

木霉菌对玉米茎腐病的田间防治效果及玉米产量的影响

许蓉¹, 姚佳欢¹, 邱新月¹, 沈晓强², 张作刚¹, 畅引东¹, 苏朝棉³, 姚艳平¹

(1. 山西农业大学 植物保护学院, 山西 太谷 030801; 2. 山西省植物保护植物检疫中心, 山西 太原 030001;

3. 南和县自然资源和规划局, 河北 南和 054400)

摘要:玉米是我国主要的粮食作物之一。近年来,玉米茎腐病的危害面积和危害程度逐年增长,造成玉米产量降低和品质下降,严重影响了玉米产业的可持续发展。为筛选出防控玉米镰孢茎腐病的优势生防菌株,为玉米茎腐病的绿色防控提供备选材料,以前期室内筛选到的6株木霉菌株为研究对象,将玉米种子分别通过木霉发酵液包衣处理和孢子悬浮液浸种处理后,采用田间随机区组试验测定不同木霉菌株对玉米茎腐病的田间防治效果,并分析其对玉米产量的影响。结果表明,木霉菌株种类、处理方式和病原菌种类不同,对玉米茎腐病的防治效果和玉米产量的影响也不同;其中绿色木霉 T43 和康氏木霉 KS 包衣处理对禾谷镰孢茎腐病的防治效果分别达到 54.21%、32.71%;绿色木霉 T43 浸种处理后,接种拟轮枝镰孢菌的前提下,玉米产量为 6 760.24 kg/hm²,促生率达 48.63%;康氏木霉 KS 浸种处理后,接种禾谷镰孢菌的前提下,玉米产量为 6 353.74 kg/hm²,促生率达 61.26%。从供试的菌株中,筛选出绿色木霉 T43 和康氏木霉 KS 作为优势生防菌株,绿色木霉 T43 的包衣处理对禾谷镰孢茎腐病表现出较好的防治效果,绿色木霉 T43 和康氏木霉 KS 浸种处理对玉米产量具有较好的增产效果。

关键词:玉米茎腐病;禾谷镰孢菌;拟轮枝镰孢菌;木霉菌;田间防治效果

中图分类号:S435.131

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2024)04-0133-09

Field Efficacy of *Trichoderma* against Maize Stalk Rot and Its Effect on Maize Yield

XU Rong¹, YAO Jiahuan¹, QIU Xinyue¹, SHEN Xiaoliang², ZHANG Zuogang¹,

CHANG Yindong¹, SU Zhaomian, YAO Yanping¹

(1. College of Plant Protection, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. Shanxi Plant Protection and

Quarantine Centre, Taiyuan 030001, China; 3. Nanhe Natural Resources and Planning Bureau, Nanhe 054400, China)

Abstract: Maize is one of the most important food crops in China. In recent years, the increasing harm area and severity of maize stalk rot has led to a decline in maize yield and quality, severely affecting the sustainable development of the maize industry. In order to screen out dominant biocontrol strains for the prevention and control of maize stalk rot caused by *Fusarium graminearum* and *Fusarium verticillioides*, and provide alternative materials for green prevention and control of maize stalk rot, in this study, six *Trichoderma* strains screened indoors in the early stage were used as the research object, by coating of maize seeds with fermentation solution and soaking them with spore suspension of *Trichoderma*, a randomized block design was used to determine the efficacy of different *Trichoderma* strains against maize stalk rot and to analyze their effect on maize yield. The results showed that the efficacy of control against maize stalk rot and effect on maize yield varied with the types of *Trichoderma* strains, treatments, and pathogenic fungal species. The efficacy of *Trichoderma viride* T43 and *Trichoderma koningii* KS coating treatments against *Fusarium graminearum* stalk rot reached 54.20% and 32.71%, respectively; maize yield was 6 760.24 kg/ha with 48.63% growth promotion under the premise of inoculation with *Fusarium verticillioides* after *Trichoderma viride* T43 soaking treatment; maize yield was 6 353.74 kg/ha with 61.26% growth promotion under the premise of inoculation with *Fusarium graminearum* after *Trichoderma koningii* KS soaking treatment, *Trichoderma viride* T43 and *Trichoderma koningii* KS were screened for the effectiveness of biocontrol strains against maize stalk rot. The coating treatment of *Trichoderma viride* T43 showed a better control effect on *Fusarium graminearum* stalk rot, and the seed soaking treatment of *Trichoderma viride* T43 and *Trichoderma koningii* KS showed a better yield-increasing effect on the maize yield.

收稿日期:2023-11-13

基金项目:山西省基础研究计划项目(202203021211270);山西省重点研发计划项目(201903D211001-1)

作者简介:许蓉(1997-),女,山西临猗人,在读硕士,研究方向:生物安全与生物防治。

通信作者:姚艳平(1975-),女,山西代县人,副教授,博士,主要从事植物诱导抗病性与生物防治研究工作。

Key words: maize stalk rot; *Fusarium graminearum*; *Fusarium verticillioides*; *Trichoderma*; field control efficiency

玉米茎腐病是由多种病原菌复合侵染引起的一种分布较广、危害较为严重的玉米土传病害,其在一般年份发病率为 10%~20%,严重时发病率可达 80% 以上^[1-2]。近年来,由于主栽品种对茎腐病的抗性水平较低,以及秸秆还田技术的大量推广,造成了田间病原菌的积累,玉米茎腐病的发病逐渐加重^[3]。

传统玉米茎腐病的防治主要采取种植抗病品种、使用化学种衣剂拌种等方法,虽然对玉米茎腐病的发生起到一定的控制作用^[4],但是由于高抗茎腐病种质资源缺乏、选育抗性品种难度大,并且化学药剂的长期使用使病原菌产生抗药性、农药残留对环境和人类健康造成影响等^[5],因此,筛选玉米茎腐病的生防菌株,开展茎腐病的绿色防控成为玉米产业可持续性发展的必要保障^[6]。

目前,已报道的玉米茎腐病的生防菌有木霉菌(*Trichoderma* spp.)、粉红粘帚霉(*Clonostachys rosea*)、芽孢杆菌(*Bacillus* spp.)、醋酸菌(*Asaia lanensis*)和链霉菌(*Streptomyces* spp.)等^[3-4,7-13]。木霉菌是存在于各种环境的一类生防真菌,其生防机制主要包括竞争作用、抗生作用、重寄生作用、诱导抗病性和促生作用^[14-16]。这些机制在木霉菌的生物防治过程中交叉渗透、协同作用,因而对多种植物病害有良好的防治效果^[17-18]。木霉颗粒剂 TCF-1 在全国各玉米产区对玉米茎腐病的平均防治效果达 60% 以上^[19];木霉菌 ZJSX5003 制成的种衣剂对玉米苗期茎腐病的防治效果高达 98.5%,且有促进玉米种子胚根、胚芽生长的作用^[20];以棘孢木霉(*Trichoderma asperellum*)为核心菌株的 2 号木霉菌颗粒剂对苗期玉米茎腐病的防治效果达 65.57%,3 号木霉菌颗粒剂对成株期玉米茎腐病的防治效果达 40.00%,1 号木霉菌颗粒剂对玉米茎腐病的田间防治效果最高可达 80% 以上^[21]。木霉菌除具有生防作用外,对植物也具有良好的促生效果^[22]。木霉菌可通过定殖在土壤和玉米根部,促进玉米健康生长,从而对玉米病害起到防治效果^[23]。绿色木霉(*Trichoderma viride*)拌土处理对玉米植株的株高、茎粗、SPAD 值分别提高了 28.4%、42.8%、18.0%^[24];哈茨木霉 CCTH-2(*Trichoderma harzianum*)灌根后玉米幼苗的鲜质量、干质量、株高、根长、茎宽均显著高于对照,对玉米幼苗起到促生效果^[25];康氏木霉(*Trichoderma koningii*)挥发性

代谢产物在第 12 天对玉米幼苗地上部、地下部干质量和鲜质量的促生率分别达到 78.9%、55.3%、16.9%、31.3%^[26]。

本试验以前期室内筛选到的 6 株木霉菌株为研究对象,采用田间随机区组试验,测定不同木霉菌株对禾谷镰孢菌(*Fusarium graminearum*)和拟轮枝镰孢菌(*Fusarium verticillioides*)引起的玉米茎腐病的防治效果,并分析其对玉米产量的影响,旨在为木霉菌种衣剂的研发提供参考,为田间玉米茎腐病的绿色防控提供备选材料。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试木霉菌株:康氏木霉 KS(*Trichoderma koningii*)、绿色木霉 T43(*Trichoderma viride*)、哈茨木霉 NF9(*Trichoderma harzianum*)、哈茨木霉 212(*Trichoderma harzianum*)、哈茨木霉 198(*Trichoderma harzianum*)和绿色木霉 60(*Trichoderma viride*);供试病原菌:禾谷镰孢菌(*Fusarium graminearum*)和拟轮枝镰孢菌(*Fusarium verticillioides*),均由山西农业大学植物保护学院病理实验室提供;供试玉米品种为高感品种掖 478。

1.2 试验方法

1.2.1 供试培养基的配制 参考景芳等^[27]的方法制备马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA)。

1.2.2 菌种活化 将低温保存的 2 种病原菌和 6 株供试木霉菌株在超净工作台上接种于 PDA 平板上,将培养皿放入恒温培养箱中于 25 °C 下活化培养。

1.2.3 病原菌的扩繁 用玉米雄穗培养病原菌,配置成 0.5×10^6 个/mL 孢子悬浮液,将配置好的孢子悬浮液装入低温保存箱带到田间备用接种^[28]。

1.2.4 玉米种子前处理 玉米种子先用冷水浸种 4 h,放在 50~55 °C 的热水中温汤浸种 15~20 min,以促进种子萌发并起到表面消毒的作用。

1.2.5 木霉菌孢子悬浮液的浸种处理 参考宿畅等^[29]的方法制备浓度为 5×10^3 个/mL 的孢子悬浮液,将前处理的种子浸泡于木霉菌孢子悬浮液中,6~9 h 后用无菌水将种子清洗 3 次,自然晾干后备用。

1.2.6 木霉菌发酵液的包衣处理 参照马光恕等^[30]的方法制备浓度为 $1.0 \times 10^{13-14}$ 个/mL 木霉菌

发酵液,将木霉菌发酵液、1%羧甲基纤维素钠(CMC)、3%壳聚糖溶液按2:1:3的比例混合,前处理后的玉米种子放在混合液中均匀包衣,自然晾干后备用。

1.2.7 田间试验设计 2020年5月初于山西农业大学农作站播种,试验区行距40 cm、株距25 cm。

种植时,每穴加入20 mL的木霉菌发酵液,分别将浸种处理和包衣处理后的玉米种子播种。对照组用无菌水代替,每个处理和对照均种植20穴。待雌花开后7~10 d用注茎法^[10]分别接种2种病原菌。每种病原菌处理设14个小区,每个处理3个重复,田间试验按照随机区组设计(表1)。

表1 2020年田间小区设计
Tab.1 Field experiment design in 2020

小区编号 Block number	木霉菌株 <i>Trichoderma</i> strains	处理方式 Treatments	小区编号 Block number	木霉菌株 <i>Trichoderma</i> strains	处理方式 Treatment method
1	哈茨木霉198	包衣处理	8	哈茨木霉212	包衣处理
2	康氏木霉KS	包衣处理	9	绿色木霉T43	包衣处理
3	哈茨木霉NF9	浸种处理	10	哈茨木霉198	浸种处理
4	绿色木霉60	浸种处理	11	绿色木霉T43	浸种处理
5	哈茨木霉NF9	包衣处理	12	哈茨木霉212	浸种处理
6	康氏木霉KS	浸种处理	13	绿色木霉60	包衣处理
7	对照2	无菌水包衣处理	14	对照1	无菌水浸种处理

1.2.8 田间玉米接种方法 待田间玉米长至吐丝期,雌花开后7~10 d采用注茎法^[10]对田间玉米植株进行接种,用1/4英寸直径的手钻在地表植物第1个伸长的节间以30°角钻透玉米茎,每株玉米植株注入1 mL的病原菌孢子悬浮液。

1.2.9 病情调查和考种测产 接种病原菌30 d后,分别对每个试验组随机取样,根据赵诗杰^[31]的病害分级标准(表2),采用纵向剖茎法^[11]统计玉米茎腐病的发病情况;玉米收获后,参照史丽霞^[28]的方法分别调查玉米穗长、穗粗、穗质量、穗行数、行粒数、秃尖长、百粒质量指标。

表2 玉米成熟期茎腐病的病情分级标准
Tab.2 The disease grading standard of maize stalk rot at the mature stage

等级 Class	症状描述 Symptom description
1级 Class 1	在接种的节间有轻微侵染或无侵染
2级 Class 2	有50%的节间被侵染
3级 Class 3	50%~75%的节间被侵染
4级 Class 4	75%~100%的节间被侵染
5级 Class 5	≤50%侵染扩散到临近的节间
6级 Class 6	≥50%侵染扩散到临近的节间
7级 Class 7	侵染扩散到第2个临近的节间
8级 Class 8	侵染扩散到第4个临近的节间
9级 Class 9	植株在未成熟前已干枯

1.3 数据分析

采用SPSS 25.0软件对试验数据进行统计分析,使用Duncan氏新复极差法在0.05水平上进行

差异显著性检验分析。

$$\text{病情指数} = \frac{\sum(\text{各级病株数} \times \text{该病级值})}{(\text{调查总株数} \times \text{最高级值})} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{相对防治效果} = \frac{(\text{对照病情指数} - \text{处理病情指数})}{\text{对照病情指数}} \times 100\% \quad (2)$$

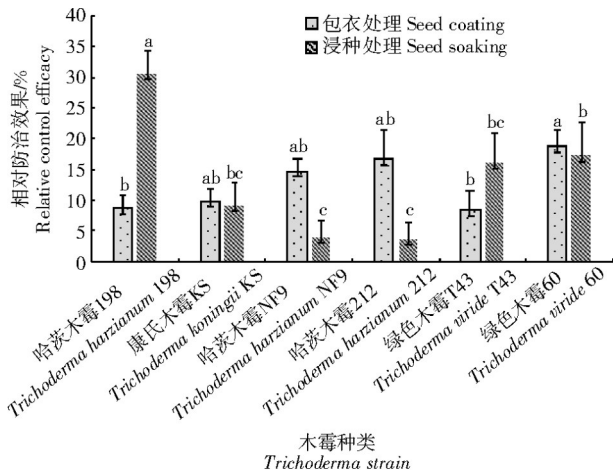
$$\text{促生率} = \frac{(\text{处理后玉米指标} - \text{对照玉米指标})}{\text{对照玉米指标}} \times 100\% \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 木霉菌对玉米拟轮枝镰孢茎腐病的田间防治效果

从图1可以看出,木霉菌株包衣处理对拟轮枝镰孢茎腐病的田间防治效果在8.66%~18.81%,其中绿色木霉60的防治效果最高,达18.81%,但与除哈茨木霉198、绿色木霉T43外其余木霉处理间差异不显著;哈茨木霉NF9和212的防治效果分别为14.85%、16.83%,与其他4种木霉菌处理差异不显著,其余木霉菌处理的防治效果均在15%以下,彼此之间差异不显著。

木霉菌株浸种处理对拟轮枝镰孢茎腐病的防治效果在3.83%~30.61%,其中哈茨木霉198浸种处理防治效果最好,为30.61%,显著高于其他木霉菌处理($P < 0.05$);绿色木霉T43和绿色木霉60的防治效果次之,分别为16.33%和17.35%,显著高于哈茨木霉NF9、212($P < 0.05$),但与康氏木霉KS的差异不显著。



柱形图上不同小写字母表示不同木霉菌同一处理之间 $P < 0.05$ 的显著性差异水平。图 2 同

Different lowercase letters in the figure indicated significant differences ($P < 0.05$) between the same treatment of different *Trichoderma* strains. The same as Fig. 2

图 1 木霉菌对玉米拟轮枝镰孢茎腐病的相对防治效果
Fig.1 Relative control efficacy of *Trichoderma* against maize stalk rot caused by *Fusarium verticillioides*

2.2 木霉菌对玉米禾谷镰孢茎腐病的田间防治效果

由图 2 可知,木霉菌株包衣处理对禾谷镰孢茎腐病的防治效果在 16.82%~54.20%,其中绿色木霉 T43 的防治效果最好,达到 54.21%,与其他木霉菌处理具有显著差异 ($P < 0.05$);康氏木霉 KS 与绿色木霉 60 的防治效果分别为 32.71% 和 33.51%,二者显著高于哈茨木霉 198 和 NF9 处理 ($P < 0.05$),但与哈茨木霉 212 差异不显著。

木霉浸种处理对禾谷镰孢茎腐病的防治效果在 1.88%~24.51%,绿色木霉 60 的防治效果最好,为 24.51%,显著高于除哈茨木霉 212 和 NF9 外的

其他木霉处理 ($P < 0.05$);哈茨木霉 212 和 NF9 的防治效果分别为 21.57%、18.63%,显著高于康氏木霉 KS、绿色木霉 T43 ($P < 0.05$);哈茨木霉 198、康氏木霉 KS、绿色木霉 T43 的防治效果在 15% 以下,但彼此之间差异不显著。

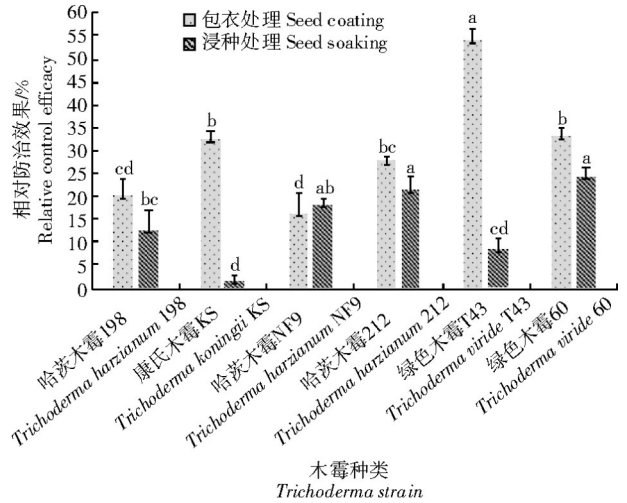


图 2 木霉菌对玉米禾谷镰孢茎腐病的相对防治效果
Fig.2 Relative control efficacy of *Trichoderma* against maize stalk rot caused by *Fusarium graminearum*

2.3 不同木霉菌处理对接种拟轮枝镰孢菌后玉米产量的影响

由表 3 可知,玉米植株接种拟轮枝镰孢菌后,对照的玉米茎腐病病情指数为 74.81,而绿色木霉 60、哈茨木霉 NF9 和哈茨木霉 212 包衣处理的病情指数分别为 60.74、63.70 和 62.22,均显著低于对照的病情指数 ($P < 0.05$),在一定程度上降低了玉米的发病程度。

表 3 木霉菌处理对接种拟轮枝镰孢菌后玉米产量的影响
Tab.3 Effect of *Trichoderma* treatments on the yield of maize after inoculation with *Fusarium verticillioides*

处理 Treatments	木霉菌株 <i>Trichoderma</i> <i>strains</i>	穗长/cm Ear length	穗粗/mm Ear thickness	穗行数 Rows per ear	行粒数 Seeds per row	凸尖长/cm Length of convex tip	穗质量/g Ear weight	百粒质量/g 100 grain weight	产量/ (kg/hm ²) Yield
包衣处理 Seed coating	哈茨木霉 198	14.82± 0.8a	37.47± 1.05a	12.00± 0.33a	19.11± 2.21a	1.60± 0.36a	73.11± 9.71a	32.24± 0.31c	5609.79± 175.04b
	康氏木霉 KS	14.18± 0.8ab	35.36± 1.57a	11.00± 0.58ab	19.33± 2.82a	0.98± 0.22ab	63.50± 10.39a	32.30± 0.12c	5273.02± 72.44bc
包衣处理 Seed coating	哈茨木霉 NF9	14.13± 0.67ab	40.04± 1.03a	12.13± 0.61a	20.00± 215a	1.17± 0.39ab	83.63± 12.44a	33.72± 0.20b	6280.39± 180.81a
	哈茨木霉 212	11.86± 0.76b	36.46± 1.58a	10.60± 0.60ab	18.90± 2.12a	0.46± 0.09b	81.50± 9.23a	34.50± 0.46a	5295.80± 75.14bc
包衣处理 Seed coating	绿色木霉 T43	13.40± 0.9ab	37.07± 1.12a	10.14± 0.71b	17.21± 2.08a	1.24± 0.19ab	65.43± 6.89a	30.05± 0.13e	4288.55± 102.07d
	绿色木霉 60	13.67± 0.55ab	38.24± 1.02a	10.36± 0.45ab	19.91± 1.60a	1.22± 0.22ab	65.82± 6.09a	31.70± 0.03d	4993.27± 144.58c
包衣处理 Seed coating	CK2	12.92± 0.61ab	35.41± 1.77a	10.86± 0.35ab	18.36± 2.04a	1.11± 0.20ab	59.50± 8.94a	27.50± 0.01f	4219.71± 36.66d

续表3 木霉菌处理对接种拟轮枝镰孢菌后玉米产量的影响
 Tab.3(Continued) Effect of *Trichoderma* treatments on the yield of maize after inoculation with *Fusarium verticillioides*

处理 Treatments	木霉菌株 <i>Trichoderma</i> <i>starins</i>	穗长/cm Ear length	穗粗/mm Ear thickness	穗行数 Rows per ear	行粒数 Seeds per row	凸尖长/cm Length of convex tip	穗质量/g Ear weight	百粒质量/g 100 grain weight	产量/ (kg/hm ²) Yield
浸种处理 Seed soaking	哈茨木霉 198	15.11±	37.78±	12.43±	26.93±	1.02±	82.00±	29.15±	5246.04±
		0.74a	1.35ab	0.48b	1.85a	0.31a	10.20ab	0.12d	142.17bc
	康氏木霉 KS	12.99±	38.15±	11.43±	21.00±	1.55±	78.71±	32.06±	5778.82±
		0.64a	1.44ab	0.57ab	3.17ab	0.48a	11.97ab	0.00ab	189.50b
	哈茨木霉 NF9	12.55±	35.26±	10.92±	16.31±	1.18±	61.23±	32.03±	4744.35±
		0.79a	1.71b	0.54ab	2.23b	0.19a	33.17b	0.25ab	59.03cd
	哈茨木霉 212	15.29±	41.44±	11.33±	22.67±	0.99±	102.33±	31.93±	5364.04±
		0.86a	1.15a	0.67ab	4.06ab	0.35a	7.88a	0.09b	467.20bc
	绿色木霉 T43	14.35±	37.94±	11.60±	24.10±	1.01±	78.70±	32.14±	6760.24±
		0.93a	1.06ab	0.40ab	2.23ab	0.20a	11.25ab	0.60a	56.70a
	绿色木霉 60	12.79±	37.18±	11.38±	18.85±	0.73±	70.92±	26.67±	5743.18±
		0.73a	0.73ab	0.27ab	1.85b	0.11a	8.31ab	0.04e	169.95b
	CK1	13.15±	36.04±	10.62±	19.54±	1.15±	60.69±	29.45±	4548.50±
		0.70a	0.80b	0.42b	1.66ab	0.21a	5.04b	0.04c	55.17d

注:表中数据后小写字母表示处理间差异显著性($P<0.05$)。表4同。

Note: Lowercase letters after data in the table indicated the significance of difference between treatments($P<0.05$). The same as Tab.4.

从表3还可以看出,所有木霉菌包衣处理后的百粒质量均显著高于对照($P<0.05$),其中哈茨木霉212、哈茨木霉NF9的百粒质量分别为34.50、33.72 g,显著高于其他木霉菌处理($P<0.05$),促生率分别达25.45%、22.62%;除绿色木霉T43外,其余木霉菌包衣处理后的玉米产量均显著高于对照($P<0.05$),哈茨木霉NF9的产量最高,达到6 280.39 kg/hm²,促生率为48.83%;木霉菌处理后的其他指标与对照间没有显著差异。

玉米植株接种拟轮枝镰孢菌后,对照的玉米茎腐病病情指数为72.59,而哈茨木霉198、绿色木霉T43和绿色木霉60浸种处理的病情指数分别为50.37、60.74和60.00,均显著低于对照的病情指数($P<0.05$),在一定程度上降低了玉米的发病程度。哈茨木霉212浸种处理后穗粗、穗质量均显著高于对照($P<0.05$),分别为41.44 mm和102.33 g,促生率分别达到14.98%、68.61%;绿色木霉T43、康氏木霉KS、哈茨木霉NF9、哈茨木霉212浸种处理的百粒质量均与对照间具有显著差异($P<0.05$),其中绿色木霉T43的百粒质量最高,为32.14 g,促生率为9.13%;除哈茨木霉NF9外,其余木霉菌浸种处理后的玉米产量均显著高于对照($P<0.05$),其中绿色木霉T43的产量为6 760.24 kg/hm²,显著高于其他木霉菌处理($P<0.05$),促生率达48.63%。

2.4 不同木霉菌处理对接种禾谷镰孢菌后玉米产量的影响

从表4可以看出,接种禾谷镰孢菌后,对照的

玉米茎腐病病情指数为79.26,绿色木霉T43、康氏木霉KS和绿色木霉60包衣处理的病情指数分别为36.30、53.33、51.11,均显著低于对照的病情指数($P<0.05$),降低了玉米的发病程度。康氏木霉KS包衣处理后的玉米穗长显著高于对照($P<0.05$),促生率为28.08%;哈茨木霉198和哈茨木霉NF9处理后的穗质量与对照间具有显著差异($P<0.05$),促生率分别为85.01%和94.93%;所有木霉菌包衣处理后的百粒质量均显著高于对照($P<0.05$),其中哈茨木霉212的处理显著高于其他木霉菌处理($P<0.05$),百粒质量为30.81 g,促生率为10.11%;哈茨木霉NF9处理后的玉米产量最高,达到5 970.14 kg/hm²,促生率为43.94%;木霉菌处理的其他指标与对照间不具有显著差异。

接种禾谷镰孢菌后,对照的玉米茎腐病病情指数为75.56,而绿色木霉60、哈茨木霉212和NF9浸种处理的病情指数分别为57.04、59.26、61.48,均显著低于对照的病情指数($P<0.05$),在一定程度上降低了玉米的发病程度。哈茨木霉198、康氏木霉KS浸种处理后的玉米穗粗分别为40.29、40.27 mm,显著高于对照($P<0.05$),促生率分别为21.76%、21.70%;所有木霉菌浸种处理的穗行数都显著高于对照($P<0.05$),其中绿色木霉T43的穗行数最多,为12.50行,促生率为47.06%。哈茨木霉198的穗质量为106.20 g,显著高于对照($P<0.05$),促生率达到177.07%;哈茨木霉212的百粒重显著高于对照和其他木霉菌处理($P<0.05$),达

39.16 g, 促生率为 29.20%; 所有木霉菌浸种处理后的玉米产量均显著高于对照 ($P < 0.05$), 其中康氏

木霉 KS 的产量达 6 353.74 kg/hm, 显著高于对照和其他木霉菌处理 ($P < 0.05$), 促生率达到 61.26%。

表 4 木霉菌处理对接种禾谷镰孢菌后玉米产量的影响
Tab.4 Effect of *Trichoderma* treatments on the yield of maize after inoculation with *Fusarium graminearum*

处理 Treatments	木霉菌株 <i>Trichoderma</i> <i>starins</i>	穗长/cm Ear length	穗粗/mm Ear thickness	穗行数 Rows per ear	行粒数 Seeds per row	凸尖长/cm Length of convex tip	穗质量/g Ear weight	百粒质量/g 100 grain weight	产量/ (kg/hm ²) Yield
包衣处理 Seed coating	哈茨木霉 198	13.59± 0.92ab	36.90± 1.82a	11.71± 0.52ab	22.14± 2.64a	0.64± 0.23b	82.57± 11.64ab	28.52± 0.01d	5 641.67± 260.48ab
	康氏木霉 KS	14.96± 0.56a	36.76± 0.83a	10.89± 0.68ab	19.11± 2.62a	1.04± 0.61ab	73.89± 8.57abc	28.63± 0.06d	5 075.19± 218.68bc
	哈茨木霉 NF9	13.56± 0.67ab	37.94± 1.56a	12.22± 0.41a	22.78± 2.30a	0.70± 0.27b	87.00± 10.79a	28.31± 0.03e	5 970.14± 188.58a
	哈茨木霉 212	11.54± 0.75b	35.97± 1.28a	10.00± 0.60b	15.23± 2.07a	1.00± 0.09ab	54.92± 7.09bcd	30.81± 0.03a	4 651.39± 244.27cd
	绿色木霉 T43	12.82± 0.63ab	36.59± 1.22a	11.60± 0.40ab	19.90± 2.55a	0.97± 0.13ab	67.30± 8.96abc	30.58± 0.04b	5 428.27± 146.73ab
	绿色木霉 60	13.22± 1.20ab	31.52± 3.11b	11.33± 0.67ab	14.67± 2.33a	1.45± 0.48a	34.67± 8.19d	30.17± 0.06c	3 575.64± 121.2d
	CK2	11.68± 0.57b	36.68± 0.77a	11.56± 0.44ab	18.67± 1.57a	1.10± 0.14ab	44.63± 260cd	27.98± 0.05f	4 147.59± 270.45cd
浸种处理 Seed soaking	哈茨木霉 198	16.54± 0.40a	40.29± 0.85a	11.60± 0.40a	29.00± 0.89a	1.00± 0.34abc	106.20± 7.94a	31.17± 0.01c	5 610.06± 399.75ab
	康氏木霉 KS	13.33± 0.44b	40.27± 1.19a	11.82± 0.33a	22.18± 1.27ab	0.87± 0.20bc	83.55± 6.74ab	32.31± 0.01b	6 353.74± 191.77a
	哈茨木霉 NF9	14.20± 0.44ab	35.78± 1.53ab	11.20± 0.53a	20.80± 2.71b	0.62± 0.15c	71.00± 7.94bc	29.46± 0.02f	5 302.14± 17.19b
	哈茨木霉 212	14.08± 0.68ab	36.15± 1.45ab	10.80± 0.44a	14.70± 2.35bc	1.66± 0.38ab	61.90± 8.06bc	39.16± 0.00a	4 973.78± 277.39b
	绿色木霉 T43	14.09± 1.12ab	35.89± 1.87ab	12.50± 0.33a	19.50± 2.39bc	1.46± 0.43abc	74.50± 13.08ab	30.19± 0.07e	5 450.29± 358.21b
	绿色木霉 60	11.97± 0.84b	34.98± 1.63ab	10.53± 0.63a	16.93± 2.06bc	0.83± 0.12bc	62.93± 9.01bc	30.24± 0.01de	5 256.38± 167.04b
	CK1	14.55± 1.67ab	33.09± 3022b	8.50± 0.96b	12.50± 2.18c	1.80± 0.29a	38.33± 13.38c	30.31± 0.01d	3 940.13± 236.71c

3 结论与讨论

本研究通过田间试验发现,木霉菌株的包衣处理对玉米茎腐病的防治效果更好,绿色木霉 T43 和康氏木霉 KS 包衣处理对禾谷镰孢茎腐病防治效果分别达 54.21%、32.71%;木霉菌株浸种处理对玉米的增产效果更好,绿色木霉 T43 浸种处理后,接种拟轮枝镰孢菌的前提下,玉米产量为 6 760.24 kg/hm²,促生率达 48.63%;康氏木霉 KS 浸种处理后,接种禾谷镰孢菌的前提下,玉米产量为 6 353.74 kg/hm²,对玉米产量的促生率达 61.26%,对玉米产量表现出较好的促生效果。因此,绿色木霉 T43 和康氏木霉 KS 这 2 株生防木霉菌株,具有较好的田间生防应用潜力,可作为后期木霉菌剂研发的备选菌株,进而开展玉米茎腐病的绿色防控

研究。

由于田间试验是在复杂的土壤环境和自然的气候条件下进行的,生防菌的生防效果在田间容易受到多种因素的制约导致试验结果不稳定,且田间试验很难完全重复,不同年份、不同地点的试验结果可能存在一定的偏差。而本研究只在一个试验区对玉米的一个生长季进行了生防菌的田间防治效果研究,试验结果相对来说具有一定的局限性,后续还需进行多年多试点的田间防治效果研究,以获得更准确可靠的数据,为玉米茎腐病的有效防控提供理论依据。

木霉菌对植物病害的防治效果与木霉菌本身的生物学特性、在土壤中的定殖能力及其生防机制息息相关^[32-34]。本研究发现,接种同种茎腐病菌后,不同木霉菌同种处理方式的防治效果差异较大,对

玉米产量影响的差异也较大,可能是由于木霉菌株种间或种内的差异造成的。据报道,不同木霉菌株可产生不同种类的天然产物,这些天然产物在木霉菌生防应用中发挥着重要的作用^[35]。华丽霞等^[36]发现,绿木霉 T23、哈茨木霉 T22 菌株能产生 β -1,3-葡聚糖酶而哈茨木霉 G30 菌株不具备此功能, T23、T22 菌株对月季灰霉病的防治效果优于 G30 菌株,证明了产生 β -1,3-葡聚糖酶可能是木霉菌株防治植物病害的生防机制之一。本试验只研究了不同木霉菌株对玉米茎腐病的防治效果和对玉米产量的影响,并未明确不同木霉菌株的作用机制,不同木霉菌株的生防机制仍有待进一步研究与探讨。

木霉菌的处理方式对植物病害的防治效果有一定的影响^[37]。本研究发现,接种同种茎腐病菌后,同一木霉菌株的包衣处理和浸种处理的防治效果差异较大,总体来说,木霉菌株包衣处理的防治效果优于浸种处理。木霉菌株浸种处理对玉米种子的作用时间相对较短,定殖在玉米种子上的木霉菌数量有限且不稳定,只能抑制玉米种子携带的病原菌,对土传病害的防治能力相对较弱^[38]。而木霉菌株包衣处理会在玉米种子表面形成一层保护膜,玉米播种后木霉菌会缓慢生长、大量繁殖,且长期、持续地释放木霉菌的有效成分,使木霉菌株稳定地定殖在玉米植株和土壤中,持续抑制病原菌的生长,因而防治效果较好;同时木霉包衣处理使用的壳聚糖对多种植物病害有较好的抑制作用,且能诱导玉米植株的防御反应,提高植物的抗病性^[39]。王献惠等^[33]用木霉包衣处理防治花生病害的效果优于木霉菌浸种处理,且发现木霉菌包衣处理后田间木霉菌的数量更多。

禾谷镰孢菌和拟轮枝镰孢菌是 2 种造成玉米茎腐病的优势病原菌,二者的生物学特性存在种间差异^[40-41]。本研究发现,玉米植株分别接种禾谷镰孢菌和拟轮枝镰孢菌后,同种木霉菌的同种处理方式对不同病原菌引起的玉米茎腐病的防治效果差异较大,如绿色木霉 T43 的包衣处理对禾谷镰孢茎腐病的防治效果达 54.20%,而对拟轮枝镰孢茎腐病的防治效果仅为 6.27%,总的来说,木霉菌对禾谷镰孢菌引起的玉米茎腐病的防治效果较好。许苗苗^[42]研究认为,拟轮枝镰孢菌会产生大量无色的小型分生孢子,对木霉菌的抵抗能力较强,而禾谷镰孢菌产生的大型分生孢子的抵抗能力较弱,这可能是木霉菌株对拟轮枝镰孢菌引起的玉米茎腐病

防治效果较差的原因。同时,气候条件也会影响病原菌的生长,陈悦^[43]研究发现,拟轮枝镰孢菌最适生长的温度是 30℃,禾谷镰孢菌最适温度是 20℃。本研究接种茎腐病菌的时间在 8 月中旬左右,此时田间温度在 30℃左右,适合拟轮枝镰孢菌生长繁殖,因此,拟轮枝镰孢菌引起的玉米茎腐病防治比较困难。

前人报道,生防木霉菌对田间玉米镰孢茎腐病具有较好的防治效果^[19,21,44]。而本试验中,木霉菌对玉米镰孢茎腐病的防效较低,通过比较分析发现,其原因可能在于:首先,本试验选取的玉米材料为高感品种掖 478,玉米在田间的发病程度普遍较重,防治相对比较困难;其次,本研究的接种方法为注茎法,相较于伤根法和菌土覆盖法^[45],注茎法通过在玉米茎部打孔、注射孢子悬浮液的方法能导致茎腐病的发生更重、造成的危害更大;最后,玉米茎腐病的高发期为玉米灌浆期,本研究中,木霉菌处理时期与茎腐病高发期间隔时间较长,田间木霉菌的活性成分和数量均相对有限,对玉米茎腐病的防控相对较弱、防治效果相对较差,因此,今后在应用木霉菌对玉米茎腐病进行田间防治时,应增加后期喷淋或灌根处理试验。

木霉菌在田间防治玉米茎腐病受到多种因素的制约,使木霉菌株不能有效地发挥出其最优效果。后续须对木霉菌生防应用中的影响因素进行优化,并对植物病害防控中木霉-植物-病原菌的互作机制加以深入研究和探讨,从而更加精准、有效地对玉米茎腐病进行防控。

参考文献:

- [1] 钮笑晓,李小波,孙毅,等. 玉米茎腐(青枯)病研究进展[J]. 华北农学报,2020,35(Z):433-440.
NIU X X, LI X B, SUN Y, et al. Research progress of maize stalk rot disease[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(S):433-440.
- [2] 刘冰. 玉米纹枯病和茎腐病生防菌株的分离鉴定及田间防效评价[D]. 长春:吉林大学,2020.
LIU B. Screening and field control effect evaluation of biocontrol strains against corn sheath blight and stalk rot[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [3] 杨蕊,郎剑锋,陆宁海,等. 粉红粘帚霉对玉米茎基腐病的抑菌防病作用[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2016,44(5):28-33.
YANG R, LANG J F, LU N H, et al. Inhibition and protective activities of *Clonostachys rosea* to corn stalk rot[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(5):28-33.
- [4] 侯翔宇,吴瀚翔,张杰,等. 一株拮抗链霉菌 SM3-7 的鉴定及其

- 对玉米茎基腐病的防效[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(6): 1526-1533.
- HOU X Y, WU H X, ZHANG J, et al. Identification and control effect of antagonistic *Streptomyces* SM 3-7 against maize stalk rot disease[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2022, 38(6): 1526-1533.
- [5] 赵美茜, 白忠义, 张祥辉, 等. 菌株 CSR-2 对玉米茎腐病的生防作用及其全基因组序列分析[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(1): 242-249.
- ZHAO M X, BAI Z Y, ZHANG X H, et al. Biocontrol effect of strain CSR-2 on maize stalk rot and complete genome sequence analysis[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2022, 38(1): 242-249.
- [6] 张思奇, 孙丽萍, 赵同雪, 等. 玉米茎基腐病生防菌的筛选及应用[J]. 微生物学通报, 2017, 44(10): 2345-2352.
- ZHANG S Q, SUN L P, ZHAO T X, et al. Screening and application of bio-control bacterium against corn stalk rot caused by *Fusarium graminearum*[J]. Microbiology China, 2017, 44(10): 2345-2352.
- [7] LU Z X, TU G P, ZHANG T, et al. Screening of antagonistic *Trichoderma* strains and their application for controlling stalk rot in maize[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(1): 145-152.
- [8] YASSIN M T, MOSTAFA A A F, AL-ASKAR A A, et al. Antagonistic activity of *Trichoderma harzianum* and *Trichoderma viride* strains against some fusarial pathogens causing stalk rot disease of maize, *in vitro*[J]. Journal of King Saud University - Science, 2021, 33(3): 101363.
- [9] WANG S, SUN L, ZHANG W, et al. *Bacillus velezensis* BM21, a potential and efficient biocontrol agent in control of corn stalk rot caused by *Fusarium graminearum*[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2020, 30(1): 9.
- [10] 冀璇. 甲基营养型芽孢杆菌 ZLS:3 发酵条件优化及对玉米茎腐病的防治效果[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
- JI X. Optimization of fermentation conditions of methylotrophic *Bacillus* ZLS-3 and its control effect on corn stem rot[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020.
- [11] 李志普. 玉米镰孢茎腐病生防菌株的筛选鉴定与菌剂研发[D]. 保定: 河北农业大学, 2023.
- LI Z P. Screening and identification of biological strains and microbial agent research for corn stalk rot caused by *Fusarium* spp.[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2023.
- [12] 刘冰, 周红霞, 赵美茜, 等. 玉米茎腐病生防菌株的筛选及抑菌作用研究[J]. 玉米科学, 2021, 29(6): 164-168.
- LIU B, ZHOU H X, ZHAO M X, et al. Screening of biocontrol strains against corn stalk rot and antifungal mechanisms[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(6): 164-168.
- [13] 郭佳月, 徐素娟, 赵晓霞, 等. 玉米茎腐病拮抗放线菌的筛选及抑菌促生活性鉴定[J]. 玉米科学, 2022, 30(3): 169-177.
- GUO J Y, XU S J, ZHAO X X, et al. Screening of antagonistic actinomycetes against corn stalk rot disease and identification of antimicrobial activity[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(3): 169-177.
- [14] LATZ M A C, JENSEN B, COLLINGE D B, et al. Endophytic fungi as biocontrol agents: elucidating mechanisms in disease suppression[J]. Plant Ecology & Diversity, 2018, 11(5-6): 555-567.
- [15] SOOD M, KAPOOR D, KUMAR V, et al. *Trichoderma*: the secrets of a multitasking biocontrol agent[J]. Plants, 2020, 9(6): 762.
- [16] SALDAÑA-MENDOZA S A, PACIOS-MICHELENA S, PALACIOS-PONCE A S, et al. *Trichoderma* as a biological control agent: mechanisms of action, benefits for crops and development of formulations[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2023, 39(10): 269.
- [17] 张尹强, 郝建秀, 赵远征, 等. 棘孢木霉 PT-29 与枯草芽孢杆菌 S-16 共培养对马铃薯枯萎病的防控作用[J]. 河南农业科学, 2024, 53(3): 95-102.
- ZHANG Y Q, HAO J X, ZHAO Y Z, et al. Study on the control effect of potato fusarium wilt by co-culture of *Trichoderma asperellum* PT-29 and *Bacillus subtilis* S-16[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(3): 95-102.
- [18] 尤佳琪, 吴明德, 李国庆. 木霉在植物病害生物防治中的应用及作用机制[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(6): 966-976.
- YOU J Q, WU M D, LI G Q. Application and mechanism of *Trichoderma* in biological control of plant disease[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2019, 35(6): 966-976.
- [19] 涂广平. 木霉菌颗粒剂 TCF 和种衣剂 XDS 防治玉米几种土传病害的应用研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- TU G P. Study on the application of trichoderma granules TCF and XDS seed coating on several maize soil-borne disease [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [20] 余嘉, 姚丽美, 陈捷. 防治玉米茎腐病的一种新型木霉菌复合种衣剂[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2015, 33(6): 23-29.
- YU J, YAO L M, CHEN J. A novel *Trichoderma*-based seed coating agent in controlling maize seedling stalk rot[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University(Agricultural Science), 2015, 33(6): 23-29.
- [21] 吴晓儒, 陈硕闻, 杨玉红, 等. 木霉菌颗粒剂对玉米茎腐病防治的应用[J]. 植物保护学报, 2015, 42(6): 1030-1035.
- WU X R, CHEN S W, YANG Y H, et al. Application of *Trichoderma* granules in the control of corn stalk rot[J]. Journal of Plant Protection, 2015, 42(6): 1030-1035.
- [22] 殷全玉, 匡志豪, 王景, 等. 黑胫病不同抗性烤烟品种对哈茨木霉的生理响应[J]. 河南农业科学, 2022, 51(9): 88-98.
- YIN Q Y, KUANG Z H, WANG J, et al. Physiological responses of different black shank-resistance flue-cured tobacco varieties to *Trichoderma harzianum*[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(9): 88-98.
- [23] 张春丽. 玉米茎基腐病的发生规律及防治措施[J]. 河南农业, 2023(1): 35-36.
- ZHANG C L. Occurrence regularity and control measures of corn stalk rot[J]. Agriculture of Henan, 2023(1): 35-36.
- [24] 王禹佳, 武估, 李享, 等. 发根农杆菌与绿色木霉对玉米幼苗根系生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(15): 112-117.
- WANG Y J, WU J, LI X, et al. Effects of *Agrobacterium rhizogenes* and *Trichoderma viride* on root growth of maize seedlings[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(15): 112-117.
- [25] 佟响铮. 玉米茎腐病生防菌鉴定及其绿色防控关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- TONG Y Z. Identification of biocontrol bacteria against maize

- stem rot and study on key technologies of green control[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [26] 黄竹,姚艳平. 8株木霉菌挥发性代谢产物对玉米种子的促生作用研究[J]. 种子科技, 2019, 37(4):143-145.
HUANG Z, YAO Y P. Study on the growth-promoting effect of volatile metabolites of eight *Trichoderma* strains on maize seeds[J]. Seed Science & Technology, 2019, 37(4):143-145.
- [27] 景芳,张树武,刘佳,等. 长枝木霉 T6 生防菌剂发酵条件优化及其对辣椒立枯病的防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(1):113-124.
JING F, ZHANG S W, LIU J, et al. Optimization of the fermentation conditions of biocontrol agent *Trichoderma longibrachiatum* T6 and its efficiency against pepper blight[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2020, 36(1):113-124.
- [28] 史丽霞. 玉米秸秆还田的影响因素及其生态效应研究[D]. 晋中:山西农业大学, 2021.
SHI L X. Study on influencing factors and ecological response of returning corn stalk to soil[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2021.
- [29] 宿畅,廉华,马光恕,等. 木霉不同施用方式对黄瓜膜脂过氧化作用、保护性酶活性及枯萎病防效的影响[J]. 植物保护, 2021, 47(2):142-149.
SU C, LIAN H, MA G S, et al. Effect of *Trichoderma* application modes on membrane lipid peroxidation, protective enzyme activity of cucumber seedlings leaf and control effect against *Fusarium wilt*[J]. Plant Protection, 2021, 47(2):142-149.
- [30] 马光恕,梁泉,李梅,等. 木霉菌对黄瓜生理特性及立枯病防治效果的影响[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(2):277-285.
MA G S, LIANG X, LI M, et al. Effect of *Trichoderma* on cucumber damping-off and physiological characteristics[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2021, 37(2):277-285.
- [31] 赵诗杰. 康氏木霉可湿性粉剂的制备及其应用研究[D]. 晋中:山西农业大学, 2022.
ZHAO S J. Study on the preparation and application of *Trichoderma koningii* wettable powder[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2022.
- [32] 赵晓彤,王桂清. 不同培养条件对长枝木霉 SMF2 和哈茨木霉 T39 生长与产孢的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(8):56-64.
ZHAO X T, WANG G Q. Effects of different culture conditions on growth and sporulation of *Trichoderma longibrachiatum* SMF2 and *Trichoderma harzianum* T39[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(8):56-64.
- [33] 王献慧,梁志怀,魏林,等. 哈茨木霉 T₂₋₁₆ 菌剂不同使用方法对花生防病促生长效果的研究[J]. 花生学报, 2012, 41(2):24-27.
WANG X H, LIANG Z H, WEI L, et al. Effect of different application methods of *Trichoderma harzianum* T₂₋₁₆ on peanut growth promotion and disease prevention[J]. Journal of Peanut Science, 2012, 41(2):24-27.
- [34] 邹佳迅,范晓旭,宋福强. 木霉(*Trichoderma* spp.)对植物土传病害生防机制的研究进展[J]. 大豆科学, 2017, 36(6):970-977.
ZOU J X, FAN X X, SONG F Q. Biocontrol mechanism of *Trichoderma* spp. against soilborn plant disease[J]. Soybean Science, 2017, 36(6):970-977.
- [35] EZIASHI E I, UMA N U, ADEKUNLE A A, et al. Effect of metabolites produced by *Trichoderma* species against *Ceratomyces paradoxa* in culture medium[J]. African Journal of Biotechnology, 2006, 5(9):703-706.
- [36] 华丽霞,何炼,蒋秋平,等. 三个木霉菌株防病促生效应[J]. 微生物学通报, 2023, 50(3):1123-1135.
HUA L X, HE L, JIANG Q P, et al. Diseases control and plant growth promotion effect of three *Trichoderma* strains[J]. Microbiology China, 2023, 50(3):1123-1135.
- [37] 陈玉蓉,曹秋林,廉华,等. 向日葵菌核病拮抗木霉菌筛选及防病效果[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(4):846-851.
CHEN Y R, CAO Q L, LIAN H, et al. Screening of *Trichoderma* and their efficiency against sunflower *Sclerotinia* rot[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2022, 38(4):846-851.
- [38] 肖密. 哈茨木霉 T2-16 对西瓜枯萎病防治效果及机理初探[D]. 长沙:湖南农业大学, 2015.
XIAO M. Effect and mechanism of *Trichoderma* inducing watermelon to resistance *Fusarium wilt*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.
- [39] 颜汤帆. 木霉菌生物型种衣剂及其防病机理的研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2010.
YAN T F. Studies on a bio-seed coating agent of *Trichoderma* and the mechanism of disease control[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010.
- [40] DUAN C X, QIN Z H, YANG Z H, et al. Identification of pathogenic *Fusarium* spp. causing maize ear rot and potential mycotoxin production in China[J]. Toxins, 2016, 8(6):186.
- [41] CZEMBOR E, WAŚKIEWICZ A, PIECHOTA U, et al. Differences in ear rot resistance and *Fusarium verticillioides*-produced fumonisin contamination between polish currently and historically used maize inbred lines[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10:449.
- [42] 许苗苗. 不同镰孢菌感染玉米茎部的效能分析[D]. 保定:河北农业大学, 2018.
XU M M. Efficiency analysis of different *Fusarium* species infecting maize stems[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.
- [43] 陈悦. 温度对玉米拟轮枝镰孢菌和禾谷镰孢菌致病性的影响及其机制研究[D]. 保定:河北农业大学, 2022.
CHEN Y. The effect and mechanism of temperature on the pathogenicity of *Fusarium verticillioides* and *Fusarium graminearum*[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022.
- [44] 贺安乐. 木霉菌诱导玉米抗镰孢菌病害机理[D]. 上海:上海交通大学, 2019.
HE A L. Mechanisms of maize resistance against *Fusarium* induced by *Trichoderma*[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [45] 张海东,董怀玉,王丽娟,等. 玉米禾谷镰孢茎腐病和穗腐病抗性鉴定接种方法的比较[J]. 植物保护, 2023, 49(4):239-244.
ZHANG H D, DONG H Y, WANG L J, et al. Comparison of inoculation methods for identification of maize resistance to stalk rot and ear rot caused by *Fusarium graminearum*[J]. Plant Protection, 2023, 49(4):239-244.