

不同种子处理方法下长枝木霉 T6 菌株 对小油菜促生作用及生理特性的影响

郭彩苹,张 禄,孙晨曦,马耀杰,李昕冉,景 涛,徐秉良,张树武

(甘肃农业大学植物保护学院,甘肃省农作物病虫害生物防治工程实验室,甘肃 兰州 730070)

摘要:为了明确长枝木霉 T6 菌株 (*Trichoderma longibrachiatum*) 对小油菜 (*Brassica chinensis*) 促生效果及生理特性的影响,通过水琼脂培养法、浸泡法和灌根法进行种子处理,并测定了长枝木霉 T6 菌株及其孢子悬浮液和发酵滤液处理后小油菜种子活性、根系发育及幼苗叶绿素和可溶性蛋白含量的变化情况。结果表明:与对照相比,采用水琼脂培养法,接种长枝木霉 T6 菌株后小油菜种子发芽率、发芽指数、胚根长度、胚芽长度、幼苗鲜重和干重相对增长率分别为 2.51%、20.55%、70.79%、21.98%、32.00% 和 30.00%,幼苗根系总投影面积、总根表面积、平均根系直径、总根体积和根尖数相对增长率分别为 58.49%、58.79%、18.18%、100.00% 和 77.88%;采用种子浸泡法,浓度为 1.0×10^7 cfu · mL⁻¹ 长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液处理后显著提高了小油菜种子发芽率、发芽指数、胚根长度、胚芽长度、幼苗鲜重和干重,其相对增长率分别为 2.06%、19.60%、82.21%、43.36%、31.58% 和 40.00%,根系总投影面积、总根表面积、平均根系直径、总根体积和根尖数相对增长率分别为 44.19%、45.52%、13.04%、100.00% 和 28.57%;温室盆栽试验表明,长枝木霉 T6 菌株发酵滤液能够显著提高小油菜幼苗叶绿素和可溶性蛋白含量,与对照相比,处理后其叶绿素和可溶性蛋白含量相对增长率分别为 31.95% 和 11.40%。研究表明,水琼脂培养和种子浸泡处理下长枝木霉 T6 菌株对小油菜具有显著促生作用。

关键词:长枝木霉 T6 菌株;小油菜;促生作用;生理特性

中图分类号:S634.3;S154.39 **文献标志码:**A

Effects of *Trichoderma longibrachiatum* T6 on growth promotion and physiological characteristics of *Brassica chinensis* under different seed treatment methods

GUO Caiping, ZHANG Lu, SUN Chenxi, MA Yaojie, LI Xinran, JING Tao, XU Bingliang, ZHANG Shuwu

(College of Plant Protection, Gansu Agricultural University, Engineering Laboratory for
Biological Control of Crop Diseases and Pests, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In this study, the effects of *Trichoderma longibrachiatum* T6 strain and its spore suspension and fermentation filtrate on the changes of seed activity, root development, leaf chlorophyll content and soluble protein content of *Brassica chinensis* were evaluated using different seed treatment methods of water-agar culture, soaking and root irrigation. The results showed that the relative growth rates of seed germination rate, germination index, radicle length, plumule length, fresh weight and dry weight were increased by 2.51%, 20.55%, 70.79%, 21.98%, 32.00% and 30.00% after treating with *T. longibrachiatum* T6 by the method of water-agar culture, respectively. The relative growth rates of total projected root area, total root surface area, average root diameter, total root volume and root tip number were increased by 58.49%, 58.79%, 18.18%, 100.00% and 77.88%, respectively. Using the seed soaking method, the *T. longibrachiatum* T6 spore suspension (1.0×10^7 cfu · mL⁻¹) significantly increased the seed germination rates, germination index, radicle length, plumule length, fresh weight and dry

收稿日期:2021-09-07

修回日期:2021-12-13

基金项目:甘肃农业大学“伏羲杰出人才培养计划”项目(Gaufx-03J03);国家自然科学基金(31860526);甘肃省杰出青年基金(18JR3RA161);甘肃农业大学人才专项经费(2017RCZX-07)

作者简介:郭彩苹(1995-),女,甘肃会宁人,硕士研究生,研究方向为资源利用与植物保护。E-mail: 2241893952@qq.com

通信作者:张树武(1984-),男,甘肃庆阳人,副教授,主要从事作物病害及其综合治理研究。E-mail: zhangsw704@126.com

weight and the relative growth rates by 2.06%, 19.60%, 82.21%, 43.36%, 31.58% and 40.00%, respectively. The relative growth rates of total projected root area, total root surface area, average root diameter, total root volume and root tip number were increased by 44.19%, 45.52%, 13.04%, 100.00% and 28.57%, respectively. Greenhouse experiment showed that the fermentation filtrate of *T. longibrachiatum* T6 significantly increased the chlorophyll and soluble protein contents of *B. chinensis* seedlings. Compared with the control, the relative growth rates of chlorophyll and soluble protein contents were increased by 31.95% and 11.40% after treating with the fermentation filtrate of *T. longibrachiatum* T6, respectively. Therefore, *T. longibrachiatum* T6 strain exhibited significantly promoting effect on *B. chinensis* growth by the application of water agar culture, soaking and root irrigation methods.

Keywords: *Trichoderma longibrachiatum* T6; *Brassica chinensis* L.; growth promotion; physiological characteristics

小油菜(*Brassica chinensis* L.)又名上海青、青梗菜和青菜等^[1],由于其具有口感爽脆、富含维生素、生长周期短及一年四季皆可种植等优点^[2],已成为我国种植面积和范围最广的蔬菜之一^[3]。但是近年来小油菜种植模式单一、化学肥料使用种类单一及其过量使用^[4],导致连作障碍、土壤板结和酸化等一系列问题^[5],使得种子发芽率降低,幼苗生长势降低,甚至严重影响小油菜口感和品质。因此,如何提高种子发芽率、幼苗生长势及育苗效率等成为目前种植小油菜急需解决的问题。

木霉菌(*Trichoderma* spp.)是一类广泛存在于各个生态系统中的真菌^[6],其不仅具有重要的生防价值,还具有促进植物生长、改善植物生长环境、提高植物产量及其产品质量等功能^[7]。贺字典等^[8]研究表明,溶磷木霉菌 tang-10-11 能够将辣椒根际土壤难溶性磷转化成速效性磷,间接促进速效钾和有机质的转化,进而促进了辣椒植株生长,提高辣椒维生素 C 和可溶性糖含量;张成等^[9]发现棘孢木霉 DQ-1 分生孢子粉能够显著促进黄瓜、辣椒、番茄和西瓜幼苗根系数量增多和茎秆增粗;廉华等^[10]发现棘孢木霉菌剂能够提高黄瓜幼苗叶绿素含量、根系活力、可溶性糖及可溶性蛋白等含量,进而提高黄瓜产量和品质;Yu 等^[11]发现木霉菌株 TaspHu1 高浓度孢子悬浮液可以显著提高番茄株高、茎粗、可溶性蛋白和可溶性糖的含量。但是,目前有关采用水琼脂培养法、种子浸泡法和盆栽灌根法处理测定长枝木霉 T6 菌株对小油菜促生作用及生理特性影响方面的报道较少。

因此,本试验通过种子萌发和幼苗盆栽试验测定了长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液和发酵滤液对小油菜促生作用及生理特性的影响,分析和讨论长枝木霉 T6 菌株对小油菜的促生效果及初步作用机制,以期为提高小油菜产量和品质提供理论和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试菌株 供试菌株为长枝木霉 T6 菌株,由甘肃农业大学植物保护学院植物病理学实验室提供,保藏于中国科学院微生物研究所,保藏号为 CGMCC No.13183。

1.1.2 供试品种 小油菜品种为‘德高’,采购于甘肃省农业科学院种子有限责任公司。

1.2 试验方法

1.2.1 长枝木霉 T6 菌株分生孢子悬浮液配制 悬浮液参照张树武等^[12]方法配制。长枝木霉 T6 菌株在 PDA 平板培养 6 d 后,在其培养基中加入 1 滴 Tween-80 和 5 mL 无菌水配制成成分生孢子悬浮液,并将其转移到无菌离心管中,经振荡充分混匀后,利用血球计数板计算其浓度,最终配制浓度为 1.0×10^7 cfu · mL⁻¹ 孢子悬浮液备用。

1.2.2 长枝木霉 T6 菌株发酵滤液制备 取 1 mL 浓度为 1.0×10^7 cfu · mL⁻¹ 长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液加入到 70 mL 马铃薯葡萄糖液体培养基中,同时取 1 mL 无菌水加入到 70 mL 马铃薯葡萄糖液体培养基中作为对照。将两者置于温度为 25℃,转速为 150 r · min⁻¹ 的摇床中培养;8 d 后,将培养液经 8 000 r · min⁻¹ 离心 20 min 后吸取上清液,并利用双层滤膜过滤,加入悬浮液处理获得的滤液即为长枝木霉 T6 菌株发酵滤液。每个处理和对照均重复 6 次。

1.2.3 长枝木霉 T6 菌株及其孢子悬浮液对小油菜种子活性及幼苗生长的影响 水琼脂培养法:挑选饱满健康的小油菜种子,利用 75% 酒精浸泡消毒 2 min 后,经无菌水充分冲洗 3 次,用无菌吸水纸吸取多余水分后备用。将其种植于水琼脂培养基一侧 1/3 处($d=8.5$ cm),并在其对应的另一侧 1/3 处接种直径为 0.5 cm 长枝木霉 T6 菌株菌饼和空白水琼

脂菌饼分别作为处理和对照。待接种后,将其分别置于 25℃ 培养箱中光暗交替培养(16 h/8 h)。每个培养基中种植 5 粒小油菜种子,每个处理和对照均重复 6 次。

浸泡法:将消毒后的种子分别置于浓度为 1.0×10^7 cfu · mL⁻¹长枝木霉 T6 孢子悬浮液和无菌水中浸泡 2 h,分别作为处理和对照。然后,分别将处理和对照组种子置于含有一层纱布和两层滤纸的无菌培养皿($d=8.5$ cm)中,并置于 25℃ 培养箱中光暗交替培养(16 h/8 h)。每个培养皿中种植 5 粒小油菜种子,每个处理和对照均重复 6 次。

待小油菜种子胚根长度超过种子长度一半时开始统计发芽率和发芽指数,待处理 7 d 后测定幼苗胚根和胚芽长度及干、鲜重,并利用根系扫描仪(WinRHIZO pro LA2400)测定根系总投影面积、总根表面积、平均根系直径、总根体积和根尖数。每个处理和对照均重复 6 次。

发芽率(%) = (发芽种子总数/供试种子总数) × 100

$$\text{发芽指数} = \sum G_i / D_i$$

式中, G_i 为 t 时间内发芽数, D_i 为相应发芽天数。

1.2.4 长枝木霉 T6 菌株发酵滤液对小油菜幼苗生理特性的影响 将饱满、健康且经消毒的小油菜种子种植于含有营养土的育苗盘中(32 穴),每穴种植 5 粒。种植 10 d 后,取 20 mL 长枝木霉 T6 菌株发酵滤液浇灌于小油菜根系周围土壤中,对照则浇灌等体积马铃薯葡萄糖滤液,每个处理和对照均重复 6 次。然后,将其置于温室中培养(培养温度 25℃,相对湿度 RH>60%和光照 16 h/8 h),每隔 2 d 浇一次水,并在处理 30 d 后分别测定小油菜幼苗叶绿素和可溶性蛋白含量。参考陈毓荃^[13]方法,采用分光光

度法测定小油菜幼苗叶绿素含量;参考杨玉芳^[14]和邱葵等^[15]方法,采用考马斯亮蓝 G-250 法测定小油菜幼苗可溶性蛋白含量。每个处理及对照均重复 3 次。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件和 SPSS 21.0 软件整理分析数据,采用 Duncan's 新复极差法对各处理进行多重比较($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水琼脂培养下长枝木霉 T6 菌株对小油菜种子活性的影响

在水琼脂培养基上,长枝木霉 T6 菌株对小油菜种子活性具有显著的影响(图 1,表 1)。经长枝木霉 T6 菌株处理的小油菜种子发芽整齐,幼苗生长发育良好,胚根长且粗壮(图 1B),而对照生长势相对较弱,胚根较短(图 1A)。与对照相比,长枝木霉 T6 菌株处理后的小油菜种子发芽率、发芽指数、幼苗胚根长度、胚芽长度、鲜重和干重的相对增长率分别为 2.51%、20.55%、70.79%、21.98%、32.00% 和 30.00%(表 1)。

2.2 水琼脂培养下长枝木霉 T6 菌株对小油菜根系发育的影响

与对照相比,长枝木霉 T6 菌株能够显著促进小油菜根系生长发育(图 2,表 2)。经长枝木霉 T6 菌株处理的小油菜胚根发育良好,侧根数量多且发达(图 2B),而对照侧根数量相对较少(图 2A)。长枝木霉 T6 菌株处理的幼苗根系总投影面积、总根表面积、平均根系直径、总根体积和根尖数显著高于对照,分别较对照增加 58.49%、58.79%、18.18%、100.00% 和 77.88%(表 2)。

表 1 长枝木霉 T6 菌株对小油菜种子活性及幼苗形态特征的影响

Table 1 Effect of *Trichoderma longibrachiatum* T6 strain on the seed vigor and seedlings morphological characteristics of *Brassica chinensis*

处理 Treatment	发芽率 Germination rate/%	发芽指数 Germination index	单株胚根长度 Radicle length per plant/cm	单株胚芽长度 Plumule length per plant/cm	单株鲜重 Fresh weight per plant/g	单株干重 Dry weight per plant/g
长枝木霉 T6 菌株处理 <i>Trichoderma longibrachiatum</i> T6 strain treatment	92.43±0.27a	11.03±0.12a	5.38±0.33a	2.22±0.07a	0.33±0.03a	0.13±0.01a
CK	90.17±0.18b	9.15±0.05b	3.15±0.53b	1.82±0.13b	0.25±0.01b	0.10±0.01b

注:表中发芽率和发芽指数为处理后第 2 天数据;胚根长度、胚芽长度、鲜重和干重为处理后第 7 天数据。同列数据后不同小写字母表示 Duncan 氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

Note: The germination rate and germination index in the table are the data on the 2nd day after treatment; the radicle length, germ length, fresh weight and dry weight are the data on the 7th day after treatment. Data in a column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$ based on Duncan's multiple range test. The same below.

2.3 浸泡处理下长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液对小油菜种子活性的影响

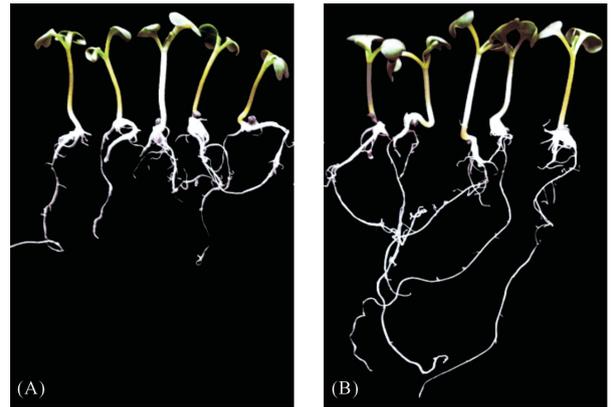
经长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液浸泡处理的小油菜种子发芽速率和幼苗生长速率显著增加,并且处理后其幼苗生长健壮,胚芽和胚根长且粗壮(图 3B),而对照生长势相对较弱,根系较短且侧根较少(图 3A)。与对照相比,经长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液浸泡处理的种子发芽率、发芽指数、幼苗胚根长度、胚芽长度、鲜重和干重的相对增长率分别为 2.06%、19.60%、82.21%、43.36%、31.58%和 40.00%(表 3)。

2.4 浸泡处理下长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液对小油菜根系发育的影响

与对照相比,经长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液浸泡处理的小油菜胚根发育良好,侧根数量多且发达(图 4B),而对照侧根数量相对较少且较短(图 4A)。长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液浸泡处理后,小油菜根系总投影面积、总根表面积、平均根系直径、总根体积和根尖数较对照分别增加 44.19%、45.52%、13.04%、100.00%和 28.57%(表 4)。

2.5 长枝木霉 T6 菌株发酵滤液对小油菜幼苗叶绿素和可溶性蛋白质含量的影响

结果表明,长枝木霉 T6 菌株发酵滤液对小油菜幼苗叶绿素和可溶性蛋白含量具有显著的影响。



注:A:对照;B:长枝木霉 T6 菌株处理。

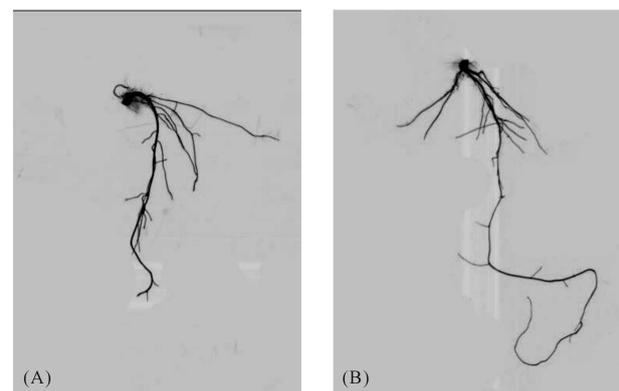
Note: A: control; B: *Trichoderma longibrachiatum* T6 strain treatment.

图 1 长枝木霉 T6 菌株对小油菜幼苗生长的影响
Fig.1 Effect of *Trichoderma longibrachiatum* T6 strain on the seedling of *Brassica chinensis* growth

表 2 长枝木霉 T6 菌株对小油菜单株根系生长发育的影响

Table 2 Effect of *Trichoderma longibrachiatum* T6 strain on the root growth and development of *Brassica chinensis*

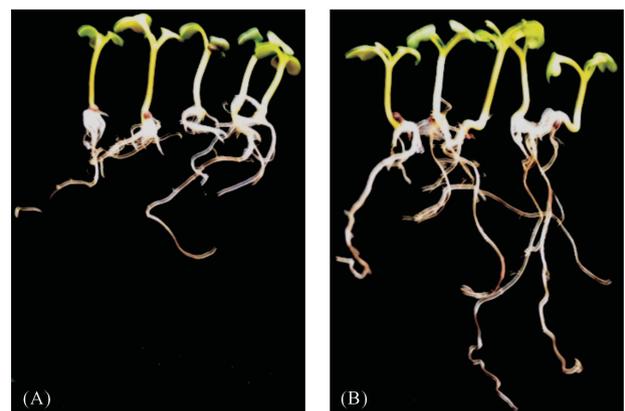
处理 Treatment	总投影面积 Total projected root area/cm ²	总根表面积 Total root surfacearea/cm ²	平均根系直径 Average root diameter/mm	总根体积 Total root volume/cm ³	根尖数 Root tip number
长枝木霉 T6 菌株处理 <i>Trichoderma</i> <i>longibrachiatum</i> T6 strain treatment	0.84±0.05a	2.62±0.16a	0.26±0.01a	0.02±0.001a	74.00±2.41a
CK	0.53±0.03b	1.65±0.09b	0.22±0.01b	0.01±0.001b	41.60±2.66b



注:A:对照;B:长枝木霉 T6 菌株处理。

Note: A: control; B: *Trichoderma longibrachiatum* T6 strain treatment.

图 2 长枝木霉 T6 菌株对小油菜根系生长发育的影响
Fig.2 Effects of *Trichoderma longibrachiatum* T6 strain on the root growth and development of *Brassica chinensis*



注:A:对照;B:长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液处理。

Note: A: control; B: *Trichoderma longibrachiatum* T6 spore suspension treatment.

图 3 长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液对小油菜幼苗生长的影响
Fig.3 Effect of the spore suspension of *Trichoderma longibrachiatum* T6 on the seedling of *Brassica chinensis* growth

经长枝木霉 T6 菌株发酵滤液处理 30 d 后,小油菜幼苗叶绿素和可溶性蛋白含量均显著增加,与对照相比,其叶绿素和可溶性蛋白含量的相对增长率分别为 31.95% 和 11.40% (表 5)。

3 讨论与结论

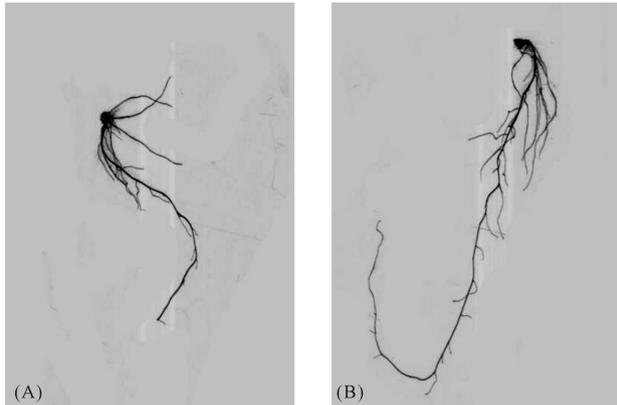
前人关于利用木霉菌促进植物生长方面的相关研究,主要集中在利用其提高植物种子发芽率、幼苗形态特性、根系生长发育及幼苗生理生化酶活

性等,如 Zhao 等^[16]研究发现棘孢木霉 Q1 能增加黄瓜根系活性进而促进根系生长;Elkelish 等^[17]发现哈茨木霉能通过增强番茄叶绿素的合成和必需营养元素(氮、磷和钾)的吸收,促进其生长;Martinez-Medina 等^[18]研究发现木霉菌通过调控激素水平来促进甜瓜幼苗的生长。本试验通过不同种子处理方法下测定长枝木霉 T6 菌株对小油菜促生作用及生理特性的影响,发现长枝木霉 T6 菌株及其孢子悬浮液能够显著提高小油菜种子的活性,改善幼苗

表 3 长枝木霉 T6 孢子悬浮液对小油菜种子活性及幼苗形态特征的影响

Table 3 Effects of the spore suspension of *Trichoderma longibrachiatum* T6 on the seed vigor and seedlings morphological characteristics of *Brassica chinensis*

处理 Treatment	发芽率 Germination rate/%	发芽指数 Germination index	单株胚根长度 Radicule length per plant/cm	单株胚芽长度 Plumule length per plant/cm	单株鲜重 Fresh weight per plant/g	单株干重 Dry weight per plant/g
长枝木霉 T6 菌株 孢子悬浮液处理 <i>Trichoderma longibrachiatum</i> T6 spore suspension treatment	91.01±0.42a	10.86±0.17a	5.43±0.34a	2.05±0.20a	0.25±0.03a	0.07±0.06a
CK	89.17±0.18b	9.08±0.04b	2.98±0.20b	1.43±0.08b	0.19±0.01b	0.05±0.02b



注:A:对照;B:长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液处理。

Note: A: control; B: *Trichoderma longibrachiatum* T6 spore suspension treatment.

图 4 长枝木霉 T6 菌株孢子悬浮液对小油菜根系生长发育的影响

Fig.4 Effects of the spore suspension of *Trichoderma longibrachiatum* T6 on the root growth and development of *Brassica chinensis*

表 5 长枝木霉 T6 菌株发酵滤液对小油菜幼苗叶绿素和可溶性蛋白含量的影响

Table 5 Effects of *Trichoderma longibrachiatum* T6 fermentation filtrate on the chlorophyll and soluble protein content of *Brassica chinensis* seedlings

处理 Treatment	叶绿素含量 Chlorophyll content / (mg · g ⁻¹)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content / (mg · g ⁻¹)
长枝木霉 T6 菌株 发酵滤液处理 <i>Trichoderma longibrachiatum</i> T6 fermentation filtrate treatment	4.13±0.10a	45.24±0.85a
CK	3.13±0.06b	40.61±0.42b

注:表中叶绿素和可溶性蛋白质含量为处理后第 30 天数据。

Note: The contents of chlorophyll and soluble protein in the table are the data on the 30th day after treatment.

表 4 长枝木霉 T6 孢子悬浮液对小油菜单株根系生长发育的影响

Table 4 Effects of the spore suspension of *Trichoderma longibrachiatum* T6 on the root growth and development of *Brassica chinensis*

处理 Treatment	总投影面积 Total projected root area/cm	总根表面积 Total root surface area /cm ²	平均根系直径 Average root diameter /mm	总根体积 Total root volume /cm ³	根尖数 Root tip number
长枝木霉 T6 菌株 孢子悬浮液处理 <i>Trichoderma longibrachiatum</i> T6 spore suspension treatment	0.62±0.03a	1.95±0.09a	0.26±0.01a	0.02±0.001a	55.80±2.41a
CK	0.43±0.03b	1.34±0.09b	0.23±0.01b	0.01±0.001b	43.40±2.66b

根系生长发育状况。吴利民等^[19]利用不同稀释倍数木霉发酵液浸泡番茄种子 10 d 后,发现处理后番茄种子发芽率及植株生长速度显著提高;刘连妹等^[20]研究发现哈茨木霉处理后番茄幼苗的株高和根长均较对照增加,与本试验结果基本一致。此外,本试验发现长枝木霉 T6 菌孢子悬浮液对小油菜幼苗根系干重、胚芽长度和胚根长度促生作用优于水琼脂培养法。

另外,有研究表明叶绿素和可溶性蛋白含量与植物幼苗的生长发育密切相关,并且可溶性蛋白可为植物种子萌发提供营养元素,是衡量种子活性的重要指标之一^[21]。本试验发现长枝木霉 T6 菌株发酵滤液可显著提高小油菜幼苗叶绿素和可溶性蛋白含量。张树武等^[22]发现不同稀释倍数深绿木霉发酵液均能够提高黑麦草幼苗叶绿素、可溶性蛋白含量和与抗性相关酶的活性,进而促进其生长;王依纯等^[23]发现 3 种木霉(棘孢木霉、哈茨木霉和拟康氏木霉)对黄瓜幼苗叶绿素含量、根系活力和根系总吸收面积等具有显著提高作用。

因此,本试验发现 2 种处理方法(水琼脂培养法和种子浸泡法)下长枝木霉 T6 菌株及其孢子悬浮液对小油菜种子活性和根系生长发育具有较强的促生作用,并且其发酵滤液对小油菜叶绿素和可溶性蛋白质含量具有显著提高作用,但是有关不同处理方法下长枝木霉 T6 菌株对小油菜促生作用机制还有待进一步深入研究。

参 考 文 献:

[1] 胡锦彬,王婉婷,薄永明.青梗菜品种初绿速成的选育与应用[J].浙江农业科学,2018,59(8):1370-1372.
HU J B, WANG W T, BO Y M. Breeding and application of *Brassica chinensis* L. variety [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2018, 59(8): 1370-1372.

[2] 王剑功,李江阔,张鹏,等.不同浓度 1-甲基环丙烯处理对油菜保鲜效果的影响[J].食品科技,2016,41(3):40-45.
WANG J G, LI J K, ZHANG P, et al. Different concentrations of 1-MCP treatment on preservation of rapeseed [J]. Food Science and Technology, 2016, 41(3): 40-45.

[3] 付宇童,孙彤,王林,等.纳米铜对小油菜(*Brassica chinensis* L.)种子发芽和幼苗生理生化特性的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(11):2524-2531.
FU Y T, SUN T, WANG L, et al. Effects of copper nanoparticles on seed germination and physiological and biochemical characteristics of *Brassica chinensis* L. [J]. Journal of Agro-environment Science, 2020, 39(11): 2524-2531.

[4] 耿计彪,张超,李强,等.硫肥对小油菜产量、品质及生理特征的

影响[J].中国土壤与肥料,2018,(4):121-125.
GENG J B, ZHANG C, LI Q, et al. Effects of sulfur fertilizer on yield, quality and physiological characteristic of rape (*Brassica chinensis* L.) [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018, (4): 121-125.

[5] 孔跃,徐有明,张家成,等.生物有机肥对小油菜生长及品质的影响[J].安徽农业科学,2007,35(2):479,483.
KONG Y, XU Y M, ZHANG J C, et al. Effect of the biological organic fertilizer on the growth and quality of Coles [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(2): 479, 483.

[6] 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.

[7] 韩长志.植物病原拮抗菌木霉属真菌的研究进展[J].江苏农业学报,2016,32(4):946-952.
HAN C Z. Advances in utilization of antagonistic *Trichoderma* spp. against plant pathogens [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2016, 32(4): 946-952.

[8] 贺字典,高玉峰,叶雪玲,等.溶磷木霉菌对辣椒促生效果[J].北方园艺,2021,(13):62-68.
HE Z D, GAO Y F, YE X L, et al. Effects of *Trichoderma* phosphate solubilizing on the pepper growth [J]. Northern Horticulture, 2021, (13): 62-68.

[9] 张成,廖文敏,薛鸣,等.棘孢木霉 DQ-1 分生孢子固体发酵优化及其对 4 种作物幼苗生长的影响[J].中国生物防治学报,2021,37(2):315-322.
ZHANG C, LIAO W M, XUE M, et al. Optimization of solid substrate and conditions of *Trichoderma asperellum* DQ-1 and effect on four crop seedlings growth [J]. Chinese Journal of Biological Control, 2021, 37(2): 315-322.

[10] 廉华,马光恕,李梅,等.棘孢木霉菌剂对黄瓜生理特性及产质量的影响[J].中国农业大学学报,2021,26(6):42-52.
LIAN H, MA G S, LI M, et al. Effects of *Trichoderma asperellum* agents on physiological characteristics, yield and quality of cucumber [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(6): 42-52.

[11] YU Z Y, WANG Z Y, ZHANG Y Z, et al. Biocontrol and growth-promoting effect of *Trichoderma asperellum* TaspHu1 isolate from *Juglans mandshurica* rhizosphere soil [J]. Microbiological Research, 2021, 242: 126596.

[12] 张树武,徐秉良,程玲娟,等.深绿木霉对白三叶草促生作用及生理生化特性的影响[J].草业学报,2015,24(2):161-167.
ZHANG S W, XU B L, CHENG L J, et al. Effects of *Trichoderma aureoviride* fermentation on the growth and physiological characteristics of *Trifolium repens* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(2): 161-167.

[13] 陈毓荃.生物化学实验方法和技术[M].北京:科学出版社,2002:197-199.
CHEN Y Q. Biochemical experimental methods and techniques [M]. Beijing: Science Press, 2002: 197-199.

- [14] 杨玉芳. 蛋白质含量测定方法[J]. 明胶科学与技术, 2007, 27(2): 98-100.
YANG Y F. Method for determining protein content[J]. The Science and Technology of Gelatin, 2007, 27(2): 98-100.
- [15] 邱葵, 司天润. 用考马斯亮蓝测定动物药材中可溶性蛋白质含量方法初探[J]. 中国中医药信息杂志, 2007, 14(4): 49-50.
QIU K, SI T R. Method research of measuring soluble protein contents of animal material rough extraction using Coomassie brilliant blue[J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2007, 14(4): 49-50.
- [16] ZHAO L, ZHANG Y Q. Effects of phosphate solubilization and phytohormone production of *Trichoderma asperellum* Q1 on promoting cucumber growth under salt stress [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(8): 1588-1597.
- [17] ELKELISH A A, ALHAITHLOUL H A S, QARI S H, et al. Pre-treatment with *Trichoderma harzianum* alleviates waterlogging-induced growth alterations in tomato seedlings by modulating physiological, biochemical, and molecular mechanisms[J]. Environmental and Experimental Botany, 2020, 171: 103946.
- [18] MARTÍNEZ-MEDINA A, DEL MAR ALGUACIL M, PASCUAL J A, et al. Phytohormone profiles induced by *Trichoderma* isolates correspond with their biocontrol and plant growth-promoting activity on melon plants [J]. Journal of Chemical Ecology, 2014, 40(7): 804-815.
- [19] 吴利民, 郭立季, 陆宁海, 等. 木霉对番茄种子活力及幼苗生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(21): 5482-5482, 5492.
WU L M, GUO L J, LU N H, et al. Effect of the metabolic product of *Trichoderma* on seed vigour and seedling growth of tomato[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(21): 5482-5482, 5492.
- [20] 刘连妹, 钱雯霞, 屈海泳. 哈茨木霉孢子悬浮液对番茄幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2007, (4): 96-98.
LIU L M, QIAN W X, QU H Y. Effects of *Trichoderma harzianum* spores suspension on growth and antioxidases activity of tomato seedling[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2007, (4): 96-98.
- [21] 郭丽璇, 耿国涛, 任涛, 等. 施肥管理对油菜种子萌发特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (3): 63-68.
GUO L X, GENG G T, REN T, et al. Effect of fertilization management on germination characteristics of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020, (3): 63-68.
- [22] 张树武, 徐秉良, 程玲娟. 深绿木霉发酵液对黑麦草促生作用及生理生化特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 157-162.
ZHANG S W, XU B L, CHENG L J. Effects of fermentation medium of *Trichoderma aureoviride* on growth and physiological characteristics of ryegrass[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 157-162.
- [23] 王依纯, 廉华, 马光恕, 等. 木霉不同施用方式对黄瓜幼苗质量特性及枯萎病防效的影响[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(3): 416-425.
WANG Y C, LIAN H, MA G S, et al. Effects of application modes of *Trichoderma* on seedling quality characteristics of cucumber and control effect against fusarium wilt[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2019, 35(3): 416-425.

(上接第 149 页)

- [15] 李晓龙, 高聚林, 胡树平, 等. 不同深耕方式对土壤三相比及玉米根系构型的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 1-7, 29.
LI X L, GAO J L, HU S P, et al. Effects of various cultivation approaches on the three-phase ratio of soil and root system structure of maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 1-7, 29.
- [16] 于晓芳, 孙洪利, 高聚林, 等. 深松对不同耐密性春玉米增密增产调控机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 35-46.
YU X F, SUN H L, GAO J L, et al. Mechanism behind densification and yield increase of spring maize with different density-tolerance regulated by subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(13): 35-46.
- [17] 张瑞富, 杨恒山, 张玉芹, 等. 深松对春玉米根系分布及氮素积累与利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 176-181.
ZHANG R F, YANG H S, ZHANG Y Q, et al. Effects of subsoiling on roots distribution and nitrogen accumulation and utilization of spring maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 176-181.
- [18] CHEN Y X, CHEN J, ZHANG Y F, et al. Effect of harvest date on shearing force of maize stems[J]. Livestock Science, 2007, 111(1/2): 33-44.
- [19] 薛军, 王克如, 谢瑞芝, 等. 玉米生长后期倒伏研究进展[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1845-1854.
XUE J, WANG K R, XIE R Z, et al. Research progress of maize lodging during late stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(10): 1845-1854.
- [20] 于晓芳, 雷娟玮, 高聚林, 等. 提升土壤肥力可实现玉米机械粒收增产减损[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1061-1075.
YU X F, LEI J W, GAO J L, et al. Soil fertility improvement increases maize yield and reduces loss during mechanized grain harvest[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2021, 29(6): 1061-1075.