但二者均显著高于 CK1、CK2,分别高 29.52%、15.03%和 23.16%、9.38%;CK2 显著高于 CK1 (12.60%);CK1 的 PAL 活性最低,为 $220.11\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在接种后 35 d,T3 的 PAL 活性最高,为 $304.65\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 与 T2、T4 与 T1 之间差异均不显著,T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1 和 CK2,分别高 22.79%、37.71%、50.02%、31.65%和 12.01%、25.62%、36.85%、20.09%;CK2 显著高于 CK1 (9.62%);CK1 的 PAL 活性最低,为 $203.07\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

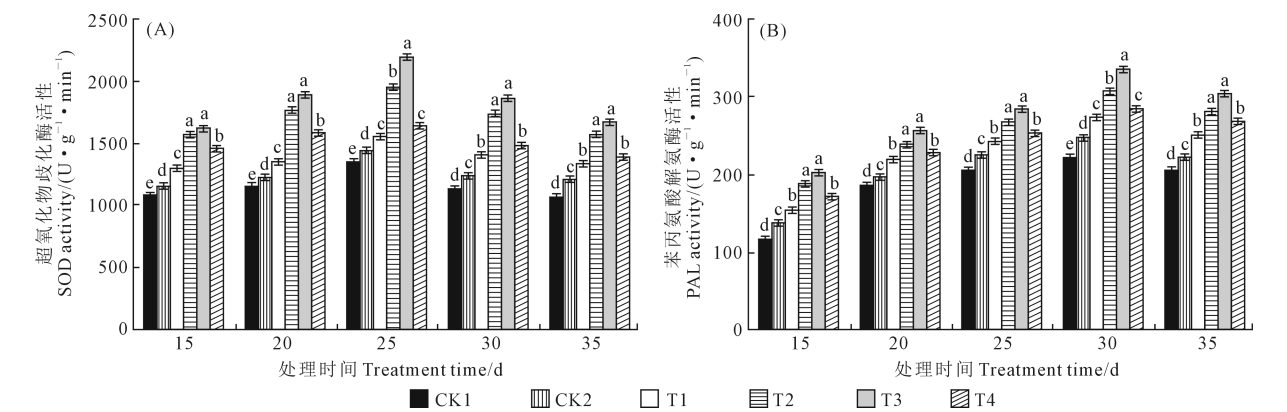


图 2 *T. asperellum* 581 对向日葵幼苗叶片超氧化物歧化酶和苯丙氨酸解氨酶活性的影响

Fig.2 Effects of *T. asperellum* 581 on superoxide dismutase and phenylalanine ammonia-lyase activity of sunflower seedlings leaves

2.2.3 木霉菌对向日葵幼苗叶片抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 和多酚氧化酶 (PPO) 活性的影响 *T. asperellum* 581 不同施用浓度对向日葵幼苗叶片抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性的影响如图 3A 所示:在接种后 15~35 d,不同处理的向日葵幼苗叶片中的 APX 活性变化有明显规律性,即随时间的推移呈现缓慢上升的变化趋势。在接种后 15 d,T3 的 APX 活性最高,为 $1\,519.04\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 与 T2 之间差异不显著且二者均显著高于 CK1、CK2、T1 和 T4,分别高 69.56%、39.84%、24.35%、13.64%和 66.28%、37.14%、21.94%、11.44%;T4 显著高于 CK1、CK2 和 T1,分别高 49.20%、23.05%和 9.42%;T1 显著高于 CK1 和 CK2,分别高 36.36%和 12.46%;CK2 显著高于 CK1 (21.25%);CK1 的 APX 活性最低,为 $895.89\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在接种后 20 d,T3 的 APX 活性最高,为 $1\,652.38\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 与 T2、T4 与 T1 之间差异均不显著,T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1 和 CK2,分别高 26.42%、42.99%、49.54%、28.00%和 13.99%、28.93%、34.84%、15.41%;CK2 显著高于 CK1 (10.91%);CK1 的 APX 活性最低,为 $1\,104.96\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在接种后 25 d,T3 的 APX 活性最高,为 $1\,706.94\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 与 T2 之间差异不显著且二者均显著高于 CK1、

CK2、T1 和 T4,分别高 35.32%、27.80%、19.50%、9.56%和 33.87%、26.43%、18.22%、8.39%;T4 显著高于 CK1、CK2 和 T1,分别高 23.51%、16.65%、9.07%;T1 显著高于 CK1 和 CK2,分别高 13.23%和 6.95%;CK2 显著高于 CK1 (5.88%);CK1 的 APX 活性最低,为 $1\,261.43\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在接种后 30 d,T3 的 APX 活性最高,为 $2\,084.93\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 与 T2 之间差异不显著且二者均显著高于 CK1、CK2、T1 和 T4,分别高 55.62%、33.55%、23.18%、13.99%和 47.91%、26.93%、17.07%、8.34%;T4 显著高于 CK1、CK2 和 T1,分别高 36.52%、17.16%和 8.06%;T1 显著高于 CK1 和 CK2,分别高 26.34%和 8.42%;CK2 显著高于 CK1 (16.52%);CK1 的 APX 活性最低,为 $1\,339.75\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在接种后 35 d,T3 的 APX 活性最高,为 $2\,233.73\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 与 T2 之间差异不显著且二者均显著高于 CK1、CK2、T1 和 T4,分别高 43.39%、36.27%、29.22%、18.29%和 34.19%、27.52%、20.93%、10.70%;T4 显著高于 CK1、CK2 和 T1,分别高 21.22%、15.20%和 9.24%;T1 显著高于 CK1 和 CK2,分别高 10.97%和 5.46%;CK2 显著高于 CK1 (5.23%);CK1 的 APX 活性最低,为 $1\,557.78\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

T. asperellum 581 不同施用浓度对向日葵幼苗

叶片多酚氧化酶(PPO)活性的影响如图 3B 所示:在接种后 15~35 d,不同处理的向日葵幼苗叶片中的 PPO 活性变化有明显的规律性,即随时间的推移呈现缓慢上升的变化趋势。在接种后 15 d,T3 的 PPO 活性最高,为 $10\,031.62\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 显著高于 CK1、CK2、T1、T2 和 T4,分别高 35.06%、18.05%、11.89%、5.34%、5.83%;T2 与 T4 之间差异不显著但二者均显著高于 CK1、CK2 和 T1,分别高 28.21%、12.07%、6.22%和 27.61%、11.54%、5.72%;T1 显著高于 CK1 和 CK2,分别高 20.70%和 5.50%;CK2 显著高于 CK1(14.41%);CK1 的 PPO 活性最低,为 $7\,427.72\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在接种后 20 d,T3 的 PPO 活性最高,为 $11\,096.54\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 与 T2、T4 与 T1 之间差异均不显著,T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1 和 CK2,分别高 23.42%、37.50%、40.27%、27.85%和 9.32%、21.78%、24.24%、13.24%;CK2 显著高于 CK1(12.90%);CK1 的 PPO 活性最低,为 $7\,910.85\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在接种后 25 d,T3 的 PPO 活性最高,为 $11\,254.98\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 与 T2、T4 与 T1 之间差异均不显著,T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1 和 CK2,分别高 18.16%、31.21%、34.84%、26.25%和 6.32%、18.06%、21.32%、13.59%;CK2 显著高于 CK1(11.14%);CK1 的 PPO 活性最低,为 $8\,347.19\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在接种后 30 d,T3 的 PPO 活性最高,为 $12\,114.72\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 与 T2、T4 与 T1 之间差异均不显著,T1、T2、T3、T4 均显著高于 CK1 和 CK2,分别高 22.11%、28.08%、30.66%、25.62%和 4.40%、9.51%、11.71%、7.40%;CK2 显著高于 CK1(16.96%);CK1 的 PPO 活性最低,为 $9\,271.89\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在接种后 35 d,T3 的 PPO 活性最高,为 $13\,738.13\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$;T3 显著高于 CK1、CK2、T1、T2 和 T4,分别高 41.16%、37.32%、19.67%、10.08%和 13.18%;T2 与 T4 之间差异不显著但二者均显著高于 CK1、CK2 和 T1,分

别高 28.23%、24.74%、8.71%和 24.73%、21.33%、5.74%;T1 显著高于 CK1 和 CK2,分别高 17.96%和 14.75%;CK2 显著高于 CK1(2.80%);CK1 的 PPO 活性最低,为 $9\,732.02\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

说明 *T. asperellum* 581 不同施用浓度对向日葵幼苗叶片 POD、CAT、SOD、PAL、APX 和 PPO 活性的影响有明显差别,其中 T3 处理通过提高向日葵幼苗叶片中 POD、CAT、SOD、PAL、APX 和 PPO 酶活性,增强了向日葵植株的抗逆系统的功能和生理活性,提高了向日葵幼苗对菌核病的防治效果。

2.3 木霉菌对向日葵菌核病盆栽防治效果的影响

在向日葵播种后 35 d,调查各处理菌核病的发病率,发病率以 CK1 最高,为 97.58%;以 T3 处理发病率最低,为 1.89%;T1、T2、T3、T4 和 CK2 发病率分别为 10.21%、8.76%、8.34%和 26.12%。根据公式计算病情指数和防治效果,结果如图 4 所示。病情指数与发病率的规律一致,均以 CK1 最高,为 57.50;T3 病情指数最低,为 0.71。木霉菌对菌核病的防治效果以 T3 最高,为 98.77%;T3 显著高于 T1、T2、T3 和 CK2,分别高 5.50%、2.97%、3.90%和 41.98%;T2、T4 之间差异不显著但二者均显著高于 T1 和 CK2,分别高 2.45%、37.86%和 1.54%、36.65%;CK1 的防治效果最低,为 0。说明木霉不同施用浓度对向日葵菌核病的防治效果有一定影响,生产上选择木霉适宜浓度施用对提高菌核病防效具有一定的积极作用。

3 讨论

木霉(*Trichodema* spp.)是一种广谱拮抗菌,能抑制许多种病原菌,具有很强的生防特性,目前在许多植物病害生物防治中被应用。王子晴等^[18]通过挥发性与非挥发性物质抑菌的方法对分离自健康北细辛植株根际土壤的木霉菌株进行筛选,结果发现,筛选得到的木霉,其非挥发性物质对北细辛菌

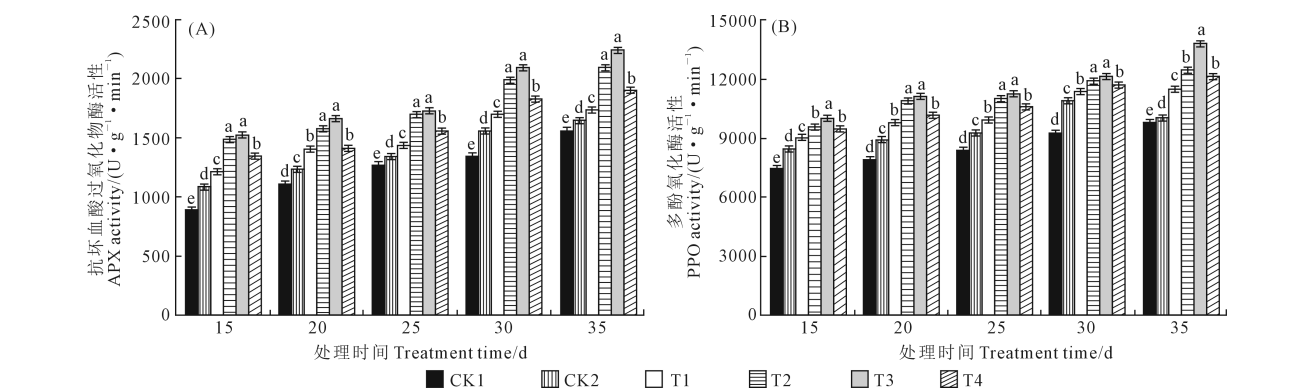


图 3 *T. asperellum* 581 对向日葵幼苗叶片抗坏血酸过氧化物酶和多酚氧化酶活性的影响
Fig.3 Effects of *T. asperellum* 581 on ascorbate peroxidase and polyphenol oxidase activity of sunflower seedlings leaves

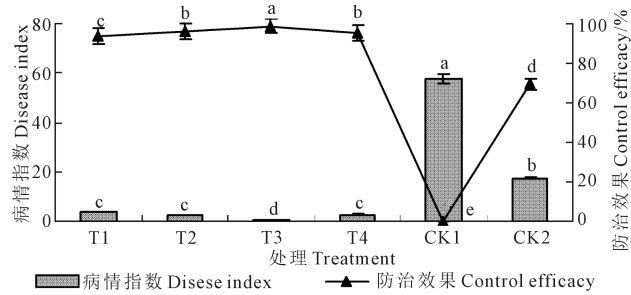


图 4 *T. asperellum* 581 对向日葵菌核病防效的影响
Fig.4 Effects of *T. asperellum* 581 against *Sclerotinia sclerotiorum* of sunflower

核病菌的抑制率均达到 75% 以上。康彦平等^[19]通过圆盘滤膜法测定了拟康宁木霉 (*Trichoderma koningiopsis*) 非挥发性代谢产物对核盘菌的抑制作用, 结果发现, 核盘菌培养 3 d 后, 对照组中的菌丝已扩展到整个培养皿; 培养 5 d 后, 菌核已经形成, 但未见菌丝生长, 且抑制率达到 100%; 培养后 12 d, 菌丝生长非常缓慢, 菌落致密, 不能在培养基上扩展, 甚至不产菌核, 说明木霉及其代谢物均对核盘菌有较好的抑制效果。袁辉^[20]研究发现, 木霉对小麦纹枯病具有显著的生防效果, 防治效果达 89%。本试验中 *T. asperellum* 581 在平板对峙试验中向日葵菌核病防治效果达 91.46%, 4 种施用浓度的盆栽防效均达到 93% 以上。这是由于木霉菌可以通过竞争营养和空间、溶菌、产生抗生素和次生代谢物来抑制病原菌^[21], 还可以促进植物的生长^[22]、诱导植物系统抗性提高, 促进植物防御系统的建立, 提高植物的抗逆性。我们在前期研究中做过检测, 即在木霉菌施入土壤后, 检测土壤中该木霉菌含量, 用菌落形成单位表示, 在施入菌剂后连续测定 1 a, 明确木霉菌可以在土壤中定殖。通过萌发率测定发现, 有超过 95% 的孢子萌发受到抑制, 在 4—6 个月时, 土壤中木霉菌检出量与初始含量相当, 在 12 个月时仍有该木霉菌检出, 说明该木霉菌在土壤中已经定殖。

木霉菌可从土壤中获取众多养分, 通过增加不溶性化合物的溶解性和微量营养素的可利用性, 有效促进植物生长、干物质积累及产量^[23]。株高、茎粗均可作为农作物生长水平的重要指标, 通过影响株型、抗倒伏性能等, 影响作物产量^[24]。Zhao 等^[25]研究发现, *Trichoderma afroharzianum* TM2-4 培养滤液经 100 倍稀释处理后, 番茄下胚轴长度、根长和活力指数分别提高了 28.7%、19.4%、62.1%, 具有产生生物活性物质和促进番茄种子萌发的作用; Yani 等^[26]研究发现, 利用木霉 (*Trichoderma* spp.) 处理的大蒜株高、根长和块茎质量分别增加 0.8%、9% ~ 23%、21% ~ 51%, 通过生物治剂可以提高大蒜产量。

本试验中 *T. asperellum* 581 的 4 种不同处理浓度下, 向日葵幼苗株高、茎粗、全株鲜质量、全株干质量、根冠比和壮苗指数均显著高于 CK1, 提高幅度分别为 38.66% ~ 64.71%、106.45% ~ 193.55%、69.03% ~ 99.15%、70.59% ~ 188.24%、16.67% ~ 50.00%、166.67% ~ 416.67%, 与文献报道结果相似。因为木霉菌可以产生植物生长调节物质, 提高植物对土壤中矿物质的吸收, 直接促进植物生长发育, 同时木霉提高了植物对土壤养分的利用率, 间接促进植物生长发育^[27]。

生防菌株对病原菌的生长有一定的拮抗作用, 主要是通过干扰菌丝的正常生理代谢途径来抑制多种重要酶的活性, 从而抑制病原菌的生长。许多生防菌株均能诱导寄主增强防御保护酶的活性或抑制病原菌保护酶的活性。植物抗性主要通过防御酶系统的应答体现出来, 防御酶系统包括过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD)、苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 等, 它们是生物体内抗氧化系统的组成部分, 能有效地防止组织细胞受到氧化损伤, 并能抑制组织细胞发生膜脂过氧化^[28]。在本研究中, POD、CAT、SOD、PAL、APX、PPO 等 6 种抗氧化酶对木霉菌作用均比较敏感, 并呈现上升的趋势。与 CK1 相比, *T. asperellum* 581 在 4 种施用浓度下均显著增加了 POD、CAT、SOD、PAL、APX、PPO 等 6 种保护酶的活性, 其中以 T3 处理增幅最大, 分别增加了 64.35%、35.62%、59.14%、50.02%、43.39%、41.16%。宿畅等^[29]研究发现, 拟康氏木霉 *T. pseudokoningii* 886 处理黄瓜幼苗叶片后, 对比只接种黄瓜枯萎病原菌的处理, SOD、POD、CAT、PPO 活性分别增加了 46.82%、34.93%、18.75%、11.63%; 梁艳琼等^[30]利用生防菌 TB2 处理甘蔗叶片后发现, 先喷施生防菌后接种病原菌、先接种赤腐病菌后喷施生防菌、先喷施生防菌后接种病原菌、病原菌处理、生防菌处理等处理后, 与植物防御抗病相关的 PPO、POD、SOD、PAL、CAT 防御酶活性均比对照组高, 表明 TB2 和赤腐病菌均能诱导甘蔗叶片中的防御酶活性增强。本试验的研究结果与文献报道结果基本一致。这是因为当植物受病原菌侵染后, 木霉等生防微生物能够诱导植物抗病相关防御酶发生变化, 提高植物体的抗病防御功能, 而不同的保护酶活性与防御反应之间存在着密切的联系^[31]。

4 结 论

棘孢木霉 *T. asperellum* 581 不同施用浓度通过提高向日葵幼苗抗氧化酶活性促进了幼苗形态建

成和物质积累, 增强了向日葵对菌核病的抗性。以 T3 即木霉菌悬浮液施用浓度为 1×10^5 个 $\cdot$ mL⁻¹ 处理应用效果最好, 在向日葵播种后 35 d, 向日葵叶片中的 POD、CAT、SOD、PAL、APX 和 PPO 活性分别比 CK1 提高 64.35%、35.62%、59.14%、50.02%、43.39%、41.16%, 向日葵幼苗株高、茎粗、全株鲜质量、全株干质量、根冠比和壮苗指数分别比 CK1 提高 64.71%、193.55%、99.15%、188.24%、50.00%、416.67%, 对向日葵菌核病的防效达到 98.77%。

参 考 文 献:

[1] 闻金光, 王林, 韩晓梅, 等. 我国向日葵种子加工的发展及现状[J]. 中国种业, 2021, (11): 17-19.
WEN J G, WANG L, HAN X M, et al. Development and current situation of sunflower seed processing in China[J]. China Seed Industry, 2021, (11): 17-19.

[2] 李培江, 米瑶, 余竞, 等. 美国引进向日葵种子含油量和脂肪酸组成比较分析[J]. 中国油脂, 2015, 40(11): 104-106.
LI P J, MI Y, YU J, et al. Comparison of oil contents and fatty acid compositions of sunflower seeds introduced from the US[J]. China Oils and Fats, 2015, 40(11): 104-106.

[3] 郭树春, 李素萍, 孙瑞芬, 等. 世界及我国向日葵产业发展总体情况分析[J]. 中国种业, 2021, (7): 10-13.
GUO S C, LI S P, SUN R F, et al. Analysis of the overall situation of sunflower industry development in the world and China[J]. China Seed Industry, 2021, (7): 10-13.

[4] 甄子龙, 侯建华, 伊六喜, 等. 向日葵种质资源苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 228-238.
ZHEN Z L, HOU J H, YI L X, et al. Drought resistance identification and drought resistance index screening of sunflower germplasm resources at seedling stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 228-238.

[5] 郑晓薇. 向日葵菌核病致病菌的拮抗菌株筛选与鉴定[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
ZHENG X W. Screening and identification of antagonistic strains against sunflower sclerotinia pathogenic fungus[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.

[6] 张海洋, 李海燕, 孟庆林, 等. 啉酰菌胺对向日葵核盘菌生物活性的影响[J]. 农学学报, 2021, 11(1): 71-74, 90.
ZHANG H Y, LI H Y, MENG Q L, et al. Effect of biological activity of boscalid on sclerotinia sclerotiorum of sunflower[J]. Journal of Agriculture, 2021, 11(1): 71-74, 90.

[7] LIU J, ZHANG Y H, MENG Q L, et al. Physiological and biochemical responses in sunflower leaves infected by *Sclerotinia sclerotiorum* [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2017, 100: 41-48.

[8] 周洋子, 邱慧珍, 董莉, 等. 马铃薯疮痂病高效生防芽孢杆菌的筛选及发酵条件优化[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 259-266.
ZHOU Y Z, QIU H Z, DONG L, et al. Screening of highly effective bio-control *Bacillus* strains for potato scab and optimization of its fermentation conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 259-266.

[9] YANG X, HONG C X. Biological control of Phytophthora blight by *Pseudomonas protegens* strain 14D5[J]. European Journal of Plant Pathology, 2020, 156(2): 591-601.

[10] 孟庆林. 向日葵菌核病发生规律及防治技术研究[D]. 北京: 中国农

业科学院, 2013.

MENG Q L. Study on the occurrence regularity and control techniques of *Sclerotinia sclerotiarum* in sunflower[J]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.

[11] 高知泉. SsNSRV-1 基因功能及其与核盘菌互作机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
GAO Z X. Study on the gene functions of SsNSRV-1 and the interaction mechanism with *Sclerotinia sclerotiarum*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.

[12] 李丹阳, 邓启得, 雍明丽, 等. 稻曲病菌菌核降解微生物的筛选与作用机制分析[J]. 中国生物防治学报, 2016, 32(2): 258-264.
LI D Y, DENG Q D, YONG M L, et al. Screening of biocontrol fungi against sclerotia of *villosiclava virens* and their mechanisms[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2016, 32(2): 258-264.

[13] 张海洋. 啉酰菌胺对向日葵核盘菌的抑制机理及田间持效期测定[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
ZHANG H Y. The inhibitory mechanism of boscalid against *Sclerotinia sclerotiorum* of sunflower and its field holdup period were determined [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020.

[14] 曹翠玲, 刘素琪, 康瑞姣, 等. 康氏木霉对向日葵菌核病菌拮抗作用研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2005, 25(2): 150-152.
CAO C L, LIU S Q, KANG R J, et al. Study on antagonism of *Trichoderma koningii* Oud. against fungal pathogen of sunflower sclerotinia rot[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2005, 25(2): 150-152.

[15] 胡俊, 刘正坪, 杨海清, 等. 向日葵菌核病生防细菌的初步筛选[J]. 北京农学院学报, 2005, 20(2): 34-36.
HU J, LIU Z P, YANG H Q, et al. Isolation and screening of antagonistic bacteria for control of sunflower sclerotinic rot [J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2005, 20(2): 34-36.

[16] 陈炯, 李咏梅, 曾艳, 等. 油菜菌核病拮抗内生菌的筛选及其生防效果研究[J]. 湖南农业科学, 2021(8): 63-66.
CHEN X, LI Y M, ZENG Y, et al. Screening of antagonistic endophytic microorganisms and their efficacy against *Sclerotinia sclerotiorum* [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2021(8): 63-66.

[17] 宗兆锋, 康振生. 植物病理学原理[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2010: 247.
ZONG Z F, KANG Z S. Principles of plant pathology[M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 247.

[18] 王子晴, 卢宝慧, 田义新, 等. 拮抗细菌核盘菌木霉菌的分离、鉴定及生防效果[J]. 微生物学通报, 2021, 48(12): 4624-4635.
WANG ZI Q, LU B H, TIAN Y X, et al. Isolation, identification and biocontrol effect of *Trichoderma* antagonistic to *Sclerotinia* disease of *Asarum heterotropoides* Fr. Schmidt var. *mandshuricum* (Maxim) Kitag[J]. Microbiology China, 2021, 48(12): 4624-4635.

[19] 康彦平, 晏立英, 雷永, 等. 拟康宁木霉对花生菌核病的生防机制[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(6): 842-847.
KANG Y P, YAN L Y, LEI Y, et al. Biocontrol mechanism of *Trichoderma koningiopsis* against *Sclerotinia sclerotiorum* in peanut [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2017, 39(6): 842-847.

[20] 袁辉. 利用绿色木霉防治小麦纹枯病的研究[D]. 开封: 河南大学, 2007.
YUAN H. Studies on control of wheat sharp eyespot caused by *Rhizoctonia cerealis* with *Trichoderma viride* [D]. Kaifeng: Henan University, 2007.