

袁 扬,王胤晨,韩玉竹,等. 木霉菌在农业中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学,2018,46(3):10-14.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.03.003

木霉菌在农业中的应用研究进展

袁 扬¹,王胤晨¹,韩玉竹²,张锦华¹,曾 兵²

(1. 贵州省畜牧兽医研究所,贵州贵阳 550000; 2. 西南大学荣昌校区动物科学系,重庆荣昌 402460)

摘要:木霉菌为一类次级定殖真菌,广泛分布于自然界中,是组成土壤微生物群落的重要部分,常见于植物残体、有机质土壤、腐殖质、种子、植物根际等。近几年来,木霉菌被普遍认为是最有可能代替多种化学杀菌剂的生防因子,它们作为一类能够促进作物生长的、资源丰富的拮抗微生物,在发展可持续农业中具有越来越重要的作用。

关键词:木霉菌;生物防治;促生;作用机制;农业

中图分类号: S182 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)03-0010-04

木霉菌 (*Trichoderma*) 隶属于半知菌亚门 (Deuteromycotina)、丝孢纲 (Hyphomycetes)、丝孢目 (Hyphomycetales)、丝孢科 (Hyphomycetaceae), 是一类重要的植物病害生防真菌, 且对植物有显著的促生作用。Weinding 于 1934 年首先通过研究发现了木质素木霉 (*Trichoderma lignorum*) 对土壤中的几种真菌有拮抗作用, 其后人们逐渐认识到木霉菌对土壤病害的防治作用^[1]。近几年来, 木霉菌被普遍认为是最有可能代替多种化学杀菌剂的生防因子, 它们作为一类能够促进作物生长的、资源丰富的拮抗微生物, 在发展可持续农业中具有越来越重要的作用^[2]。

1 木霉菌在生物防治中的应用及作用机制

1.1 木霉菌在生物防治中的应用

在传统农作物栽培中, 长期单一高产品种的大面积种植和农药化肥的大量施用造成农田生态系统日趋简单和脆弱, 导致农田环境污染严重、病虫害频繁发生及抗性增加、农业生物多样性丧失等问题, 同时还造成不可再生资源不断耗竭和环境污染等严重问题^[3]。应用拮抗微生物防治作物病害受到人们的高度重视。木霉菌的 9 个种中有 5 个具有生物防治潜力。目前, 木霉菌已被普遍用于防治马铃薯干腐病、烟草根腐病、瓜类枯萎病、番茄灰霉病、棉花黄萎病、作物灰霉病等土传病害^[4]。在园林植物中, 木霉菌对苹果腐烂病菌、杨树叶枯病病菌、杨树烂皮病病菌等多种病菌有较好的抑制作用^[5-6]。对药用植物人参、川穹等的病害也有较好的防治效果^[7-8]。

古丽君研究表明, 木霉菌 T2 菌株可寄生于禾草腐霉病原原瓜果腐酶上, 深绿木霉菌包围、覆盖瓜果腐酶的菌落使其停止生长, 另外可导致瓜果腐酶菌丝溶解、缢缩、扭曲变形, 最

终使腐霉菌死亡, 从而抑制禾草腐霉病, 对瓜果腐霉菌的抑制率达 53.56%^[9]。姚彦坡研究表明, 哈茨木霉对马铃薯和辣椒疫病的防治效果显著, 能有效降低死苗率和病情指数, 提高防治效果, 对土壤中疫病病菌有很强的抑制作用, 可显著降低病原菌的种群数量^[10]。李琳试验结果表明, 木霉菌对不同病原菌的抑制作用不同, 对玉米大斑病病菌的抑制效果最好, 抑制率高达 77.91%, 其次是镰刀菌和腐霉菌, 抑制效果最差的是玉米纹枯病病菌, 主要是因为木霉菌菌丝生长迅速, 占领了生长空间, 从而达到抑菌的效果^[11]。李世贵将木霉菌制成固体菌剂进行田间试验, 结果表明, 施用菌剂的处理组较其他各组的黄瓜枯萎病发病率下降 18.25% 和 22.22%, 防病效果分别提高 45.12% 和 4.04%, 从而提高黄瓜的抗病能力; 同样青椒疫病的病株率较其他 2 组分别下降 40.52% 和 25.41%, 防病效果分别提高 5.36% 和 51.79%^[12]。郭敏研究了木霉多糖及菌丝水提物对番茄和黄瓜幼苗抗性的诱导作用, 结果表明, 拟康氏木霉对灰葡萄孢菌、尖镰孢菌、番茄叶霉病菌、番茄早疫病病菌的抑制率分别为 73%、62%、86%、77%, 拟康氏木霉孢子悬液对番茄灰霉病的防效最为显著^[13]。刘梅将哈茨木霉的内切几丁质酶基因序列导入水稻中进行组成型表达试验, 结果表明, 转基因水稻第 1 代表现出对水稻纹枯病和稻瘟病抗性的提高, 后代通过筛选以期获得高抗纹枯病和稻瘟病的转基因水稻株系^[14]。长枝木霉对烟草黑胫病的温室防效达 97.16%^[15]。绿色木霉处理西瓜幼苗能有效增强瓜苗长势, 促进根系生长, 抑制西瓜枯萎病病菌生长^[16]。另外有报道表明, 哈茨木霉可湿性粉剂 (25%) 可用于防治苗枯病、白粉病、灰霉病和霜霉病等叶部病害及果实存储期的腐烂, 且具有良好的效果^[17]。叶鹏盛等报道, 木霉菌菌丝可缠绕、寄生在引起丹参根腐病的镰刀菌菌丝上, 使镰刀菌菌丝细胞变短, 菌丝断裂, 从而抑制镰刀菌菌丝的生长^[18]。

1.2 木霉菌生物防治的作用机制

1.2.1 竞争作用 木霉菌在抑制病原真菌的过程中能发挥重要的作用源于木霉菌具有较强的营养利用能力和环境适应能力, 从而具有极强的生存环境竞争能力。木霉菌生长繁殖快, 生命力强, 能够迅速抢占营养和空间。即使在营养十分贫瘠的土壤中, 木霉菌也可以靠胞外水解酶生存^[19]。木霉通过分泌大量的胞外降解酶类降解土壤中的葡聚糖、几丁质、纤维

收稿日期: 2016-09-20

基金项目: 国家科技支撑计划 (编号: 2014BAD23B03-3); 贵州省科技厅重大专项 (编号: 黔科合重大专项字 2014 年 6017 号)。

作者简介: 袁 扬 (1991—), 女, 四川万源人, 硕士研究生, 主要从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: 543802762@qq.com。

通信作者: 曾 兵, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事草资源育种与开发利用研究。E-mail: zbin78@163.com。

素等来获得能量以满足自身生长的需要。当离子缺乏时,木霉通过分泌高效率的铁载体来螯和环境中的离子,竞争土壤中有限的营养成分,从而抑制病原微生物的生长^[20]。

1.2.2 重寄生作用 在木霉菌与寄主互作的过程中,由寄主菌丝分泌物质诱导木霉,当木霉识别寄主后,木霉菌菌丝以寄主菌丝为载体生长和螺旋缠绕,通过分泌胞外酶溶解细胞壁以穿透寄主菌丝吸取营养,最终使病原菌菌丝断裂,原生质浓缩^[21]。木霉菌在重寄生过程中会产生许多细胞壁降解酶,这些细胞壁降解酶包括木聚糖酶、纤维素酶、蛋白酶、葡聚糖酶和几丁质酶等。通过表达以及沉默编码这些水解酶的基因证明,这些水解酶在重寄生过程中具有重要的作用^[22]。Sahebani 等通过研究哈茨木霉寄生于线虫的过程发现,壳聚糖酶活性作为生防效果的一个重要参数,在诱导植物系统性防御机制的启动时有重要的作用^[23]。

1.2.3 抗生作用 抗生作用是木霉菌生防作用的重要机制,在木霉菌生长代谢过程中会产生一些次生代谢物如胶霉素、木毒素、抗菌肽等,这些次生代谢物会对病原菌产生毒害作用,从而抑制病原菌的定殖和生长。朱天辉等研究报道,哈茨木霉菌株的代谢产物对立枯丝核菌菌落的生长有抑制作用,会破坏菌丝细胞壁,降低菌丝干质量,导致立枯丝核菌菌丝的原生质凝聚和菌丝断裂解体^[24]。

1.2.4 诱导抗生、激发植物防御机制 木霉菌与植物共生,在定殖植物根系的同时产生刺激植物生长和诱导植物局部和系统防御反应的化合物,酚的衍生物、抗毒素、萜类化合物、类黄酮等与其他抗菌化合物共同抵御真菌的侵入^[25]。因此,木霉不仅自身产生抗菌物质抑制病原真菌的生长,而且诱导植物产生自身的抗菌物质抵抗病原菌的入侵。与大多数真菌相比,木霉通常对这些抗菌物质具有更强的抗性。Avni 等报道,哈茨木霉可诱发烟草产生 1-氨基环丙烷-1-羧酸合成酶和氧化酶,在抗病信号分子的生物合成中起重要的作用^[26]。Yedidia 等观察发现,哈茨木霉菌株可诱导黄瓜系统获得抗性的产生^[27]。

2 木霉菌对植物的促生作用与促生机制

关于木霉对植物的促生作用,国内外已有大量的研究报道,木霉属菌株对植物的种子萌发、植株的生长及作物产量等有促进提高的作用。魏林利用哈茨木霉发酵液处理豇豆,结果表明,最高能使豇豆增产 16.8%;将此发酵液应用到花生、菜豆和大豆中,均表现出较好的促生效果,其中可使花生增产高达 21%^[28]。王芳通过试验发现,深绿木霉制剂对苜蓿、小麦及黄瓜的发芽和生长均有较好的促进作用^[29]。梁志怀研究发现,木霉菌能明显增强水稻秧苗素质,促进水稻分蘖抽穗,明显提高水稻产量^[30]。滕安娜利用棘孢木霉进行黄瓜盆栽试验,结果显示,棘孢木霉对黄瓜幼苗有明显的促生效果,处理幼苗 20 d 后,株高和鲜质量较对照组分别增加 23.23% 和 70.04%^[31]。张树武等研究发现,深绿木霉对黑麦草和白三叶草的生长均有较强的促生作用^[32-33]。吴晓青等利用 3 种木霉菌剂处理冬小麦,结果显示,3 种菌剂均可使冬小麦的出苗数、苗期生物量得到提高,在收获期得到明显增产^[34]。Al-Hazmi 等试验发现,哈茨木霉与绿色木霉均能提高番茄植株对虫病害的抵抗能力,从而提高番茄的产量^[35]。Tripathi

等试验证明,里氏木霉能明显提高鹰嘴豆的产量^[36]。Galletti 等利用哈茨木霉处理甜瓜种子,结果能使甜瓜根长增加 20%^[37]。

木霉菌对植物具有良好的促生作用,其促生机制引起了大量学者的研究,但其促生机制很复杂,因此目前还没有公认的能够解释木霉促生作用的机制^[38],学者们的研究结果主要有以下几个方面:能够产生植物生长调节剂、提高植物养分利用率、影响植物根际微生态、诱导植物产生抗性等。

2.1 产生植物生长调节剂

植物生长调节剂是能显著调节植物生长发育的一类微量有机物质,又称外源植物激素。已有许多研究表明,植物根际或与其共生的微生物能够产生植物激素,从而影响植物的生长。Hussain 等通过在大田试验中给玉米接种固氮菌发现,接种固氮菌后玉米的产量增加 16%,并认为是由接种固氮菌后植物产生的植物生长素引起的;植物激素浓度适宜时可促进植物生长,而浓度过高时则会抑制植物生长,木霉菌对植物激素有着双向调节的作用^[39]。Gravel 等通过温室试验发现,接种哈茨木霉能促进番茄幼苗根的生长及其产量的提高,并证明可能是吲哚乙酸产生的作用^[40]。Vinale 等从木霉菌的次级代谢产物中分离纯化出一种类植物生长素 6-PP,该类植物生长素不仅对番茄和油菜的生长有促进作用,还能减少植物病害的发生^[41]。Contreras-Cornejo 等研究发现,深绿木霉和绿色木霉产生的植物激素能够刺激野生型拟南芥的生长以及侧根系的发育^[42]。当外源植物生长调节剂浓度过高时,定殖于植物根部的木霉菌还可降低其对植物生长产生的抑制作用。此外,在植物根部定殖的木霉能够调节外源植物生长调节剂的浓度,避免浓度过高时抑制植物的生长。

2.2 提高植物养分利用率

土壤中存在许多不能被植物完全吸收利用的以微溶或难溶状态存在的营养元素,而通过施用木霉菌使其在植物根部定殖后,可以通过螯合或降解的方式来提高植物对矿物质及某些微量元素的吸收能力。由 Adams 等的研究可知,目前已经阐明的提高养分利用率的机制有以下几种:通过产生螯合剂来螯合土壤沉积物颗粒上的微量元素(如 Fe^{3+} 、 Zn^{2+}),供植物体利用;通过产生有机酸溶解土壤中的矿物质(如 CuO 、 Zn 、 Fe_2O_3 、 MnO_2);通过产生还原酶促进植物对氧化型矿物质(如 Fe^{3+})的吸收^[43]。龚明波通过施用木霉制剂表明,黄瓜苗发芽后的第 12 天土壤中 P、K、Fe、Zn、Mn 的有效态量比空白对照分别高 13.1%、34.75%、12.38%、57.51%、6.45%,苗中 N、P、K、Fe、Cu 的含量分别高于空白对照 5.11%、6.28%、21.03%、9.30%、4.42%,说明木霉菌能促进土壤中 P、K、Fe、Zn、Mn 的释放,并提高黄瓜对 N、P、K、Fe、Cu 等元素的吸收率,从而达到促进植株生长的作用^[44]。迟莉研究表明,在辣椒栽培中应用黄绿木霉菌剂能提高土壤中有效磷及碱解氮的含量,并提高辣椒的质量和产量^[45]。唐磊等试验证明,棘孢木霉可以改善土壤中的水解氮质量分数,促进青蒿的生长^[46]。

2.3 影响植物根际微生态

微生态调控(microecological regulation)是在植物微生态指导下产生的新的防治植物病害的方法,通过调控微生态环境、寄生细胞组织与有害微生物的平衡,协调植物体内的内生

共生菌与有害微生物的平衡,达到病害防治的目的^[47],从而达到最佳的社会、经济以及生态效益。植物根际周围存在一些非致病性但不利于植物生长的有害菌群,这些菌群通常会产生有利于其自身生长但是对植物生长有抑制作用的化合物,如氰化物。Baek 等研究发现,木霉菌不仅对氰化物有耐受性,并能产生 2 种降解该氰化物的酶,以防止该氰化物对植物根部造成伤害^[48]。Vinale 等检测了在哈茨木霉 T22 和深绿木霉 PI 进行液体和固体培养时农药对其菌丝体的影响,结果表明,2 种木霉均具有耐受性,且能够耐受高浓度的 CuCl_2 ^[49]。康萍芝等试验表明,在连作番茄的根际土壤中施加木霉制剂能显著增加番茄根际的细菌、真菌、放线菌等的数量,并减轻枯萎病的发生,促进植株生长;木霉菌还能降低土壤中重金属污染对植物生长的抑制作用^[50]。有研究表明,给在被重金属污染的土壤上生长的爆竹柳树苗接种哈茨木霉 T22 后,植物干质量较对照组增加 39%^[43]。

2.4 诱导植物产生抗性

诱导抗性是指植物自身的防御系统被外来刺激激活,使植物能够抵御病原菌或害虫以及逆境条件对植物的伤害,从而促进植物生长的特性。细菌、真菌及病毒均能诱导植物产生系统抗性。近年来,关于木霉菌诱导植物产生系统抗性及其激发植物防御机制的研究有较大的进展^[7]。木霉菌株可以穿透植物的表皮在植物的根系定殖,定殖后可增加植物体内的苯丙氨酸解氨酶、超氧化物歧化酶、多酚氧化酶、脂氢过氧化物裂解酶、几丁质酶、过氧化物酶、葡聚糖酶等的合成和积累,这些酶类物质能够诱导和激发植物产生防御反应化合物,在植物病害防治过程中起重要的作用^[51]。陈捷等研究表明,木霉菌种衣剂能够诱导作物对玉米弯孢叶斑病产生系统抗病性^[52]。Jean - Berchmans 等通过温室试验表明,利用哈茨木霉处理感病的水稻种子后,可以诱导水稻幼苗对稻瘟病和白叶枯病产生系统抗病性^[53]。Viterbo 等通过用绿色木霉处理黄瓜发现,黄瓜可被刺激产生分裂素蛋白激酶,从而诱导黄瓜产生系统抗性,对丁香假单胞菌在黄瓜上引起的细菌性角斑病有明显的抑制作用^[54]。由戚玮真的研究结果可知,木霉菌能够产生木聚糖酶等诱导因子,提高植株体内抗氧化酶的活性,诱导蛋白及乙烯生物的合成,打开 K^+ 、 H^+ 以及 Ca^{2+} 离子通道,增强植物抗性,从而加快植物生长^[55]。因此,木霉不仅能够通过自身产生的抗菌物质来抑制病原真菌的生长,还能够通过诱导植物产生抗菌物质来抵抗病原菌对植物的入侵^[42]。

3 木霉菌在农业中的应用现状及展望

作为传统的农业大国,农业在我国国民生产中一直都占据着十分重要的位置。现代农业技术在很大程度上推动了农业生产的快速发展,特别是化学肥料和农药的使用推广使农业生产的经济效益得到很大的提高^[56-57]。近年来,化学肥料的大量使用使得土壤板结,严重破坏环境,降低土壤肥力,进而降低农产品品质。化学农药的使用是为了保护农作物免受有害生物的危害,在促进农业增产方面起着很重要的作用。但是由于人们的不科学用药,严重污染了人类的生存环境。因此,为了实现农业的可持续发展,达到优质高产且生态安全的目的,对环境无害的生物肥料和生物农药的开发和应用越

来越重要^[58-59]。木霉菌的生防效果已在很多学者的研究中得到证实,它们既可以作为生物肥料对作物的生长产生促进作用,也能作为生物农药对植株病原菌产生防治作用。木霉菌对由腐霉、立枯丝核菌、镰刀菌、齐整小核菌等引起的棉花、三七、杜仲、人参等的幼苗立枯病以及茉莉、辣椒、花生的白绢病和番茄的猝倒病等均有较好的防效,并能促进这些作物的生长,提高产量^[51]。国外一些学者的研究也表明,木霉菌对尖孢镰刀菌、炭疽病病菌、菌核病病菌、黑曲霉等有拮抗作用^[60-63]。

木霉具有分解有机污染物、生物高分子以及生物防治的作用,因此木霉菌在农业上具有重大的应用前景,但其在开发利用过程中仍存在问题。木霉的孢子制剂基本为活菌制剂,在田间应用时受到温度、湿度等各种因素影响,因此田间试验性状表现不稳定^[31]。利用基因工程技术等基因改良方法对生防木霉菌株进行耐化学农药及耐低温干燥等性能筛选,并寻找适宜生防木霉菌株发酵的培养条件和改良田间施药的环境条件等现代生物技术,为木霉菌在农业中的应用展示更加广阔的前景。

参考文献:

- [1] Weinding R. Studies on a lethal principle effective in the parasitic action of *Trichoderma lignorum* on *Rhizictonia solani* and other soil fungi[J]. Phytopathology, 1934, 24: 1153 - 1179.
- [2] 李立平, 段德芳. 木霉生物学特性及拮抗作用研究进展[J]. 植物医生, 2006, 19(4): 4 - 6.
- [3] 陈捷, 朱洁伟, 张婷, 等. 木霉菌生物防治作用机理与应用研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2011, 27(2): 145 - 151.
- [4] 杨万荣, 邢丹, 蓬桂华, 等. 木霉菌生物防治辣椒疫病的研究进展[J]. 现代农业科技, 2015(19): 127 - 129.
- [5] 郭润芳. 木霉菌(*Trichoderma* spp.) 对林木病害生防机制的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2002.
- [6] 周秀华, 崔磊. 3 株木霉对杨树叶枯病原菌的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(8): 4572 - 4573.
- [7] 曾华兰, 叶鹏盛, 何炼, 等. 木霉菌防治川芎根腐病的初步研究[J]. 西南农业学报, 2005, 18(4): 427 - 430.
- [8] 周淑香, 李小宇, 张连学, 等. 6 株木霉菌对人参锈腐病的防治效果[J]. 中国生物防治, 2010, 26(增刊 1): 69 - 72.
- [9] 古丽君. 深绿木霉对草坪禾草根腐病原的作用机制及深绿木霉生防制剂的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009.
- [10] 姚彦坡. 防治马铃薯晚疫病和辣椒疫病木霉菌的筛选及生防机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [11] 李琳. 棘孢木霉菌的分离及其生防作用的评价与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [12] 李世贵. 防治黄瓜枯萎、青椒疫病木霉菌的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- [13] 郭敏. 拟康氏木霉对蔬菜真菌病害防治的研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [14] 刘梅. 利用生防木霉基因提高水稻抗病性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [15] 王革, 李梅云, 段玉琪, 等. 木霉菌对烟草黑胫病菌的拮抗机制及其生物防治研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2001, 23(3): 222 - 226.
- [16] 赵国其, 林福呈, 陈卫良, 等. 绿色木霉对西瓜枯萎病苗期的控

- 制作用[J]. 浙江农业学报,1998(4):38-41.
- [17] Zimand G, Elad Y, Chet I. Effect of *Trichoderma harzianum* on *Botrytis cinerea* pathogenicity[J]. Phytopathology, 1996, 86(11): 1255-1260.
- [18] 叶鹏盛, 曾华兰, 江怀仲, 等. 丹参根腐病及其微生物防治研究[J]. 世界科学技术, 2003, 5(2): 63-65.
- [19] Delgado-Jarana J, Moreno-Mateos M A, Benítez T. Glucose uptake in *Trichoderma harzianum*: role of *gtt1*[J]. Eukaryotic Cell, 2003, 2(4): 708-717.
- [20] Sivan A, Chet I. The possible role of competition between *Trichoderma harzianum* and *Fusarium oxysporum* on rhizosphere colonization[J]. Phytopathology, 1989, 79(2): 198-203.
- [21] 彭可为, 李 婵. 木霉菌的生物防治研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(2): 780-782.
- [22] 蒋 恒. 木霉菌对辣椒疫霉菌生防机制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [23] Sahebani N, Hadavi N. Biological control of the root-knot nematode *Meloidogyne javanica* by *Trichoderma harzianum*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(8): 2016-2020.
- [24] 朱天辉, 邱德勋. *Trichoderma harzianum* 对 *Rhizoctonia solani* 的抗生现象[J]. 四川农业大学学报, 1994, 12(1): 11-15.
- [25] 惠有为, 孙 勇, 潘亚妮, 等. 木霉在植物真菌病害防治上的作用[J]. 西北农业学报, 2003, 12(3): 96-99.
- [26] Avni A, Bailey B A, Mattoo A K, et al. Induction of ethylene biosynthesis in *Nicotiana tabacum* by a *Trichoderma viride* xylanase is correlated to the accumulation of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) synthase and ACC oxidase transcripts[J]. Plant Physiology, 1994, 106(3): 1049-1055.
- [27] Yedidia I, Behamou N, Chet I. Induction of defense responses in cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) by the biocontrol agent *Trichoderma harzianum* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(3): 1061-1070.
- [28] 魏 林. 哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)发酵液中对豇豆具促生活性物质的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2005.
- [29] 王 芳. 深绿木霉的拮抗机理、促生作用及制剂加工研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.
- [30] 梁志怀. 生防木霉菌与水稻共生体的建立及其关系研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.
- [31] 滕安娜. 木霉菌对植物的促生效果及其机理的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2010.
- [32] 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(2): 157-162.
- [33] 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.
- [34] 吴晓青, 赵忠娟, 李 哲, 等. 施加木霉可湿性粉剂对冬小麦田间生长的影响[J]. 山东科学, 2015, 28(6): 35-42.
- [35] Al-Hazmi A S, Tariqjaveed M. Effects of different inoculum densities of *Trichoderma harzianum* and *Trichoderma viride* against *Meloidogyne javanica* on tomato [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2016, 23(2): 288-292.
- [36] Tripathi P, Singh P C, Mishra A, et al. *Trichoderma* inoculation augments grain amino acids and mineral nutrients by modulating arsenic speciation and accumulation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 117: 72-80.
- [37] Galletti S, Fornasier F, Cianchetta S, et al. Soil incorporation of brassica materials and seed treatment with *Trichoderma harzianum*: effects on melon growth and soil microbial activity[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 75: 73-78.
- [38] 朱双杰, 高智谋. 木霉对植物的促生作用及其机制[J]. 菌物研究, 2006, 4(3): 107-111.
- [39] Hussain A, Arshad M, Hussain A, et al. Response of maize (*Zea mays*) to *Azotobacter* inoculation under fertilized and unfertilized conditions[J]. Biology and Fertility of Soils, 1987, 4(1/2): 73-77.
- [40] Gravel V, Antoun H, Tweddell R J. Growth stimulation and fruit yield improvement of greenhouse tomato plants by inoculation with *Pseudomonas putida* or *Trichoderma atroviride*: possible role of indole acetic acid (IAA) [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(8): 1968-1977.
- [41] Vinale F, Sivasithamparam K, Ghisalberti E L, et al. A novel role for *Trichoderma* secondary metabolites in the interactions with plants [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2008, 72(1/2/3): 80-86.
- [42] Contreras-Cornejo H A, Macías-Rodríguez L, Cortés-Penagos C, et al. *Trichoderma virens*, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology, 2009, 149(3): 1579-1592.
- [43] Adams P, Lynch J M, De Leij F A. Desorption of zinc by extracellularly produced metabolites of *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma reesei* and *Coriolus versicolor* [J]. Journal of Applied Microbiology, 2007, 103(6): 2240-2247.
- [44] 龚明波. 木霉厚垣孢子制剂的防病促生机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004.
- [45] 迟 莉. 黄绿木霉菌及其混剂对辣椒植株及土壤的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2013(7): 42-44.
- [46] 唐 磊, 赵 敏, 张荣沭, 等. 棘孢木霉对青蒿生长量及土壤水解氮质量分数的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014(4): 70-72, 92.
- [47] 蔡元呈. 防治植物病害的新方法——微生态调控[J]. 福建农业, 2002(1): 23.
- [48] Baek J M, Howell C R, Kenerley C M. The role of an extracellular chitinase from *Trichoderma virens* Gv29-8 in the biocontrol of *Rhizoctonia solani* [J]. Current Genetics, 1999, 35(1): 41-50.
- [49] Vinale F, D'Ambrosio G, Abadi K, et al. Application of *Trichoderma harzianum* (T22) and *Trichoderma atroviride* (P1) as plant growth promoters, and their compatibility with copper oxychloride [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2004, 30(4): 425.
- [50] 康萍芝, 张丽荣, 沈瑞清, 等. 哈茨木霉制剂对设施连作番茄根际土壤微生物的生态效应及防病作用[J]. 农药, 2013, 52(2): 128-131.
- [51] 宋晓妍, 孙彩云, 陈秀兰, 等. 木霉生防作用机制的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(6): 20-25.
- [52] 陈 捷, 蔺瑞明, 高增贵, 等. 玉米弯孢叶斑病菌毒素对寄主防御酶系活性的影响及诱导抗性效应[J]. 植物病理学报, 2002, 32(1): 43-48.
- [53] Jean-Berchmans N, 徐 同, 宋凤鸣, 等. 哈茨木霉 NF9 菌株对

张 婷,张一新,向洪勇. 秸秆还田培肥土壤的效应及机制研究进展[J]. 江苏农业科学,2018,46(3):14-20.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.03.004

秸秆还田培肥土壤的效应及机制研究进展

张 婷¹, 张一新^{1,2}, 向洪勇^{1,2}

(1. 西交利物浦大学淮安新型城镇化发展研究院,江苏淮安 223005; 2. 西交利物浦大学环境科学系,江苏苏州 215123)

摘要:农作物秸秆还田作为构建绿色、生态、可持续农业的重要举措,对提高农田土壤肥力、减少化肥施用、增加土地生产力和增强农田土壤碳汇能力具有重要作用。综述秸秆还田对土壤物理、化学、生物学性质的影响,分析其中可能的微生物学、酶学、动物学机制,并指出未来秸秆还田培肥土壤的机制研究应加强秸秆还田对土壤有毒物质的影响,土壤微生物、酶和动物三者相互作用共同参与秸秆还田培肥土壤方面的研究,旨在为开展秸秆还田培肥土壤机制的研究提供参考。

关键词:秸秆还田;可持续农业;土壤肥力;土壤酶;土壤微生物;土壤动物

中图分类号: S154;S158 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)03-0014-07

随着我国人口数量日益增加,耕地面积逐年减少、耕地质量逐渐下降,人地矛盾越来越突出^[1]。我国粮食安全正面临着日益严峻的挑战^[2-3]。为保证粮食安全,我国在农业上使用大量化肥,而过量使用化肥会导致我国土壤酸化、板结、结构破坏、养分失衡等地力衰退问题及水体污染问题^[2,4-5],因而迫切须要寻求在保障粮食安全前提下可改良土壤结构、改善土壤养分状况、减少化肥使用的新施肥措施。

秸秆作为农业生产的主要副产品,含有丰富的有机碳及大量的氮、磷、钾、硅等农作物生长所必需的营养元素,是一类重要的能直接利用的可再生生物资源^[6]。我国是世界上秸秆产量最大的国家之一,平均利用率仅有 32%,远低于美国 68%、英国 73% 的秸秆还田量^[7]。一方面大量秸秆的弃置会导致资源的严重浪费;另一方面秸秆田间地头的随意堆放会

导致水体富营养化等水污染问题,秸秆的焚烧会导致雾霾等空气污染、土壤与微生物结构破坏等问题^[8]。研究发现,秸秆还田不仅能够提高土壤养分含量,而且能够改良土壤结构,还具有一定的提高粮食产量的潜力^[9-10],同时还能增加农田土壤的固碳量,作为化肥的补充甚至替代品改善因化肥的过度使用导致的土壤酸化、板结、地力衰退等问题,为发展有机农业提供条件^[11-12]。因而广泛推广实施秸秆还田对保障我国粮食安全、农业可持续发展、生态环境健康具有重要的意义。

本文综述了国内外关于秸秆还田培肥土壤的效应及其机制的研究进展,旨在为开展秸秆还田培肥土壤机制的深入研究提供参考。

1 秸秆还田对土壤的培肥效应研究

土壤肥力是指土壤为植物生长供应和协调养分、水分、空气和热量的能力,主要包括容重、团聚体组成等土壤物理性质,有机质、氮、磷、钾、pH 值等土壤化学性质以及微生物、酶、动物等土壤生物学性质^[13]。因此,秸秆还田的培肥效应也包括对土壤物理、化学、生物学性质的影响。

收稿日期:2016-09-05

基金项目:江苏省淮安市市级科技计划(编号:HAN2015022)。

作者简介:张 婷(1986—),女,湖北襄阳人,博士研究生,主要从事农田土壤肥力研究。E-mail:ttzhang115@163.com。

通信作者:张一新,博士,副教授,主要从事环境生态学研究。E-mail:Yixin.Zhang@xjtlu.edu.cn。

- 水稻的诱导抗病性[J]. 中国生物防治,2003,19(3):111-114.
- [54] Viterbo A, Harel M, Horwitz B A, et al. *Trichoderma* mitogen-activated protein kinase signaling is involved in induction of plant systemic resistance[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(10):6241-6246.
- [55] 戚玮真. 生防木霉菌对植物的解盐促生作用及其机制的研究[D]. 济南:山东师范大学,2012.
- [56] 金卫根. 微生物技术在现代农业上的应用综述[J]. 江西农业科技,2002(5):43-44.
- [57] 何元胜,胡晓峰,岳 宁,等. 微生物肥料的作用机理及其应用前景[J]. 湖南农业科学,2012(10):13-16.
- [58] 张化霜. 微生物农药研究进展[J]. 农药科学与管理,2011,32(11):22-25.
- [59] 刘 鹏,刘训理. 中国微生物肥料的研究现状及前景展望[J]. 农学学报,2013,3(3):26-31.

- [60] Gajera H P, Katakpara Z A, Patel S V, et al. Antioxidant defense response induced by *Trichoderma viride* against *Aspergillus niger* van Tieghem causing collar rot in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. *Microbial Pathogenesis*, 2016, 91:26-34.
- [61] Saravanakumar K, Yu C J, Dou K, et al. Synergistic effect of *Trichoderma*-derived antifungal metabolites and cell wall degrading enzymes on enhanced biocontrol of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum* [J]. *Biological Control*, 2016, 94:37-46.
- [62] Valenzuela N L, Angel D N, Ortiz D T, et al. Biological control of anthracnose by postharvest application of *Trichoderma* spp. on maradol papaya fruit [J]. *Biological Control*, 2015, 91:88-93.
- [63] Hu X J, Roberts D P, Xie L H, et al. Use of formulated *Trichoderma* sp. Tri-1 in combination with reduced rates of chemical pesticide for control of *Sclerotinia sclerotiorum* on oilseed rape [J]. *Crop Protection*, 2016, 79:124-127.