

# 设施黄瓜连作障碍灾变机制及酵素菌应用研究进展

杨 凡<sup>1</sup>, 王建宏<sup>2</sup>, 蔡毓新<sup>3</sup>, 程俊跃<sup>3</sup>, 唐艳领<sup>1</sup>,  
陈绘利<sup>3</sup>, 马 凯<sup>1</sup>, 米国全<sup>1</sup>, 史宣杰<sup>1</sup>

(1. 河南省农业科学院园艺研究所 郑州 450002; 2. 河南省浚县农业农村发展服务中心  
河南鹤壁 456250; 3. 河南省庆发种业有限公司 郑州 450002)

**摘要:** 设施黄瓜连作障碍已成为制约我国黄瓜产业可持续健康发展的瓶颈问题。酵素菌是一种复合微生物菌群, 目前在设施连作障碍修复方面, 取得了一定的研究进展。本文简要介绍了设施黄瓜连作障碍危害及主要影响因素, 综述概括了酵素菌及酵素菌肥的原理、功效及其在消减连作障碍方面的研究进展, 并对酵素菌以后的研究提出了展望, 以期能为作物连作障碍综合防治提供一定的参考。

**关键词:** 连作障碍; 复合微生物; 酵素菌

中图分类号: S642.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2022)07-006-07

## Advances of disaster mechanism on cucumber continuous cropping disorder and application of enzyme microorganism

YANG Fan<sup>1</sup>, WANG Jianhong<sup>2</sup>, CAI Yuxin<sup>3</sup>, CHENG Junyue<sup>3</sup>, TANG Yanling<sup>1</sup>, CHEN Huili<sup>3</sup>, MA Kai<sup>1</sup>, MI Guoquan<sup>1</sup>, SHI Xuanjie<sup>1</sup>

(1. Institute of Horticulture, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China; 2. Xunxian Agricultural and Rural Development Service Center, Henan Province, Hebi 456250, Henan, China; 3. Henan Qingfa Seed Industry Co., Ltd., Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** Cucumber continuous cropping disorder has become a bottleneck restricting the sustainable and healthy development of cucumber industry in China. As a complex microbial community, the enzyme microorganism has made some progress in the remediation of soil continuous cropping disorder. In this paper, the hazards and main influencing factors of continuous cropping disorder in protected cucumber were briefly introduced, and the principle, efficacy and research progress of enzyme microorganism and enzyme fertilizer in inhibiting continuous cropping disorder were summarized. The future research of enzyme microorganism was prospected, so as to provide reference to the comprehensive prevention and control of continuous cropping disorder.

**Key words:** Continuous cropping disorder; Compound microorganism; Enzyme microorganism

黄瓜是世界性的经济作物, 在中国有悠久的栽培历史, 因其高产、高效和周年化生产已成为我国蔬菜种植区的支柱产业。随着社会经济的发展 and 人民生活水平的提高, 黄瓜消费量日益增加。黄瓜设施栽培极大地保障了人们的日常需求, 在黄瓜生产中具有举足轻重的地位<sup>[1]</sup>。但在栽培过程中, 由于设施环境相对封闭、栽培条件简陋、生产年限和

复种指数的增加, 加上利益驱动, 农民为了追求过高的土壤产出率, 采用“粪大水足不用管”的传统技术, 片面地加大化肥使用量, 导致根际微环境动态失衡、病原菌积累过多、营养比例失调、次生盐渍化加重以及自毒化感等, 使得连作障碍成为设施黄瓜栽培必然发生而又难以解决的难题, 也成为设施蔬菜健康可持续发展的技术瓶颈<sup>[2-5]</sup>。

收稿日期: 2022-01-20; 修回日期: 2022-05-13

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102110426; 222102110004); 河南省农业科学院科技发展专项资金(2020YQ12); 河南省农业科学院基本科研业务费项目(JC011)

作者简介: 杨 凡, 男, 副研究员, 主要从事连作障碍修复、微生物功能研究工作。E-mail: xiaoyuefuxiang@163.com

并列第一作者: 王建宏, 男, 高级农艺师, 主要从事微生物功能研究。E-mail: xxnyjjzz@163.com

通信作者: 史宣杰, 男, 研究员, 主要从事蔬菜育苗、微生物功能研究工作。E-mail: 13803840196@139.com

## 1 设施黄瓜连作障碍危害及灾变机制

### 1.1 设施黄瓜连作障碍危害

黄瓜连作障碍在全球普遍发生,美国、加拿大及中国等国家发生尤为严重,易出现“一年旺,三年黄,五年荒”障碍,是当前和今后蔬菜产业发展的重大和共性卡脖子问题<sup>[6]</sup>。据统计,黄瓜等设施蔬菜连作3年及以上,病虫害易发生,易死棵,造成间接经济损失15%~25%;连作5年及以上的温室或大棚需要停作、改茬和换土,甚至废弃<sup>[7-9]</sup>。吴凤芝<sup>[10]</sup>研究证实黄瓜酚酸类自毒物质累积会抑制下茬黄瓜的生长和产量。

### 1.2 设施黄瓜连作障碍灾变机制

近年来,国内外专家结合土壤、微生物、作物营养、植物病理、生态等学科,从生物因素和非生物因素对设施黄瓜连作障碍成因及机制进行了全面而深入的研究,形成了“毒素学说”、“相生相克学说”及“五大因子学说”等,但灾变主要影响因子不清楚<sup>[11-15]</sup>。经过长期的实地调查发现,设施连作障碍的形成70%以上来源于土传病虫害频发,20%来源于化感自毒物质,其他的因素则由土壤理化性状劣化或者其他未知因子所导致<sup>[16]</sup>。结合科研实践与前人结果分析,笔者认为连作障碍灾变影响因子主要有3个方面:根际微生态破坏失衡、植物自身分泌的自毒化感物质和土壤理化性质劣化<sup>[17]</sup>。

**1.2.1 根际微生态失衡,土传病虫害加重** 根际土壤微生态平衡破坏是导致连作障碍发生的主要因子。薛泉宏等<sup>[18]</sup>研究表明连作障碍本质是根际微生物菌群和连作作物共同作用,从而导致土壤微环境失衡、微生物功能退化或减弱。黄瓜连作栽培条件下,封闭有限的环境及农药化肥的施用使光合细菌、固氮细菌、解磷细菌、解钾细菌、氨化细菌及好气性纤维素分解菌等有益菌群随黄瓜连作年限的增加,数量及种类显著减少,加剧土壤理化指标恶化<sup>[19-20]</sup>。瓜类作物连作3年及以上,根际土壤微生物比例失调,细菌和放线菌种群及数量明显减少,镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)、轮枝孢菌(*Verticillium sp.*)等真菌数量增多,根结线虫、枯萎病等土传病虫害易发生,其中镰刀菌数量占真菌总数的比例相对于正茬比例提高了25.1%<sup>[21-24]</sup>。姚圣梅等<sup>[25]</sup>通过对武汉不同种植年限的蔬菜大棚取样,发现第一茬的细菌/真菌(B/F)比值为 $9 \times 10^3$ ,优势真菌为降解纤维素、半纤维素、木质素和果胶的腐生型真菌。随着种植年限的延长,B/F为 $1.1 \times 10^3$ ,优势真菌逐

渐由腐生型真菌转为寄生型真菌,以病原菌长蠕孢、交链孢等霉菌为主,作物病害严重;同时,光合细菌等减少,厌氧和硝化型细菌显著增加,土壤亚硝酸盐积累增多。近几年,以特定功能微生物为代表的生物菌剂或生物类有机肥研究取得了一系列突破,有效地控制了黄瓜、番茄、西瓜等重要经济作物根结线虫、枯萎病、青枯病等土传病虫害的发生,产生了显著的经济和社会效益,但使用效果因区域、种植制度、种植品种和土壤环境不同而不稳定。

**1.2.2 化感自毒作用** 化感自毒物质质量的累积是加剧连作障碍产生的一个重要因子<sup>[23]</sup>。黄瓜在生长过程中,通过释放醛类、酮类、酚类和酸类等代谢物影响其营养吸收等生理生化过程,进而降低根系活性,从而抑制根系和黄瓜生长<sup>[26]</sup>。前人从黄瓜根系分泌物中分离并鉴定出多种酚酸类物质,这些物质显著抑制黄瓜植株生长、叶片黄化,使根系多种酶活性降低及土壤微生物种类减少和代谢活性变弱<sup>[28-32]</sup>。自毒物质通过加重膜脂过氧化使根系细胞破裂,造成糖类、有机酸、氨基酸等营养泄漏,为病原菌快速生长繁殖提供条件<sup>[19]</sup>。胡元森等<sup>[21]</sup>研究发现,酚酸刺激瓜类枯萎病病原菌尖孢镰刀菌的菌丝生长,且促进鞘氨醇单胞菌数量显著增加。朱丽霞等<sup>[32]</sup>、黄玉茜等<sup>[33]</sup>也证实了根系分泌醛类、酮类及酸类等自毒物质对根系土壤微生物特别是真菌和厌氧型细菌有一定的促进生长和繁殖等作用,但不同作物根系分泌物种类及浓度高低对根际微生物起的作用可能也不一样,这有待进一步研究。

**1.2.3 土壤理化性质劣化** 黄瓜长期连作会降低土壤微团聚体比例、减少总孔隙度,土壤易板结。同时土壤中盐离子浓度过高,缓冲能力降低,从而导致植株生长受阻等。大棚黄瓜在常规管理条件下连续栽培3~5年后,物理性黏粒增加,通气透水性变差,土壤容重增加10%,盐分含量是露地土壤中盐分含量的3~15倍,土壤中 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 等离子浓度是露地离子浓度的7~16倍<sup>[34-35]</sup>。通过研究发现这些离子富集不仅会减弱作物根系吸水吸肥能力,降低作物抗逆抗病能力,使作物生长发育受阻,同时对土壤根际微生物生长繁殖、病虫害发生等也有一定的抑制作用。

## 2 酵素菌消减设施黄瓜连作障碍机制

土壤有益微生物不仅可以促进植物的生长发育、增强植物抗逆抗病、抑制植物病原菌生长,且降

解动植物残体、有机质及矿物质等。稳定健康的土壤微生物种类和菌群是消滅或克服土壤连作障碍、维持土壤生态系统稳定性和可持续性的重要驱动力。酵素菌是20世纪40年代日本专家岛本觉也研制的一种复合微生物菌群,由细菌、真菌和放线菌等24种功能微生物菌株及其代谢产物和酶组成的有益生物活性功能团<sup>[36]</sup>。酵素菌能快速有效分解畜禽粪便、农作物秸秆等农业固体废弃物,降解土壤和污水中的农药、化肥等,矿化页岩和沸石等矿物质。另外,酵素菌在生命活动及发酵分解过程中,能产生大量的核酸、氨基酸、糖及多种维生素等,营养价值相当高。酵素菌和酵素菌技术已被许多国家及地区广泛应用于农业、畜牧业等领域,展现了良好的应用前景。我国自1994年引进该菌群及技术,产生了较好的经济与社会效益<sup>[37-38]</sup>,但酵素菌微生物菌群如何消滅设施黄瓜连作障碍、促进黄瓜生长和抵御病虫害机制却不明确。笔者基于前期的工作实践和前人研究的综合分析,认为酵素菌主要通过以下3点消滅设施黄瓜连作障碍,抵御土传病虫害。

### 2.1 改良土壤理化性质,增强土壤肥力

首先酵素菌微生物菌群通过其自身代谢活动降解土壤中植株残体和畜禽粪便等农业废弃物,促进有机质分解形成新的腐殖质和大量的有机酸等;其次降解产物结合酵素菌菌群菌丝、多糖等次级代谢物形成土壤微团聚体,改善土壤团粒结构,增加土壤孔隙度和土壤持水量等,进而降低土壤容重、缓解土壤板结。酵素菌菌群可以重吸收重金属,降解化肥、农药及矿化页岩、沸石等。同时代谢活动中不断释放出植物生长所需的多种营养元素、酶及活性物质,减少土壤盐渍化,降低pH值,对改良土壤理化性质,增强土壤肥力起到积极作用。祝文婷<sup>[39]</sup>、曹力毅等<sup>[40]</sup>的研究也证明了细菌、真菌及放线菌等可通过菌丝和代谢产物等与土壤耦合,增加土壤水稳性团聚体含量来改善盐碱土的土壤结构,土壤pH从9.2降到8.3,土壤孔隙度增加了12%。还有研究表明,接种有益微生物不仅可以提高土壤酶活性和培肥地力,还可招募其他有益微生物,促进根际微生态平衡、土壤微生物生长繁殖及延缓衰减<sup>[24-25]</sup>。

### 2.2 调节作物生长,提高作物抗逆性

酵素菌有益菌群不仅在代谢活动中可以产生类似生长素、激动素、赤霉素、乙烯等植物激素类物质刺激和调节作物生长,且有益菌群中的真菌及放

线菌菌丝可以和植物根部形成假根,促进植物营养吸收、增强植物抗逆和提高产量等。研究表明,80%的根际细菌和真菌均能产生吲哚-3-乙酸(IAA)或者其他类似物促进作物生长<sup>[25,32,41]</sup>。笔者前期的研究表明,丛枝菌根真菌和酵素菌微生物菌肥缩短黄瓜嫁接伤口3~5 d,显著抑制根系膜脂的过氧化作用,降低MDA含量,增强根系活力。相比未接种酵素菌的处理,嫁接黄瓜成活率提高10%左右,壮苗指数提高95.6%<sup>[42]</sup>。酵素菌虽然可以促进植物生长,提高植物抗逆性等,但具体涉及哪1~2种微生物菌株作用机制不清楚,下步笔者将加大各菌种单独及协同作用研究,探明酵素菌调节植物生长、提高黄瓜抗逆性的主要微生物因子。

### 2.3 抵御病虫害

在抵御病虫害方面,酵素菌主要通过有益微生物群快速大量繁殖和定殖,在根部形成物理屏障、诱导作物过敏性反应、重寄生及毒杀等4大途径阻挡病原菌的入侵和繁殖,从而减轻或抵御病虫害发生<sup>[38,43]</sup>。研究表明酵素菌中的真菌、放线菌等菌丝可快速侵染黄瓜根部,造成根尖木质层坏死,从而抵挡病原菌入侵;其次有益菌群代谢产物如枯草芽孢杆菌肽类、木霉菌液、乳酸、双线菌抗生素等物质对多种蔬菜病原真菌和细菌生长有抑制或毒杀作用,对枯萎病、疫病、根腐病等多种土传病害均有很好的防治效果,抑制率从19.3%到94.0%,同时诱导植株PPO、POD和PAL等防御酶活性增强,而且活性持续时间长<sup>[27,41,44-45]</sup>。笔者在蔬菜根结线虫防控研究中发现淡紫紫孢菌通过菌丝和分泌代谢产物侵入、降解线虫卵或表皮,另外通过分泌毒素等毒杀线虫幼虫<sup>[46]</sup>。酵素菌虽然被广泛用于不同作物多种土传病虫害的防治,但田间抑病效果不稳定,原因归结为酵素菌在某些情况下受到根际微生物资源竞争或直接干扰竞争,不能在土壤中定殖或持续地繁殖,无法抵达作物根系,并不能发挥出预期防病的效果。因此,揭示和挖掘影响酵素菌防御土传病虫害的关键根际微生态因子、阐明酵素菌微生物群与黄瓜土传病害互作机制将是下步研究的主要内容。

## 3 酵素菌菌肥及功效

### 3.1 酵素菌菌肥种类

应用酵素菌有益微生物技术制作的复合微生物有机肥在改良土壤、提高地温和地力、促进生长和抗逆、克服农作物重茬病、提升产量和品质等效

果显著。酵素菌复合微生物有机肥根据功能和施用方法划分,当前主要有土壤增肥保肥类(例如酵素菌多种粒状肥、酵素菌液体肥)、土壤理化性质改良类(酵素菌堆肥、土曲子)和叶面施肥类(叶面喷肥)3大类,其原材料主要有畜禽粪便、农作物秸秆、页岩和农副产品下脚料等固体废弃物,取材方便,生产操作简单且易学<sup>[47-48]</sup>。

### 3.2 酵素菌菌肥功效

**3.2.1 改良土壤** 酵素菌微生物菌群在代谢活动过程中,通过分解土壤中畜禽粪便及农作物植株残体等产生大量的腐殖质、糖类、氨基酸、活性酶等多种营养物质,结合真菌和放线菌菌丝等形成土壤微团聚体,改良土壤、透气保水、增强地力和提高地温。另外,酵素菌肥中的酵母菌、乳酸菌等可加速土壤中氨态氮、硝态氮的分解,降低土壤pH值和盐离子浓度。多项研究表明,长期施用酵素菌发酵肥的土壤容重较施用秸秆堆肥、化肥及对照(不施用酵素菌及肥料)分别降低了5.7%、18.4%和12.4%,土壤有机质含量分别提高了0.5%、0.6%、0.6%,碱解N、速效P、速效K均有提高,土壤理化性质也有一定改善<sup>[37,48-49]</sup>。

**3.2.2 提高肥料利用率** 酵素菌复合微生物在自身代谢过程中产生了促进植物易吸收的核黄素、糖类、氨基酸、活性酶等多种营养物质,同时分解土壤中不能被植物直接吸收利用的有机和无机及难溶性矿质养分,同时还可降解化肥农药、重金属的残留。另外,菌丝和植物根部形成假根,可以伸入到根部无法达到的部位帮助根系吸收营养。据统计,酵素菌微生物有机肥的使用可以提高化肥利用率10%~20%,对土壤中镁、锰等金属有很强的还原和螯合性;另外无隔膜菌丝对P、Zn、Cu等元素的吸收速度是根系的4~10倍<sup>[50]</sup>。

**3.2.3 抑制土传病害** 长期施用酵素菌类肥料,其肥料中的微生物菌群在土壤中形成有益微生物群体优势,通过形成物理屏障、诱导植物抗性和代谢产物拮抗毒杀等方式抑制或减少有害病原微生物繁殖,克服设施蔬菜土传性病害,预防蔬菜根结线虫的发生。据报道酵素菌中大量有益微生物可以产生乳酸、酒精、几丁质酶、丝氨酸酶等代谢产物毒杀南方根结线虫幼虫,显著抑制卵的孵化,防效达71.9%以上<sup>[37]</sup>。另外在黄瓜穴盘苗期研究中,酵素菌能从源头抑制黄瓜枯萎病发生,且壮苗效果明显<sup>[51]</sup>。

**3.2.4 促进作物生长发育** 在促进作物生长发育方面,首先,酵素菌微生物菌群降解有机质和产生

IAA、GA、ABA、烟酸、泛酸、维生素等多种物质或活性酶促进植株生长发育。其次,有益微生物菌丝和植物根系形成假根,帮助植物根系对磷、钾等营养元素和水分的吸收,增强植物抗逆抗病能力,延缓植株衰老。再次,酵素菌微生物菌群产生的多种活性糖、酶等物质有利于植物光合作用和糖分的合成,对植物含糖量及果实品质风味的提升有积极作用。前人多项研究表明使用酵素菌肥料种植的果蔬类作物纤维素含量较未施用菌肥处理显著降低,维生素C、可溶性糖和可溶性蛋白质含量显著增加<sup>[52]</sup>,而花卉则花期较长、色泽鲜艳、不易凋谢<sup>[37,43,47]</sup>。

## 4 酵素菌在农业种植中的应用

酵素菌及酵素菌复合微生物有机肥技术自1994年引入我国以来,众多科研工作者结合国内作物类型、种植模式、土壤环境气候和生产投入水平等,投入大量精力研究并集成了适用于我国的酵素菌使用技术,取得了较好的成效。随着现代农业、有机生态农业与可持续农业的发展,酵素菌技术及酵素菌复合微生物有机肥应用将会迎来新的发展机遇。

在蔬菜生产应用方面,前人研究表明酵素菌及其酵素菌复合微生物有机肥可以显著促进辣椒、番茄、芹菜等作物生长、改善品质。长期使用酵素菌复合微生物有机肥,辣椒的产量、可溶性蛋白质及维生素的含量显著提高,纤维素含量降低<sup>[52]</sup>;番茄坐果率达90.3%,比未施用菌肥的处理提高67.4%,其产量提高37.2%<sup>[53]</sup>。在芹菜种植中,随着酵素菌复合微生物有机肥施入量的逐渐增加,芹菜产量呈线性提高,产量比未施用该肥料的处理增产76.3%~206.3%,可溶性糖含量显著增加<sup>[54]</sup>。还有研究表明,酵素菌复合微生物有机肥提高红菜薹的可溶性糖含量,表皮鲜艳,降低硝酸盐和纤维含量,有效改善其品质<sup>[55]</sup>。

在水果和粮食作物应用方面,施用酵素菌复合微生物有机肥不仅可提高桃单果质量,显著增加桃果实产量和可溶性固形物含量,且增加着色指数34.4%以上,贮藏期延长<sup>[56]</sup>。刘秀春等<sup>[57]</sup>发现,长期施用酵素菌可以提高葡萄、苹果和梨的产量,其中梨单株产量较未施用菌剂处理提高了39.84%;苹果、梨和葡萄可溶性糖含量分别提高了25.12%、20.01%和27.27%,葡萄维生素C含量提高了27.3%,苹果花青苷含量提高了24.8%,且对土壤理

化性质改善明显。高振芹等<sup>[58]</sup>发现,施用酵素菌肥的西瓜与未施用酵素菌肥相比产量提高了28.6%,可溶性固形物和总糖含量显著上升。在玉米研究中发现,玉米使用酵素菌肥生长显著,籽粒蛋白质、脂肪和可溶性糖含量显著提高,产量提高了41.7%,667 m<sup>2</sup>经济收入增加44.3%<sup>[59]</sup>。另外马铃薯生长繁茂期施用酵素菌微生物有机肥,产量显著增加,薯块抗腐烂能力明显提高<sup>[60]</sup>。

长期施用酵素菌堆肥,酵素菌有益微生物菌群招募其他根际微生物,驱动其他微生物在作物根际形成良好的根际微生态环境,促进作物生长,预防和减轻连作重茬病虫害等。马保国<sup>[61]</sup>通过在大蒜中施用酵素菌微生物有机肥,发现大蒜蒜头和蒜薹的产量及品质得到显著增加和提升,根际土壤木霉菌、乳酸菌、芽孢杆菌、酵母菌及放线菌等有益菌含量明显提高。还有研究表明利用酵素菌发酵堆制的木薯皮基质栽培黄瓜时,黄瓜长势和产量显著高于EM菌和CM菌等堆制的基质栽培,土传病害发生率及发生程度显著降低<sup>[62]</sup>。另外,双孢蘑菇在酵素菌发酵过的玉米秸秆堆肥上培养,其根际微生物种群及数量显著增加,双孢蘑菇菌丝生长加快,产量及质量显著提高<sup>[63]</sup>。

## 5 展 望

土壤微生物种群丰富、数量大,驱动着土壤中的生物化学循环,在消除土壤污染、优化土壤结构、提升土壤肥力、促进植物健康生长、诱导植物抗逆抗病等方面发挥着重要作用。通过培育特定的功能微生物组可以直接调节土壤微生物关系,抑制有害微生物,招募功能微生物,从而提升土壤健康水平,提高作物生产力。酵素菌及其酵素菌菌肥在农业生产中广泛应用于改良土壤、抵御病虫害,克服设施连作障碍等,但田间使用效果并不稳定。主要原因归结为:酵素菌及酵素菌技术由日本引进,各微生物间的功能物种、微生物多样性及相互作用、时空协调和稳定性等机制的研究不够深入。在某些情况下受到根际微生物资源竞争或直接干扰竞争,不能在土壤中定殖或持续地繁殖,无法抵达作物根系,并不能达到预期防病的效果。今后应加强以下几方面研究。

(1)解析酵素菌菌群种类及装配机制,阐明消减连作障碍机制。酵素菌及酵素菌技术自1994年引进我国以来,虽然在农业种植及消减瓜菜连作障碍中取得一定的成果,产生了较好的经济与社会效

益,但是酵素菌菌群、种类、比例及优势功能菌仍不清楚,每年只能从日本引进原始菌种,再进行培养生产,价格高昂且受到限制,制约了我国酵素菌及复合微生物产业的发展。通过微生物高通量测序及分子学相关技术手段,笔者初步分析并鉴定了酵素菌扩大菌群种类主要包括:*Saccharomycetales* fam *Incertae sedis*、*Diutina rugosa*、*Pichia mandshurica*、*Issatchenkia orientalis*、*Pediococcus acidilactici*、*Lactobacillus pontis*、*Lactobacillus amylovorus*、Unclassified *Streptomyces* 等(未发表)。这对下一步探究酵素菌原始菌种微生物种类、群落的装配机制和影响因素,揭示核心菌群的时空演化规律,从植物-土壤-病原菌-根际微生物等角度阐明酵素菌驱动根际微生物消减设施连作障碍机制,为深入破解黄瓜土传病害技术壁垒及通过调节根际微生物组促进精准农业发展提供技术与思路。

(2)优化、提升酵素菌菌群功能,精准靶向调控土壤健康。酵素菌在防治土传病虫害、改良土壤方面取得了一系列突破,但也存在根际微生物组调控方向不明确,效果因种植制度、土壤环境变化及人为扰动等而不稳定的情况。今后需进一步阐明土壤微生物、植物根系以及环境之间的互作耦合机制,探明影响因素,挖掘关键微生物因子,进一步优化酵素菌菌群,定向提升核心微生物组的功能,激发并提高植物免疫力,实现土壤及病虫害等精准靶向调控,同时也为开发复合有益功能生物有机肥及其协同增效因子提供理论基础和技术支撑。

(3)酵素菌及菌肥产品国产化有待推进。首先,研究表明,酵素菌固体废弃物发酵肥料质量因发酵原材料、环境、人为等因素变化而波动较大。室内或室外发酵时,室内发酵升温快,发酵周期短,固体废弃物腐熟降解效果远远好于室外发酵。黏土因养分含量多、保水保肥能力优于沙土,在以沙土/黏土为材料制作土曲子等发酵过程中,黏土发酵后,有益微生物菌群种类及数量显著多于沙土发酵后。但值得注意的是要控制黏土发酵湿度不能高于65%,否则发酵堆升温慢或温度起不来。其次,酵素菌肥料养分齐全,不仅可以提高农作物产量和品质,还可以改良土壤、减轻病虫害发生等,然而肥料配方单一,针对性不强,很难满足各种作物不同的需肥规律和特点,且用量过大,追肥次数较多,成本过高<sup>[64]</sup>。再次,如果病虫害等发生比较严重,仅使用酵素叶面肥达不到控制病虫害的效果,必须使用农药加以防治<sup>[65]</sup>。后期研究应以引进的酵素菌技术

为基础,添加相关优异功能微生物菌株,构建兼具土壤调节和防病促生的核心微生物组,研制出适合我国国情、土壤气候和耕作方式的针对性更强的酵素菌菌剂及专用肥,以提高酵素菌肥的利用效率,减少肥料浪费,降低肥料成本,增强作物的生产力及提高作物对全球气候变化和生物胁迫的抵抗力、恢复力,使酵素菌肥料在“一控两减三基本”的战略进程和生态农业高质量发展中,发挥其应有的促进作用。

### 参考文献

- [1] 李洪卓. 两种菌渣为原料的黄瓜育苗及栽培基质配方研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [2] 鲁琳,蔡琳. 设施土壤连作障碍产生及修复途径探讨[J]. 现代农业研究,2020,26(9):59-60.
- [3] 刘淑云. 日光温室蔬菜连作障碍的因果分析及防治措施探究[J]. 农业工程技术,2020,40(13):571-573.
- [4] 马晓玉. 大棚黄瓜连作效应及调控研究[D]. 江苏扬州:扬州大学,2014:65.
- [5] 董静,赵志伟,梁斌,等. 我国设施蔬菜产业发展现状[J]. 中国园艺文摘,2017,33(1):75-77.
- [6] 郑良永,胡剑非,林昌华,等. 作物连作障碍的产生及防治[J]. 热带农业科学,2005,25(2):58-62.
- [7] 何文寿. 设施农业中存在的土壤障碍及其对策研究进展[J]. 土壤,2004,36(3):235-242.
- [8] 万云龙. 浅谈设施蔬菜发展的风险因素及应对措施[J]. 吉林蔬菜,2013(12):48.
- [9] 司鲁俊. 设施蔬菜连作障碍分析及防控[J]. 农业科技通讯,2018(1):249-251.
- [10] 吴凤芝. 外源酚酸对黄瓜自毒作用的生理生化机制研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2002:1-9.
- [11] 李小霞,靳鲲鹏,李万星,等. 旱地番茄连作障碍机理研究进展[J]. 北方农业学报,2020,48(1):35-40.
- [12] 富宏丹. 设施番茄连作土壤生态劣变成因解析[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [13] 高晶霞,谢华. 不同连作年限下辣椒的光合特性与果实品质[J]. 北方园艺,2021(19):48-53.
- [14] 杨瑞瑞,吕春华,李任任,等. 甜菜连作障碍研究概况[J]. 中国糖料,2019,41(4):70-75.
- [15] 何志贵. 半夏连作障碍发生机制与轮作修复研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [16] 宋晓,李建芬,陈莉,等. 设施蔬菜土壤障碍问题探析[J]. 安徽农业科学,2020,48(17):88-90.
- [17] 张子龙,王文全. 植物连作障碍的形成机制及其调控技术研究进展[J]. 生物学杂志,2010,27(5):69-72.
- [18] 薛泉宏,同延安. 土壤生物退化及其修复技术研究进展[J]. 中国农业科技导报,2008,10(4):28-35.
- [19] 翁佩莹,郑红艳. 作物连作障碍的成因与机制及其消减策略[J]. 亚热带植物科学,2020,49(2):157-162.
- [20] 刘亚锋,孙富林,周毅,等. 黄瓜连作对土壤微生物区系的影响 I:基于可培养微生物种群的数量分析[J]. 中国蔬菜,2006(7):4-7.
- [21] 胡元森,吴坤,李翠香,等. 黄瓜连作对土壤微生物区系影响 II:基于 DGGE 方法对微生物种群的变化分析[J]. 中国农业科学,2007,40(10):2267-2273.
- [22] 谢星光,陈晏,卜元卿,等. 酚酸类物质的化感作用研究进展[J]. 生态学报,2014,34(22):6417-6428.
- [23] 王树起,韩晓增,乔云发,等. 根系分泌物的化感作用及其对土壤微生物的影响[J]. 土壤通报,2007,38(6):1219-1226.
- [24] 徐文静,靳晓东,杨秋生,等. 植物根际微生物的影响因素研究进展[J]. 河南农业科学,2014,43(5):6-12.
- [25] 姚圣梅,杨晓红,郑雪虹,等. 蔬菜大棚土壤微生物种类及数量的初步研究[J]. 华中农业大学学报,1997,16(4):347-350.
- [26] 朱峰,何永福,叶照春. 植物化感作用研究进展[J]. 耕作与栽培,2014,25(1):52-54,36.
- [27] YU J Q, MATSUI Y. Phytotoxic substances in root exudates of cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. Journal of Chemical Ecology, 1994,20(1):21-31.
- [28] YU J Q, MATSUI Y. Effects of root exudates of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) and allelopathicals on the ion uptake by cucumber seedlings [J]. Journal of Chemical Ecology, 1997,23(3):817-827.
- [29] 吕卫光,张春兰,彭宇,等. 外源苯丙烯酸抑制连作黄瓜生长的机制初探[J]. 中国蔬菜,2001(3):10-12.
- [30] 陈冬梅,黄锦文,柯文辉,等. 连作烟草根际土壤化感潜力评价及化感物质鉴定[J]. 中国烟草学报,2012,18(1):46-52.
- [31] 邹丽芸. 西瓜根系分泌物对西瓜植株生长的自毒作用[J]. 福建农业科技,2005,20(4):30-31.
- [32] 朱丽霞,章家恩,刘文高. 根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述[J]. 生态环境,2003,12(1):102-105.
- [33] 黄玉茜,杨劲峰,梁春浩,等. 香草酸对花生种子萌发、幼苗生长及根际微生物区系的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(9):1735-1745.
- [34] 何进勤. 宁夏设施农业土壤理化性状演变规律及其评价指标研究[D]. 银川:宁夏大学,2008:1-14.
- [35] 常连生,韩志卿,张电学,等. 秦皇岛市蔬菜大棚全盐及盐分组成离子变化的研究[J]. 土壤通报,2008,33(5):1126-1130.
- [36] 岛本邦彦. 岛本微生物农业应用法[M]. 郑重,译. 日本:磐亚株式会社,1996:5-15.
- [37] 文亚雄,谭石勇. 酵素菌技术及我国酵素菌肥料应用现状[J]. 湖南农业科学,2016,31(1):112-114.
- [38] 陈倩,刘善江,李亚星. 我国酵素菌技术概况及应用现状[J]. 安徽农业科学,2012,40(23):11612-11615.
- [39] 祝文婷. 黄绿木霉 T1010 对滨海盐渍土根际生态的调控效应研究[D]. 济南:山东师范大学,2013:1-5.
- [40] 曹力毅,毕江涛,肖国举,等. 3 株嗜(耐)盐菌株不同组合对盐碱土壤不同粒径团聚体含量的影响[J]. 河南农业科学,2019,48(8):74-80.
- [41] 何欢宇. 利用微生物肥料修复保护地瓜类的连作障碍[D]. 上海:上海交通大学,2010:4-9.
- [42] 杨凡,郭家彤,马凯. 丛枝菌根真菌对黄瓜双断根嫁接苗生长发育的影响[J]. 中国瓜菜,2020,33(12):61-65.
- [43] 冯蕾,赵运林,彭姣,等. 酵素菌微生物在农业生产中的应用进

- 展[J].现代农业科技,2016,31(1):220-223.
- [44] 尹汉文.枯草芽孢杆菌提高黄瓜耐盐性的研究[D].南京:南京农业大学,2006:4-12.
- [45] 台莲梅,高俊峰,左豫虎,等.长枝木霉菌 T115D 诱导大豆叶片防御酶活性及疫病盆栽防治效果[J].中国生物防治学报,2018,34(6):897-905.
- [46] 杨凡.淡紫紫孢菌 T-DNA 插入体库的构建和致病相关基因的功能研究[D].武汉:华中农业大学,2015:2-8.
- [47] 孔祥海.酵素菌肥料的功效与施用技术[J].吉林蔬菜,2015(8):37-38.
- [48] 刘德志.酵素菌肥料及其应用[J].吉林蔬菜,2015(S1):50-52.
- [49] 翁锦周,何炎森.生物有机肥对甘蔗产量及土壤的影响[J].亚热带农业研究,2005,1(3):13-15.
- [50] 刘海刚.微生物肥料之酵素菌肥[J].现代农业,2020,45(2):66-67.
- [51] 杨凡,唐艳颖,马凯,等.丛枝菌根真菌对黄瓜穴盘育苗幼苗质量的影响[J].中国瓜菜,2020,33(6):30-33.
- [52] 文廷刚,江雨晴,杜小凤,等.不同肥料处理对辣椒产量和品质的影响[J].江西农业学报,2013,25(3):30-32.
- [53] 刁亚娟.酵素菌肥对番茄生长发育及其土壤养分含量的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
- [54] 王青凤,孙权,王锐.酵素菌肥施用量对日光温室土壤及芹菜产量品质的影响[J].北方园艺,2011(3):41-43.
- [55] 翟敬华,蒋细旺.酵素对红菜薹生长发育及土壤特性的影响[J].长江大学学报(自然科学版),2017,14(18):12-17.
- [56] 李艳萍,贾小红,王艳辉,等.酵素有机肥对京郊桃的产量品质与贮藏性的影响[J].北方园艺,2008(7):41-43.
- [57] 刘秀春,莫云安,高艳敏.酵素菌生物肥在苹果、桃及葡萄上的试验[J].烟台果树,2005(2):5-7.
- [58] 高振芹,扈艳萍,孙东升.酵素菌肥在西瓜上的应用研究[J].辽宁农业职业技术学院学报,2005,41(2):15-16.
- [59] 宛彩云.生物有机肥对玉米生长发育及产量品质的影响[J].现代农业科技,2009(12):163-164.
- [60] 刘峰,王凤,王超,等.保罗微生物酵素菌肥在马铃薯上的应用效果[J].吉林农业科学,2011,36(4):31-32.
- [61] 马保国.酵素菌肥对大蒜的增产效应及培肥土壤效果初探[J].中国农学通报,2002,18(3):109-110.
- [62] 王旭,李勤奋,陈艳丽,等.3种发酵菌堆制木薯皮基质对黄瓜幼苗生长和光合能力的影响[J].江西农业大学学报,2011,33(2):243-247.
- [63] 钱磊,张志军,訾惠君,等.酵素菌技术在我国食用菌生产中的应用[J].食用菌,2017,39(4):4-6.
- [64] 姚传武.武汉市测土配方施肥技术推广现状及对策研究[D].武汉:华中农业大学,2008:18-23.
- [65] 李济宸,苑风瑞,王健,等.酵素菌肥料生产、使用中的几个问题[J].北京农业科学,2000(5):22-24.