

根内根孢囊霉和多菌灵对鼓粒期大豆生物量及根际土壤细菌总数的影响

接伟光^{1,2}, 陈曦¹, 王浩毅¹, 林玉莹¹, 乔巍^{1*}

1. 黑龙江东方学院食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150066

2. 黑龙江大学生命科学学院, 农业微生物技术教育部工程研究中心, 黑龙江省寒区植物基因与生物发酵重点实验室, 黑龙江省普通高校微生物重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要: 随着全球大豆需求持续增长,大豆的产量也愈发受到人们关注。根腐病作为典型的土传病害,严重威胁大豆稳产与可持续生产。丛枝菌根真菌可以降低大豆根腐病患率,从而提高大豆产量。为探索提高大豆产量、促进可持续发展的有效方法,本试验以垦豆3原种大豆为试验材料,通过大田试验研究正茬、迎茬种植方式下根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)与多菌灵对鼓粒期大豆生物量以及根际土壤细菌总数的影响。结果表明,同正茬种植相比,迎茬种植会使大豆植株主要生物量与细菌总数下降;正茬与迎茬种植下,接种*R. intraradices*的处理组,其株高、茎粗、根长及地上鲜重均高于其他处理组。本研究旨在克服大豆迎茬障碍、增产增效,为可持续种植与病害绿色防控策略提供新途径。

关键词: 大豆; 根内根孢囊霉; 正茬与迎茬; 生物量; 多菌灵

中图分类号: S435.651

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)02-0245-07

Effects of *Rhizophagus intraradices* and Carbendazim on Soybean Biomass and Total Rhizosphere Soil Bacterial Count During Pod-Filling Stage

JIE Wei-guang^{1,2}, CHEN Xi¹, WANG Hao-yi¹, LIN Yu-ying¹, QIAO Wei^{1*}

1. School of Food Engineering/Heilongjiang East University, Harbin 150066, China

2. Engineering Research Center of Agricultural Microbiology Technology, Ministry of Education & Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Plant Genetic Engineering and Biological Fermentation Engineering for Cold Region & Key Laboratory of Microbiology, College of Heilongjiang Province & School of Life Sciences/Heilongjiang University, Harbin 150080, China

Abstract: As global soybean demand continues to rise, soybean yield has garnered increasing attention. Root rot, a typical soil-borne disease, poses a huge threat to stable and sustainable soybean production. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) can reduce the incidence of soybean root rot, thereby enhancing yield. To explore effective methods for increasing soybean yield and promoting sustainable development, this study utilizes Kandou 3 (original variety) soybean as experimental material. Field trials are conducted to investigate the effects of *Rhizophagus intraradices* and carbendazim on soybean biomass and total rhizosphere soil bacterial count during the pod-filling stage under rotational cropping and alternate cropping systems. The results show that compared to rotational cropping, alternate cropping reduces primary plant biomass and total bacterial count in soybeans. Under both rotational and alternate cropping systems, the *Rhizophagus intraradices*-inoculated treatment group exhibits greater plant height, stem diameter, root length, and above-ground fresh weight than other treatment groups. This study aims to overcome obstacles in soybean alternate cropping, enhance yield and production efficiency, and provide a novel approach for sustainable cultivation and green disease control strategies.

Keywords: Soybean; *Rhizophagus intraradices*; rotational cropping and alternate cropping; biomass; carbendazim

大豆作为高营养豆科固氮作物,其相关产业在畜牧业、油脂工业及食品加工行业中不可或缺,更关乎到全球粮食安全与农业的可持续发展^[1]。在农业生产中,根据大豆上下茬口的衔接

收稿日期: 2025-05-19

修回日期: 2026-03-08

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2023C087); 黑龙江东方学院科研创新平台建设项目(KYPT202402); 黑龙江省生态环境保护科研项目(HST2022TR001)

第1作者简介: 接伟光(1981-),男,博士,教授,研究方向:微生物资源挖掘与利用研究。E-mail: jieweiguang2007@126.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: wonderjoe@126.com

方式不同,可以分为正茬种植和迎茬种植,正茬种植可通过轮作来调整生态平衡,有效抑制土传病虫害、维持土壤肥力并保障长期生产力稳定性,但无法保证大豆产量的稳定^[2]。人们为提高土地单位产量有时会采用迎茬种植,但其长期实施易引发迎茬障碍,主要表现为土壤中化感物质积累、根腐病患率增加及根系分泌物自毒效应加剧,最终导致作物减产,土壤丧失肥力^[3-5]。多菌灵作为杀菌剂可以抑制土壤中病原微生物的增殖,缓解迎茬障碍,但过量使用多菌灵会导致土壤肥力下降,土传病原菌抗药性增强。已有研究发现,微生物菌剂可通过分泌化感物质降解酶、丰富微生物菌群等机制调节土壤结构且不对生态系统造成损害^[6,7]。

丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)广泛定植于植物根系形成互惠共生体,该共生体系通过分泌代谢物活化土壤中难溶性矿物质以促进植物吸收与生长,同时其菌丝及分泌物可协同增强土壤团聚体稳定性,改善土壤结构缓解病害^[8,9]。不同植物受AMF的影响存在差异^[10]。研究发现为豆科植物接种摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*)后,作物的生长态势得到显著提升且根腐病的发病率也随之降低^[11];对黄花蒿接种AMF发现其促进了植物对养分的吸收,使各器官N、P含量得到增加^[12]。AMF同样可以促进柑橘根系对N、P和Mg的获取^[13]。其中根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)作为丛枝菌根真菌的分支之一具有同样的功效。研究发现根内根孢囊霉可促进枸杞生物量的积累并提高叶绿素含量^[14]。尽管大量研究已证实AMF可通过广泛的菌丝网络改善作物营养与水状况从而促进植株生长,但在大田环境中土壤生物互作网络复杂多变,会对单一微生物的功能发挥产生影响。目前,*R. intraradices*与多菌灵对大豆生物量及根际土壤细菌总数的调控作用在田间轮作系统中仍缺乏实证研究。

本研究通过大田试验,分析*R. intraradices*与多菌灵对正茬/迎茬大豆生物量的交互效应以及二者对大豆根际土壤细菌总数的影响。旨在为大豆迎茬障碍的绿色防控提供理论依据,助力产业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究地点概述

本次研究地点为黑龙江省双鸭山市宝清县宝石林场(46°19'N, 131°92'E),其地理位置处于中国三江平原南部,黑龙江省东部地带。该地区属温带湿润季风气候,环流明显。年平均气温稳定在3℃左右,在土壤特质方面以黑土为主。

1.2 试验材料

大豆品种:选用东北地区主栽非转基因型大豆品种一垦豆3原种。该品种具有抗灰斑病特性,脂肪含量21.46%,蛋白质含量39.41%。

AM真菌:试验所用的根内根孢囊霉由黑龙江东方学院微生物学实验室提供。

*R. intraradices*扩繁:*R. intraradices*由课题组自行扩繁获得。

1.3 试验设计

试验大田采用随机区组设计,正茬、迎茬种植制度的大豆各设置了4种处理方式,每个试验处理区面积为0.06 hm² (600 m²),采用50 cm等行距种植,株距50 cm,共种植大豆2 400株。在整个大豆生长周期内不做任何处理,严格控制变量。

(1)*R. intraradices*菌剂处理组:在大豆播种前,将5 g的*R. intraradices*菌剂均匀施于大豆种子下方2-3 cm厚的土层中。正茬与迎茬种植方式下接种菌剂的处理组分别以ZR、YR标记。

(2)多菌灵处理组:在大豆出苗后的第60 d和第90 d,在试验处理区内分别向根际土壤喷洒3 g/L多菌灵溶液,每次喷洒量为1 L。正茬与迎茬种植方式下接种农药的处理组分别以ZD、YD标记。

(3)*R. intraradices*+多菌灵处理组:在播种前接种菌剂,出苗后第60 d和第90 d喷洒多菌灵溶液。正茬与迎茬种植方式下接种菌剂与农药的处理组分别以ZRD、YRD标记。

(4)空白对照处理组:不接种菌剂,也不喷洒多菌灵。正茬与迎茬种植方式以Z、Y标记。

1.4 大豆主要生物量测定

在大豆鼓粒期(出苗后90 d)随机选取不同处理组内的10株大豆植株,测定植株高度、茎

粗、鲜重以及根长。其中,植株高度是指从大豆植株茎与根的相接部位起垂直测量至植株最顶端的距离;茎粗是指大豆植株茎部与根部过渡位置的横向粗度;鲜重是指采摘后去除根部的植株重量;根长是指从大豆植株根部的最末端起到茎与根衔接处的距离^[15]。

1.5 大豆根际土壤中细菌菌落总数的测定

大豆鼓粒期时,随机选取不同处理组内的10株大豆,分别采集大豆根际10 cm范围内土壤10 g,将其加入装有90 mL无菌水的锥形瓶内,密封后置于30 °C恒温摇床180 rpm震荡20 min。震荡结束后静置10 min,取1 mL上清液加入装有9 mL无菌水的试管中,依次稀释至 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 三个浓度梯度。各浓度梯度下分别吸取1 μ L稀释液,均匀涂布于平板计数培养基表面,每个浓度设三次重复,将涂布后的培养皿置于30 °C恒温培养箱内倒置培养24 h,待菌落长出后进行计数统计分析以测定根际土壤中的细菌菌落总数^[16]。

1.6 数据处理

数据处理与方差分析使用SPSS 20.0软件分析、Origin2024作图完成,所有数据均以10次重复测量所得均值 \pm 标准差表示,且统计检验显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同处理方式对鼓粒期大豆主要生物量的影响

2.1.1 不同处理方式对鼓粒期大豆株高的影响
由鼓粒期大豆株高(图1)以及(种植方式 \times 接菌处理 \times 农药施用)三因素方差(表1)分析可知,同种处理方式下,迎茬大豆植株株高均低于正茬。迎茬种植会使土壤理化性质发生改变,致使大豆株高降低。*R. intraradices*处理组较其他处理组影响大豆株高,*R. intraradices*对植株生长具有多方面的积极作用。从而对大豆植株株高的生长表现出显著的促进效果。接种多菌灵处理组相较空白组极显著提升大豆株高,但仍低于接种*R. intraradices*处理组。原因可能在于多菌灵的广谱杀菌特性无差别地抑制了多种微生物类群,从而降低了土壤微生物多样性。而*R. intraradices*能够合成并分泌黄酮类、醛类等具有

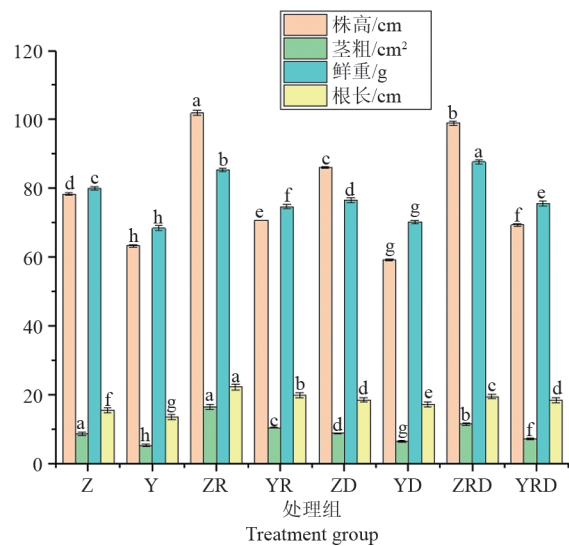


图1 不同处理方式对鼓粒期大豆生物量的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soybean biomass at pod-filling stage

注:图中不同小写字母表示不同处理下大豆生物量的差异($P < 0.05$);Z表示正茬种植;Y表示迎茬种植;R表示接种*R. intraradices*;D表示喷洒多菌灵农药;RD表示既接种*R. intraradices*又喷洒多菌灵。

Note: Different lowercase letters in the figure indicate the differences in soybean biomass under different treatments ($P < 0.05$). Z represents rotational cropping; Y represents rotational cropping; R represents inoculation with *R. intraradices*; D represents spraying carbendazim fungicide; RD represents both inoculation with *R. intraradices* and spraying carbendazim.

抑菌活性的次生代谢产物,实现对病原微生物的有效防控,为大豆植株创造了更为有利的生长环境,使大豆株高得以有效增加。接种*R. intraradices*并喷洒多菌灵处理组对大豆株高同样起到促进作用,但相较只接种*R. intraradices*处理组大豆株高降低。

2.1.2 不同处理方式对鼓粒期大豆茎粗的影响
鼓粒期迎茬种植大豆的茎粗低于正茬种植,该现象是因为迎茬种植会导致土壤微生物失衡、植株根际养分吸收能力下降,进而抑制大豆正常生长发育(图1)。对种植方式 \times 接菌处理 \times 农药施用的三因素方差(表1)分析发现,接种*R. intraradices*的处理组相较于其他处理组显著促进大豆茎秆发育。喷洒多菌灵的处理组大豆茎粗与对照组相比也有提高,说明多菌灵可以改善因大豆迎茬种植导致的连作障碍。接种*R. intraradices*并喷洒多菌灵的处理组同样促进大豆茎的生长,但促进效果低于*R. intraradices*的处理组,说明多菌灵会降低*R. intraradices*对大豆茎粗的促进作用。

表 1 不同处理方式对鼓粒期大豆各生物量的三因素方差分析
Table 1 Three-factor analysis of variance for various soybean biomass parameters at the pod-filling stage under different treatments

指数 Index		Y	R	D	YR	YD	YRD
株高/cm	均方	8 747.802	1 561.707	33.607	24.402	0.015	130.667
	F 值	42 759.112	7 633.597	164.269	119.275	0.073	638.697
	显著性	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.790	0.000**
	自由度	1	1	1	1	1	1
茎粗/cm	均方	47.856	8.249	3.565	0.462	1.340	1.556
	F 值	2 987.857	514.997	222.587	28.847	83.634	97.118
	显著性	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
	自由度	1	1	1	1	1	1
鲜重/g	均方	1 453.927	1 115.207	152.007	16.667	3.227	51.627
	F 值	41 540.762	31 863.048	4 343.048	476.190	92.190	1 475.048
	显著性	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
	自由度	1	1	1	1	1	1
根长/cm	均方	13.054	66.334	2.220	4.420	17.854	18.200
	F 值	154.330	784.241	26.251	52.261	211.079	215.177
	显著性	0.303	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
	自由度	1	1	1	1	1	1

注:表中 Y 表示迎茬种植;R 表示接种 *R. intraradices*;D 表示喷洒多菌灵农药;*表示各因素在 0.05 水平影响显著,**表示各因素在 0.01 水平影响极显著。

Note: In the table, Y indicates rotational cropping; R indicates inoculation with *R. intraradices*; D indicates spraying with a broad-spectrum fungicide; *Factors are significant at the 0.05 level, **Factors are highly significant at the 0.01 level.

2.1.3 不同处理方式对鼓粒期大豆鲜重的影响
通过显著性分析方法对鼓粒期大豆鲜重(图 1)进行分析,发现同种处理下,迎茬种植的大豆鲜重会低于正茬。接种 *R. intraradices* 的处理组较空白组大豆鲜重有显著提高,可能是因为 *R. intraradices* 能够有效促进大豆植株养分吸收,进而提高大豆鲜重。多菌灵处理组也可使迎茬大豆鲜重增加,说明多菌灵可以降低因迎茬种植导致的土传病害,促使大豆生长。种植方式×接菌处理×农药施用三因素方差分析(表 1)表明,接种 *R. intraradices* 并喷洒多菌灵的处理极显著影响大豆植株鲜重,且增强效果优于其他处理组。说明两种处理方式联合应用时 *R. intraradices* 可与大豆植株构建共生体系,该共生关系能够显著增强大豆植株对土壤中养分及水分的摄取效率,从而有效提高大豆植株的鲜重。多菌灵可降低大豆患土传病害的风险。两种处理方式协同从多个方面促进大豆鲜重的增加。

2.1.4 不同处理方式对鼓粒期大豆根长的影响
不同的处理方式对鼓粒期大豆根长的影响存在差异。对图 1 分析可知,同种处理下,迎茬种植的

大豆根长会略低于正茬。这一现象可能与连作条件下土壤环境的改变有关,例如病原微生物的增殖或化感物质的积累,这些因素可能干扰大豆根系的正常生理过程,从而抑制大豆根的正常生长。由表 1 三因素分析可知,*R. intraradices* 处理组大豆根长明显高于其他处理组,*R. intraradices* 的菌丝网络分泌吲哚乙酸等植物激素,增强养分吸收等机制来刺激大豆根系生长。接种 *R. intraradices* 并喷洒多菌灵的处理组促进效果优于单一喷洒多菌灵处理组,表明 *R. intraradices* 可通过其保护作用,有效缓解多菌灵对土壤微生物结构的破坏。从而促进大豆根部生长。

2.2 不同处理方式对大豆根际土壤中细菌菌落总数的影响

对不同处理方式下,鼓粒期大豆根际土壤中细菌总数(图 2)以及不同处理对鼓粒期大豆根际土壤中细菌菌落总数影响的三因素方差(表 2)分析可知,在空白处理下,迎茬种植的细菌菌落总数会低于正茬种植,表明不同种植方法会影响大豆根际土壤微生物菌群结构。在同种

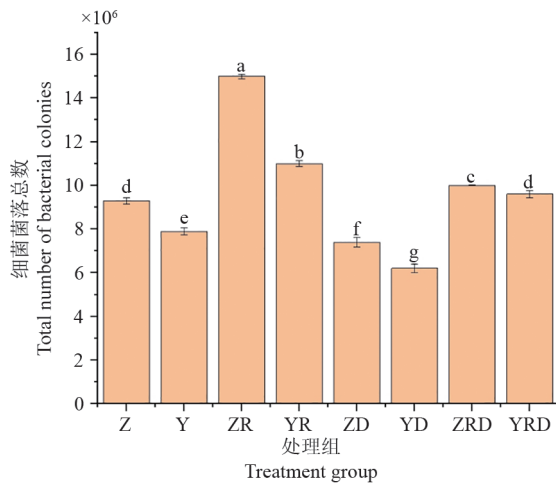


图2 不同处理方式对鼓粒期大豆根际土壤中细菌总数的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on the total number of bacteria in soybean rhizosphere soil at pod-filling stage

注:图中不同小写字母表示不同处理下大豆生物量的差异($P < 0.05$);Z表示正茬种植;Y表示迎茬种植;R表示接种 *R. intraradices*;D表示喷洒多菌灵农药;RD表示既接种 *R. intraradices* 又喷洒多菌灵。

Note: Different lowercase letters in the figure indicate the differences in soybean biomass under different treatments ($P < 0.05$); Z represents rotational cropping, Y represents alternate cropping; R represents inoculation with *R. intraradices*; D represents spraying carbendazim fungicide; RD represents both inoculation with *R. intraradices* and spraying carbendazim.

种植方式下,接种 *R. intraradices* 的处理组大豆细菌总数与空白组相比分别增加了 64.5%、40.7%,表明 *R. intraradices* 极显著提高了细菌菌落总数($P < 0.01$)。多菌灵处理组的细菌菌落总数明显低于空白组,表明多菌灵对土壤细菌菌群有杀灭作用,导致细菌菌群数量显著减少。接种 *R. intraradices* 并喷洒多菌灵的处理组细菌菌落总数高于空白组,但增长效果低于单一接种 *R. intraradices* 处理组,可能多菌灵对 *R.*

intraradices 同样有杀灭作用。这一现象表明 *R. intraradices* 有利于提高鼓粒期大豆土壤根际的微生物菌落数量,丰富微生物群落结构,促进土壤中各类物质的循环转化,为大豆的生长提供了更加充足且优质的养分环境。

3 讨论

当前,迎茬障碍已成为制约作物生产的主要问题。近年来,大量研究表明植物根际微生物在调控作物抗逆性方面具有关键作用^[17,18]。其中 AM 真菌通过形成菌丝网络与植物根系进行营养物质互换实现共生,植物将光合产物碳源输送至真菌作为能量供给,而真菌则通过扩展根系吸收空间显著提高植物对磷、氮及微量元素的获取效率^[19]。这种双向物质交换机制不仅促进宿主植物的生长发育,更增强了植株抗逆能力。

本研究分析不同处理对鼓粒期大豆生物量和细菌总数的影响。结果表明,在同一处理下,迎茬种植的大豆植株各生物量均低于正茬种植,这与陈品璐等研究结果相似。说明迎茬种植导致土壤养分失衡、病原微生物富集以及化感自毒作用加剧致使植株根系发育受阻,多数植物在迎茬之后会出现根系褐变、根系不发达且活力低以及分布范围缩小的现象。本研究中,接种 *R. intraradices* 的处理组表现出显著优势,不仅大豆各生物量指标显著高于其他处理组(包括多菌灵处理),其根系土壤细菌总数也明显提升。这一发现直接印证并拓展了刘坤雨等的研究,接种 AMF 菌剂可使大豆地上干物质积累速率加快,籽粒产量增加^[20]。对其促生机理进一步分析,认为 *R. intraradices* 通过扩展菌丝网络增大植株根系吸收面积,提升宿主植株对土壤水分的吸收效率,并且在张力作用下,菌丝可以在水上形成包

表2 不同处理方式下鼓粒期大豆根际土壤中细菌菌落总数的三因素方差分析

Table 2 Three-factor analysis of variance of total bacterial colony counts in rhizosphere soil of soybeans at the pod-filling stage under different treatments

	自由度	均方	F值	显著性		自由度	均方	F值	显著性
种植方式	1	13 113.375	4 311.247	0.000**	种植方式×接菌	1	6 767.042	2 224.781	0.000**
接菌	1	4 347.042	1 429.164	0.000**	种植方式×喷洒农药	1	1 134.375	272.945	0.000**
喷洒农药	1	6 767.042	2 224.781	0.000**	接菌×喷洒农药	1	1 717.042	564.307	0.000**
					种植方式×接菌×喷洒农药	1	1 552.042	510.260	0.000**

注:表中*表示各因素在0.05水平影响显著,**表示各因素在0.01水平影响极显著。

Note: In the table, * indicates that each factor is significant at the 0.05 level; ** indicates that each factor is highly significant at the 0.01 level.

裹物使水膜厚度增加,土壤结构稳定^[21-23]。同时 *R. intraradices* 自身还可合成并分泌细胞分裂素、生长素等植物激素,通过激素信号级联反应调控大豆根系形态建成与发育^[24]。Huang^[25]等研究菌根定植机理发现,AMF 通过激活 MAPK 信号通路增强根系细胞膜透性调控能力,提升宿主植物光合器官的气体交换效率。综合研究表明,由 *R. intraradices* 主导与富集的有益微生物群落形成的紧密协同共生关系,是修复迎茬土壤微生态失衡的核心。有益菌群通过固氮、溶磷等多种功能协同 *R. intraradices* 共同改善植株根际养分循环效率,抑制土传病原菌,并降解化感自毒物质。这一协同作用有效修复土壤微环境并缓解迎茬种植引发的微生物失衡^[26-29]。

多菌灵能有效抑制迎茬土壤中的病原微生物增殖,从而缓解连作障碍。然而,该杀菌剂具有明显局限性,它会对土壤微生物群落产生非特异性的抑制和杀灭作用,致使土壤中有益微生物与有害微生物一同被清除,严重破坏土壤微生物生态系统的平衡^[30]。在正茬、迎茬种植下,*R. intraradices* 均会使喷洒多菌灵的大豆根际土壤细菌总数提高,说明 *R. intraradices* 可以缓解多菌灵带来的毒害作用。AMF 所形成的菌丝体与菌根网络能助力作物更好地摄取土壤中的养分,同时可以缓解农药残留对土壤造成的伤害^[31]。*R. intraradices* 菌剂的施用为大豆可持续发展产业提供理论支撑。

4 结论

(1)迎茬种植会抑制大豆生物量积累和根际土壤细菌总数增加。

(2)接种 *R. intraradices* 或施用多菌灵均能有效缓解迎茬障碍,提升鼓粒期大豆株高、茎粗、根长、单株鲜重及根际土壤细菌总数,其中 *R. intraradices* 的作用尤为突出,其通过显著增加土壤细菌菌落数量,有效缓解土壤微生态失衡问题。

该研究对实现大豆迎茬障碍的绿色防控和可持续种植具有积极意义。

参考文献

[1] 高峰,王剑,魏同洋,等.全球变局下的我国大豆产业安全研究[J].中国油脂,2024,11(28):1-10.

[2] 张旭辉.接种根瘤菌对豌豆重茬障碍的缓解效应研究[D].兰州:甘肃农业大学,2021.

[3] 张晓聪,孙小雪,杨晓燕,等.连作北沙参根际土壤化感物质鉴定及其化感效应分析[J].中药材,2025(01):21-29.

[4] 孙金英,郭峰,白银凤,等.迎茬对大豆农艺性状及产量的影响[J].农村科技,2025(01):14-16.

[5] Wang Y, Xu X, Liu T, et al. Analysis of bacterial and fungal communities in continuous-cropping ramie (*Boehmeria nivea* L.Gaud) fields in different areas in China [J]. Scientific Reports, 2020,10(1):3564-3569.

[6] 王子凡,李燕,张庆银.微生物菌剂对设施番茄主要病害及土壤微生物群落的影响[J].中国农业科技导报,2024,26(06):102-112.

[7] 田蜜,陈应龙,李敏,等.丛枝菌根结构与功能研究进展[J].应用生态学报,2013,24(08):2369.

[8] 屈明华,俞元春,李生,等.丛枝菌根真菌对矿质养分活化作用研究进展[J].浙江农林大学学报,2019,36(02):394-405.

[9] 汪伯晏,陈金,程齐修,等.丛枝菌根真菌培养与应用研究进展[J].植物研究,2025,45(03):361-370.

[10] Ma X, Luo W, Li J, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi increase both concentrations and bioavailability of Zn in wheat (*Triticum aestivum* L) grain on Zn-spiked soils[J]. Applied Soil Ecology, 2018,135:91-97.

[11] Moarrefzadeh N, Khateri H, Abbasi S. Alleviation of *Rhizoctonia* root rot damages in common bean by some arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Journal of Applied Research in Plant Protection, 2023, 12(1): 13-24.

[12] 黄京华,谭钜发,揭红科,等.丛枝菌根真菌对黄花蒿生长及药效成分的影响[J].应用生态学报,2011,22(06):1443-1449.

[13] 杨柳,姚博翰,唐依伟.丛枝菌根真菌与印度梨形孢对枳生长与养分的影响[J].现代园艺,2025,48(05): 13-15.

[14] 李柄霖,丁德东,何静,等.丛枝菌根真菌对枸杞生长及抗根腐病的影响[J].云南农业大学学报(自然科学版),2022,37(04):547-552.

[15] 接伟光,林厚泽,杨冬莹,等.根内根孢囊霉对大豆成熟期生物量、根腐病及根际土壤百菌清残留的影响[J].江苏农业科学,2023,51(14):153-158.

[16] 谢夏,杨建兰,刘新育.土壤中细菌菌落总数的测定条件优化[J].中国农学通报,2020,36(11):92-95.

[17] 聂梦果,李朋发,蒋建东.根际微生物协助植物抵御极端土壤水分胁迫研究进展[J].应用与环境生物学报,2025,31(09):1487-1498.

- [18] 谢伟,郝志鹏,张莘,等. 丛枝菌根网络介导的植物间信号交流研究进展及展望[J]. 植物生态学报, 2022,46(05):493-515.
- [19] 陈品璐,杜霞,罗雪峰,等. 蔬菜主要连作病害发生现状、病原特性及趋势分析[J]. 植物医学,2025,4(01):1-11.
- [20] 刘坤雨,刘威,谷雪菲,等. 种衣剂和生物菌剂对连作大豆结瘤和生长的影响[J]. 北方农业学报,2024,52(06):31-38.
- [21] Russell M, Řezáčová V, Miller K S, et al. Common mycorrhizal networks improve survival and mediate facilitative plant interactions among *Andropogon gerardii* seedlings under drought stress[J]. *Mycorrhiza*, 2025,35(1): 1-14.
- [22] Vieira K C, Marascalchi N M, Rozmoš M, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal highways-What, how and why? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 202:109702.
- [23] Jia B, Cui X, Zhang Z, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi regulate amino acid metabolism, phytohormones and glycolysis pathway to promote the growth of *Suaeda salsa* under combined Cd and NaCl stresses [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 214: 108921.
- [24] 张金波,王永斌,谭巍巍,等. 大豆根际微生物的研究进展[J]. 大豆科学,2024,43(04):471-480.
- [25] Huang D, Ma M, Wang Q, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi enhanced drought resistance in apple by regulating genes in the MAPK pathway[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020,149:245-255.
- [26] Pei Y, Siemann E, Tian B, et al. Root flavonoids are related to enhanced AMF colonization of an invasive tree[J]. *AoB Plants*, 2020,12(1):plaa002.
- [27] Lin Z, Feng G, D Stéphane. Signal beyond nutrient, fructose, exuded by an arbuscular mycorrhizal fungus triggers phytate mineralization by a phosphate solubilizing bacterium[J]. *Isme Journal*, 2018,12(10): 2339-2351.
- [28] Prischmann V D A, Tülin Z, Laura A W, et al. Microbial inoculants differentially influence plant growth and biomass allocation in wheat attacked by gall-inducing hessian fly (Diptera: Cecidomyiidae) [J]. *Environmental Entomology*, 2020,49(5):1214-1225.
- [29] Jan J,冯固,段世龙,等. 丛枝菌根真菌菌丝际及其在土壤碳和养分循环中的重要性[J]. 植物研究, 2025,45(03):333-336.
- [30] 张月秋,袁野,邢立国,等. 多菌灵在我国小麦和水稻上的环境风险评估研究[J]. 现代农药,2024,23(06):66-72.
- [31] Qian S, Xu Y, Zhang Y, et al. Effect of AMF inoculation on reducing excessive fertilizer use[J]. *Microorganisms*, 2024,12(8):1550-1550.