

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2025.03.001

调控根际微生态防治蔬菜连作病害的研究进展

丁伟, 江其朋

西南大学 植物保护学院, 重庆 400715

摘要: 根际微生态体系由栽培植物根际土壤条件、根系分泌物、微生物及其代谢物等构成,是决定植物健康和抗病性的关键因素。蔬菜种植具有周期短、施肥量大、病害发生严重等特点,加之蔬菜主产区长期在同一区域连续种植单一作物,导致连作病害成为蔬菜生产中的重大难题。从根际健康微生态体系出发,突破单一药剂控制的传统观念,通过营造有利于根际健康的环境条件,研发新技术和产品,实现根际土壤酸碱平衡、根际微生态平衡、营养元素平衡以及病原物与寄主植物互作之间的平衡,才能有效控制此类病害,保障蔬菜安全生产。通过系统介绍根际环境组成、根际微生态特征、蔬菜根际微生态体系、根际微生态与蔬菜病害的关系,以及调控微生态控制蔬菜根茎病害的基本原理和应用等方面的研究进展,以期为从根本上治理蔬菜连作病害、实现蔬菜产业持续稳定健康发展提供参考。

关键词: 蔬菜、连作病害、微生态、
根际环境、生物屏障

中图分类号:S436.3

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:2097-1354(2025)03-0001-12

The Principle of Regulating Rhizosphere Microecology to Prevent and Control Vegetable Replant Disease

DING Wei, JIANG Qipeng

College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The rhizosphere microecology system composed of the rhizosphere soil conditions, root exudates, microorganisms, and metabolites of cultivated plants is a key factor determining the plant health and disease resistance. Vegetable cultivation has the characteristics of short cy-

收稿日期:2024-11-11

基金项目:重庆市农业产业技术体系“蔬菜创新团队”项目(CQMAITS202306),2024年市农业农村委特色经济作物全域提质增效项目。

作者简介:丁伟,博士,教授,主要从事天然产物农药、植物健康调控研究。

cle, high fertilizer consumption, and serious disease occurrence. In addition, the main vegetable producing areas have been continuously planting a single crop in the same area for a long time, which leads to serious occurrence of replant disease. Effective control of replant disease, ensure the healthy and safe production of vegetables have to consider the microbial ecosystem of rhizosphere health, overcome the traditional concept of single pesticide control, create favorable environmental conditions for rhizosphere health, develop new technologies and products, achieve rhizosphere soil acid-base balance, rhizosphere microecological balance, nutrient element balance, and the balance between pathogens and host plants. This article systematically introduces the research progress on the composition of rhizosphere environment, rhizosphere microecological characteristics, vegetable rhizosphere microecological system, the relationship between rhizosphere microecology and vegetable diseases, as well as the basic principles and applications of regulating microecology to control vegetable root and stem diseases. The aim is to provide reference for fundamentally controlling vegetable replant disease and achieving sustainable, stable and healthy development of the vegetable industry.

Key words: vegetables; replant disease; microecology; rhizosphere environment; biological barriers

蔬菜是人类膳食结构的重要组成部分,它既可以提供维持生命活动所需的营养物质,还能供给人体健康所必需的维生素、膳食纤维和矿物元素等。近年来,随着种植结构调整,蔬菜种植区日益集中,然而,轮作土地有限,连作障碍逐年加重。同时,由于全球气候异常变化、品种抗性问题及健康栽培技术匮乏等因素叠加,导致蔬菜种植区土壤及根际生态环境恶化^[1-2],以十字花科根肿病(病原菌为十字花科芸薹根肿病菌)^[3]、茄科蔬菜青枯病(病原菌为茄科雷尔氏菌)^[4]、镰刀菌根腐病(病原菌为镰刀菌属)^[5]、根结线虫病(主要病原为南方根结线虫)^[6]等为主的土传病害的发生危害逐渐加重,常年发病率为5%~20%,严重地块发病率达50%以上,导致局部地区损失严重,直接影响到蔬菜的产量、品质与特色,成为现代蔬菜产业持续稳定健康发展的重要隐患和制约因子^[7]。面对这一难题,仅靠单一的防控技术、药剂投入或品种改良难以奏效,亟需深入剖析植物与环境、植物与微生物之间的内在联系,借助现代生物技术、信息分析技术以及微生态调控技术等先进手段,精准识别影响蔬菜根际健康和根茎病害发生的关键因子,明确保障蔬菜根系健康的要素,以蔬菜种植过程中的健康维护为核心,从栽培管理和微生态调控两方面着手,综合运用多元化的系统控制策略,才能从根源上实现对根茎病害的有效控制,确保蔬菜产业的持续稳定与安全高效发展。

1 根际及根际微生态系统

1.1 植物根际的概念

植物根系作为植物最关键的器官之一,是支撑植物生命活动的基础。它可以固着植物,保持植物器官的完整性,同时兼具吸收和代谢的双重功能,可从生长介质中摄取养分和水分,向根际环境排泄代谢物质,满足植物生长发育的基本需求。根据植物根系和土壤的关系可以将根系环境分为根际、根围两个层次。根围是根可以延伸辐射的范围,而根际环境则是根表面1~2 mm的范围。根际是指受植物根系活动影响,在物理、化学和生物学性质上不同于土体的那部分微域环境。植物根系从该区域的土壤中吸收所需营养元素,同时通过分泌各种物质作用于土壤环境,进而主导形成了丰富的微生物菌群。一般而言,根际环境土壤异质性小,微生物

分布较为规律,是土壤—根系—微生物相互作用的区域,也是不同植物、土壤和环境条件共同形成的特定微生态环境^[8]。自1904年德国科学家 Hiltner 提出根际概念以来,植物根际研究领域蓬勃发展,逐步深入。从对根际环境的基础认知到对根际过程的精细化探究,不仅在基因层面取得了显著突破,还在个体、群体乃至整个生态系统的研究中收获了诸多重要成果^[9]。近年来,越来越多的学者对“根际”这一特殊区域与根茎病害发生的关系进行了深入研究,初步明确了连作引起的土壤理化性状的改变,以及土壤中长期残留的作物根系分泌物和残茬如何导致土壤微生物生态失衡,影响作物正常生长与病害发生^[10]。基于此,从根际微生态角度入手,探究根际的基本特性以及生物与环境间的相互作用机制,找到影响病害发生的关键制约因子,并解析病害演替规律,破解连作病害成灾机制的关键^[11]。

植物的健康源于根系,根系的健康源于土壤,土壤的健康源于土壤微生物,土壤微生物的健康源于土壤中的有机物。植物根系与根际土壤、微生物之间的物质交换和养分循环是一个复杂的开放系统,三者之间具有双向调节的关系(图1)。一方面,土壤作为植物根系固着、生长、吸收养分、招募根际微生物的重要载体,其健康状态直接影响植物生长发育和抗逆抗病功能。土壤类型及其养分含量、含水量、酸碱度等均能影响植物的生长和健康情况。另一个方面,土壤也是植物与微生物互作的重要介质和关键场所,植物病残体和根系分泌物等进入土壤环境后,能显著改变土壤的理化和生物学特性。研究表明,受植物根系影响,根际土壤的有机碳和全氮含量相较于非根际土壤分别提升了76%和54%^[12],从根围到根际再到根表,随着根际效应逐渐增强,土壤受影响程度也呈递增趋势,土壤的理化性质、微生物数量和多样性均呈现出规律性的阶梯式变化^[13]。此外,植物的品种、生育期、病害发生情况等与根际土壤的理化性质和微生物群落组成存在显著的相关性。因此,深入解析根际土壤特征对于破解植物健康问题具有重要的实际意义。

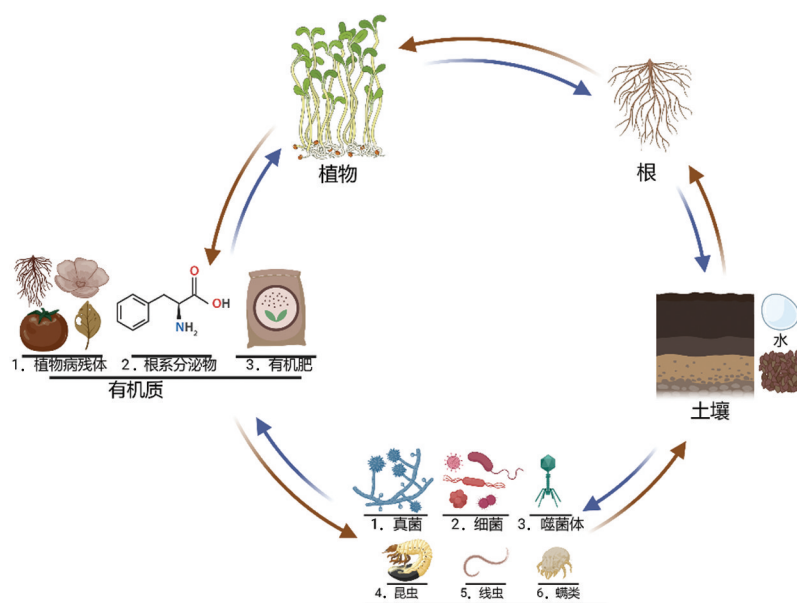


图1 植物健康与土壤、微生物和有机质的关系

1.2 根际效应

植物根系的细胞组织脱落物和分泌物为根际微生物提供了丰富的营养和能量,这使得根际微生物的数量和活性常高于根外土壤,这种现象被称为根际效应(Rhizosphere effect)。根际效应产生的主要原因是根系能量释放^[14],最直接的表现是根系分泌物作为能量载体被释放到根际,供微生物转化利用(图2)。因此,根际效应首先体现在根际微生物的数量上^[15]。根际土壤微生物的数量一般高于非根际土壤,根际效应通常用根际/根围微生物量比值(R/S)来评价, R 为根际系统中微生物的数量, S 为非根际土壤中微生物的数量, R/S 值越大,根际效应越明显。一般情况下, R/S 值大于1,通常为5~50,有时可达100。在有机质含量少的贫瘠土壤,或植物长势旺盛时, R/S 值更高。土壤类型对 R/S 值有很大影响,赵辉等^[16]研究表明,5种不同类型土壤的根际解磷菌、好气性自生固氮菌和芽孢杆菌数量均有显著差异,根际土壤中解钾菌、解磷菌、好气性自生固氮菌、氨化细菌和芽孢杆菌数量均多于非根际。其中,解磷菌细胞可以分解磷矿石和骨粉,并对磷元素有固定与释放作用,有利于土壤中磷元素的转化和吸收利用;好气性自生固氮菌对土壤中氮素的补充和平衡有重大作用,其数量多少也是评价土壤肥力的指标之一。氨化细菌则能分解土壤中的含氮有机物、氨基酸、蛋白质、核酸及含硫化合物,影响土壤氨化强度,释放氨并转化为谷氨酸等氨基酸^[17]。

不同类群微生物的 R/S 值差异显著,部分微生物种群的 R/S 值可达1 000以上。赵辉等^[16]对河南不同类型土壤根际和非根际微生物数量的研究表明,根际土壤微生物数量普遍高于非根际土壤,并且根际和非根际土壤中的细菌数量远大于真菌和放线菌。

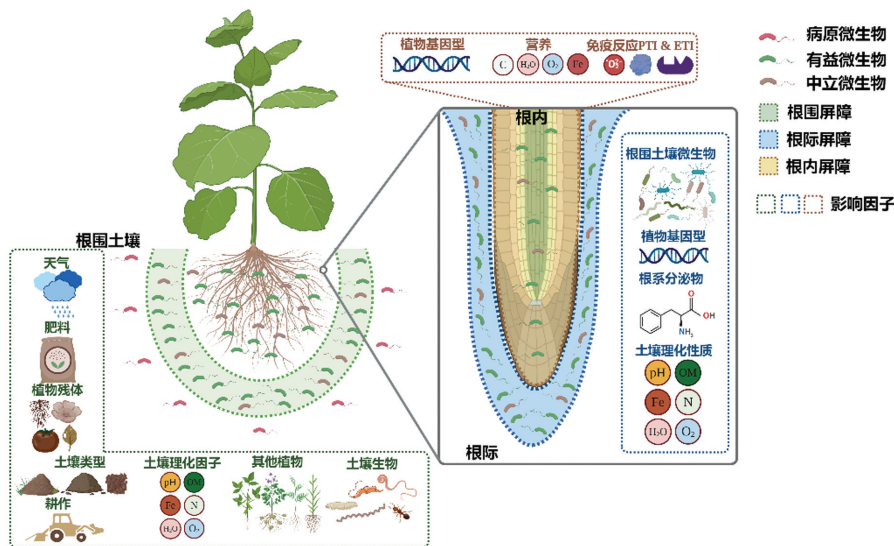


图2 根际组成要素及其主导因子

1.3 根际微生态系统

微生态平衡是生境维持生命体健康的基本前提,营养条件、气候、化学品及特殊生物等因素都可能影响到微生态的平衡。植物病害的发生可理解为植物周围的微生态系统失衡所致。例如,细菌性青枯病的发生即青枯病菌在多因子的作用下,破坏植物根际微生态系统平衡,进而突破寄主植物防御体系,最终实现对寄主植物的入侵、定殖与增殖^[18]。

植物根系、根际微生物群落、根际土壤及根际微环境(温度、湿度、水、光、气等)相互依存、相互作用,共同构成一个复杂系统,即根际微生态系统。研究根际微生态系统结构、功能和演替规律的科学称为根际微生态学。有别于研究植物与环境、光热气象条件、栽培措施等相互关系的宏观生态学(Macroecology),植物根际微生态学聚焦植物主导下的根际环境,内容广泛而复杂,涵盖根际微生物组成种类、优势种群及其作用;系统内外的能量流动、物质循环和信息传递;植物根系的遗传特性及吸收水肥能力;根系分泌物的种类及其作用;根际土壤的物理化学性质;根际微生物的变化动态及其对系统生物成分的影响;以及微生态系统的调控和优化等。

植物根系及根际微生物群落构成根际微生态系统的生命组分,其研究体系遵循生命系统的典型层级结构,涵盖能源层、转化层、交换层和沉积层等(图 3)。植物作为系统核心,其基因表达、细胞活动、器官功能、个体发育、种群动态及群落构建等生物学过程,均可与土壤环境形成复杂的互作网络^[9],这个生态体系中的各层次相互关联、互为依存,任何一个层次的异常都可能影响系统稳定,进而引发植物疾病,甚至影响植物群体健康。根际微生态理论的特点是以根际为中心,以根际微生态系统为研究对象,以植物—土壤—微生物及其环境的相互关系为研究主线,以根际微生态系统的调控为手段,以维护植物健康,提高作物生产力,发展可持续农业为最终目标。近 10 年来,应用根际微生态学理论指导生产实践已有诸多成功案例,成为推动我国农业可持续发展的重要基础支撑理论。

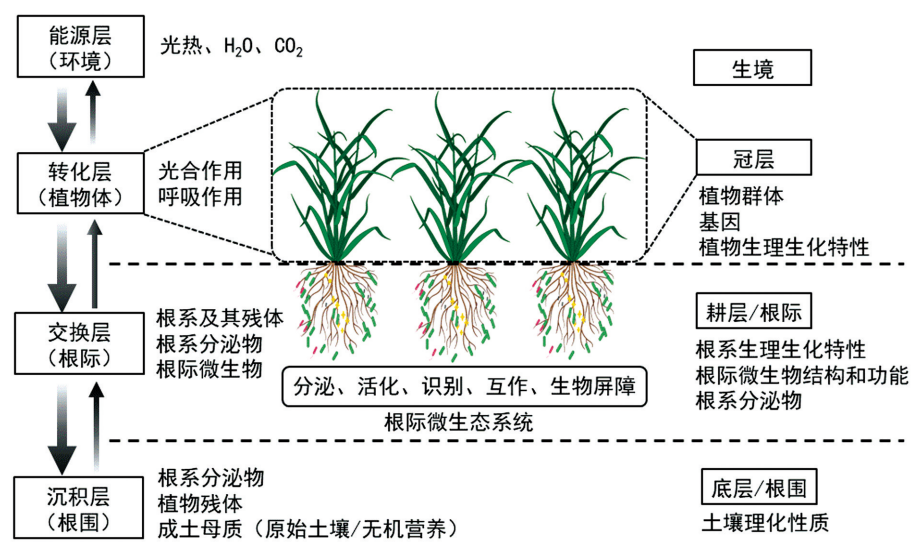


图 3 根际微生态系统的层次性

2 调控根际微生态控制蔬菜病害的机制

2.1 蔬菜连作病害发生与微生态的关系

蔬菜种植是我国农业种植业的重要组成部分,其栽培规律与其他作物一样,需要在各种要素的协同作用下,充分发挥蔬菜种子的基因潜力,从而实现优质高产和安全高效。但受蔬菜栽培措施、栽培习惯、可种植面积的限制,重茬连作情况十分普遍,由此引发的连作障碍严重,如

土壤质量下降、病原菌积累、病害加重、作物产质量下降等。特别是一些随土壤传播的侵染性病害,如青枯病、根结线虫病、根腐病等,在一些地区频繁发生。此外,连作或重茬作物残留物上携带的病原菌,如病毒、赤星病菌、疫霉病菌等会给来年的栽培带来不利影响。土壤还是许多害虫生存的重要场所,地老虎、金针虫、蝼蛄这3大类地下害虫大部分时间生活在土壤环境中,对作物根系健康和正常生长构成严重威胁。土壤传播的病虫害导致的作物损失十分严重,据估计,一般可减产20%以上,严重田块甚至绝收。蔬菜连作病害发生的根本原因是栽培蔬菜的根际微生态失衡。由于长期种植单一作物,化学投入品长期施用,土壤有机质下降等,导致土壤微生态结构发生显著变化,病原菌快速增殖,根际微生物多样性降低,有益微生物丰度降低,土壤微生物代谢能力降低,病原菌失去了制约因素,使病害一直处于严重发生状态(图4)。

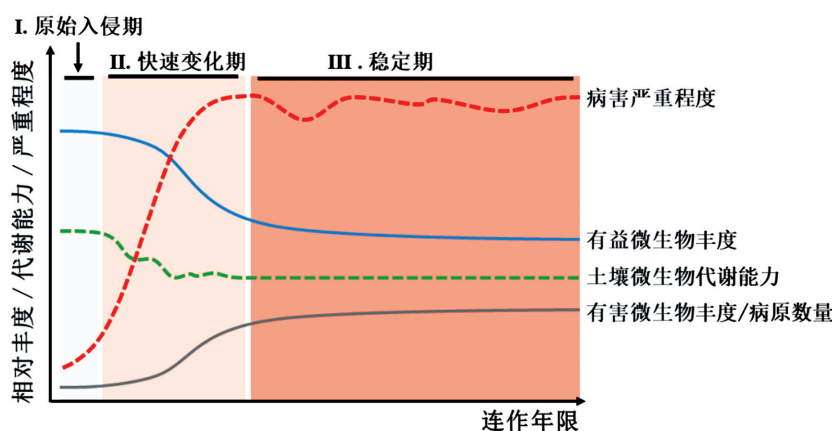


图4 连作导致植物病害发生加重的关系模式图

单一作物连续种植引起的根际土壤恶化,单一根系分泌物的长期释放和沉积,易感病原菌的反复侵染和迭代进化以及病原数量累积,都是导致作物连作障碍的重要诱因。直观表现为单一作物连续种植后病害加重且产量、质量下降。另外,“一炮轰”式施肥、随意撒施、过量施肥以及对化肥的依赖和有机肥施用的忽视等不当施肥习惯,造成了土壤板结、次生盐渍化、酸化等问题,这也是连作障碍的重要原因。

土壤结构退化表现比较直观,包括耕层变薄、板结情况突出、酸化加剧、有机质减少等,对作物的负面影响直接,即土壤“种不出”作物。相反,土壤功能退化表现较为隐蔽,如土壤微生物数量和多样性降低、有益菌含量减少、土壤微生物代谢解毒能力减弱等,对作物产生的负面影响更多是间接且持续的,即“种不好”作物。因此,调理土壤刻不容缓,只有提高土壤有机质含量、提升化肥利用率,才能保障土壤基本健康^[20]。

目前,由于对连作障碍和土传病害认识不足,菜民一般认为病源在作物,常常是“头痛医头、脚痛医脚”,缺乏“治未病”的预防观念,往往在田间植株出现严重枯萎、死苗症状时才采取防治措施。此时,病原菌、病原线虫等已侵入植株组织并致其病变,防治效果不佳。因此,治理连作障碍的关键在于修复连作体系下被破坏的土壤,特别是土壤微生态,而不仅仅是提升作物的抗病和抗逆性。

土壤微生物对维持土壤系统稳定性及恢复受损土壤系统具有重要作用,与土壤健康紧密相

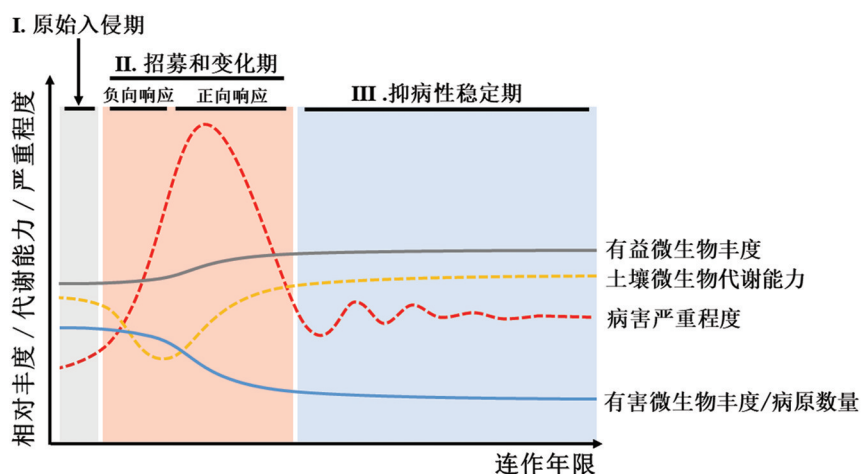
关。改进农业土壤管理措施能提高土壤微生物的群落多样性和功能多样性,是控制土传病害的有效途径^[21]。荷兰最近的一项研究指出,土壤中的微生物扮演着类似益生菌或免疫系统的角色,对于防治病虫害功效显著,当土壤中自然微生物具备平衡能力和抗御活性时,化学合成的杀虫剂和除草剂使用仅起辅助作用^[22]。在对某些病原体具有抗性的甜菜、辣椒、茄子等地块土壤进行取样分析时发现,土壤中存在各种天然功能微生物,可联合抵御病原真菌和细菌对寄主植物的侵染^[19]。然而,土壤中除已证实的抗病原真菌和细菌的微生物外,还有许多具有抵抗和保护作用的微生物未被挖掘。由此推断,土壤抑制或抵抗病原体的功能并非单一有益微生物的作用,而是土壤微生物群落协同作用的结果。同时,根际微生物群落结构及代谢产物在改善植物营养、控制病虫草害、消除污染、刺激和调控蔬菜生长、提高品质等方面都有着十分重要的作用。而有害菌数量增多不仅导致土壤性质恶化,还会使土壤微生物群落从细菌型转变为真菌型,进而引起地力衰竭^[23]。

2.2 连作年限影响病害发生的过程

连作体系中土传病原菌的致病过程主要包括引入(土体至根际)、定殖(根际至根表)、侵染(根表至根内)3个阶段。连作体系中的根系分泌物在土传病原菌入侵植物的各阶段均发挥作用。游川等^[24]认为,加剧土传病原菌入侵的根系分泌物按功能可分为3类:(1)利病,有利于土传病原菌在土壤的存活及其由土体向根际的迁移和增殖。(2)抑益,破坏根际有益微生物群落。(3)自毒,毒害根系防御系统。在缺乏系统且科学的健康栽培技术的情况下,连作体系作物病害的发生可分为3个特征明显的阶段,即原始侵入期、快速变化期和稳定期。在作物连作初期,作物和病原处于原始侵入期。该阶段土壤各项指标均能满足作物正常生长,病原数量呈稳步上升趋势,由于土壤微生物群落结构和功能处于动态平衡状态,所以病原突破根际生物屏障侵染作物的难度较大,病害发生不明显。当连作体系持续维持,土壤微生物群落功能剧烈变化,对自毒物质和根际沉积物的代谢能力急剧降低,土壤微生物群落结构加速失衡,其中有益微生物丰度在快速变化期后期快速降低,而有害微生物丰度和病原数量快速升高,此间病害发生严重程度迅速上升并最终达到峰值。在快速变化期,虽然连作障碍已经形成,但是依然可以通过更换作物来减少土壤环境恶化对作物产质量造成的不利影响。然而,一旦连作体系进入第三阶段,即稳定期,这种不利影响就无法通过更改栽培作物而消除。在稳定期内,连作土壤微生物代谢能力,特别是对有毒物质的降解能力维持在较低水平,有益微生物丰度被压低并保持在较低水平,而有害微生物和病原数量则保持在较高水平。此时,作物病害严重程度虽有波动,但会一直维持在较高程度。连作现象与作物品种关系不大(水旱作物之间存在一定差异),土壤结构和功能已完全被破坏,难以支持作物的健康生长(图4)。长期以来,人们在农田土壤上的高产出是以牺牲长久土壤健康为代价换取的。在现行的植物栽培理念和耕作习惯下,连作障碍或土壤健康问题的发生是必然的。那么,这种必然发生的情况能否被推迟、改变甚至完全逆转呢?答案是肯定的。

在实际生产中,存在一些连作十几年、甚至几十年但病害发生依然很轻、作物产质量依然很高的地块。例如,重庆荣昌盘龙的生姜地^[25-26]、湖南龙山木鱼坪的烟地^[27],这些地块有超过30年的连作历史,但未出现明显连作障碍,这样的土壤一般被称为抑病型土壤^[19]。需要注意的是,抑病型土壤也存在连作障碍逐渐加重的情况,但当连作时间超过一定限值后,连作障碍便会逐渐消失,最终呈现出抑病性特征。抑病型土壤的形成过程可大致分为3个阶段,即原始

入侵期、招募和变化期以及抑病性稳定期。与普通连作障碍土壤不同的是,随着连作时间的增长,抑病型土壤中有益微生物的丰度会逐步上升,并且在招募和变化期的正向响应阶段出现显著上升。与此同时,有害微生物和病原的数量会逐步降低,并在招募和变化期的正向响应阶段出现更为明显的下降趋势。在抑病型土壤的形成过程中,土壤微生物的代谢能力在原始入侵期以及招募和变化期的负向响应阶段会表现出降低的趋势,一旦进入招募和变化期的正向响应阶段,土壤微生物的代谢能力便会逐步恢复至初始水平,甚至略有提升。病害发生程度在连作初期会随着种植年限的增加而逐步升高,并在招募和变化期的正向响应阶段达到峰值。随着土壤代谢能力的恢复以及有益菌和有害菌、病原数量的相对稳定,病害的发生程度会逐渐减轻,并最终维持在较低水平(图5)。另外需要强调的是,抑病型土壤和普通连作障碍土壤的最大区别在于耕作管理模式,有机肥的大量施用、绿肥的种植以及长期的精耕细作在抑病型土壤形成中扮演着重要角色,这也与本文提到的植物健康与土壤微生物和有机质关系密不可分观点相吻合。



3 调控微生态控制蔬菜连作病害的途径

3.1 激发植物自然修复功能

植物可以通过根系分泌物招募土壤中的有益微生物到根际定殖,形成具有保护作用的根际环境,这种自我保护机制被称为根际微生态机制。在抑病型土壤形成过程中,这种机制对缓解连作障碍的不利影响起到了重要作用。因此,当连作系统还未进入稳定期,或者说土壤(微生态)结构和功能还未完全破坏时,可以通过人为干预刺激植物自然修复,帮助植物恢复其根际微生态系统对病原的抑制功能,克服连作障碍。通过植物自然修复功能克服连作障碍的前提是采取适当的调控措施加以辅助,且需要一定的修复周期,这种修复在不健康的连作系统中无法实现。同时需要指出的是,植物自然修复功能依赖于植物与其根际微生物的互作交流。

植物在生长发育过程中会招募有益微生物来协助应对病原菌侵害、盐分吸收、营养元素获取等问题。植物根系向根际释放的小分子物质,即根系分泌物(主要有糖类、氨基酸类、蛋白质、生长因子等),是植物招募有益微生物的重要媒介^[15]。这些分泌物为微生物生长提供必需

的碳源和氮源,从而在植物根系周围筛选和富集有益微生物群,同时扮演着信号分子的角色。如拟南芥在受到霜霉病病原菌侵染时,会在根际周围特异性富集一些抗病和促生微生物;豆科植物会在根系富集根瘤菌以协助根系吸收土壤中的氮元素^[28]。可见,根系分泌物在植物自然修复过程中具有重要作用。因此,有学者提出,在治理连作障碍的生产实践中可以将根系分泌物作为调控靶标,通过品种改良、间套作栽培措施、有益菌筛选与应用等手段,提高根际分泌物多样性、减少栽培作物分泌的自毒物质、分泌“抑病”根系分泌物,以缓解连作土传病害的发生^[24]。

3.2 “四个平衡”的调控修复

前文提到,治理连作障碍、控制连作病害的根本在于修复连作体系下被破坏的土壤微生态系统,单纯地依赖作物的自然修复功能无法达到对标治本的目的。健康的土壤系统通常具有“四个平衡”的特征,即土壤酸碱平衡、根际微生态平衡、营养元素平衡和寄主植物抗性与病原物互作之间的平衡^[18]。连作障碍的形成往往源自四个平衡的失衡,因此,修复四个平衡是调控微生态、控制蔬菜连作病害的首要任务。其中,土壤酸碱平衡是需要优先解决的问题,因为在土壤整体酸化和植物根际局部酸化问题日益严重的背景下,营养平衡、微生态平衡以及植物抗病力和病原致病力平衡的实现和维持都依赖土壤酸碱平衡。调节土壤酸度时,应注意减少化肥使用量,增施农家肥,并采用牡蛎粉、草木灰等生物材料进行调酸和改土^[20]。其次是营养平衡,营养平衡的实现能有效促进微生态平衡以及植物抗病力和病原致病力的平衡。生产中要坚持植物材料还田,增施有机肥,适当减少化肥和大量元素的施用,同时重视中微量元素的补充。第三,强化微生态平衡是修复作物根际微生态、缓解连作病害发生的关键,有益菌剂、合成菌群及其有益代谢物的增施均能有效强化微生态平衡。最后是植物抗病力和病原致病力的平衡,这与植物自然修复密切相关,且前三个平衡指标的达成均对于植物抗病力的提升具有显著促进作用。植物自然修复与“四个平衡”的调控修复互为补充,相互促进,才能从根本上缓解甚至克服连作障碍,有效抑制病害的发生。

3.3 优化根际微生态环境,强化三层生物屏障

由益生菌与寄主植物形成强大的微生态平衡系统在病原物侵入寄主时发挥着屏障作用,被称为生物屏障^[18]。植物内部和外部环境中存在的微生物可分为附生微生物和内生微生物。附生微生物包括根际微生物、叶际微生物以及茎际微生物;内生微生物则包括寄生微生物和共生微生物等。这些微生物一起构建了植物根部、叶部、茎部的生物屏障。部分附生微生物可与植物互作,突破物理屏障,从自由生活状态转为寄生生活,进入寄主体内成为内生微生物。若再突破化学屏障,就会转变成病原菌,导致植物生病。但植物周围的绝大部分附生微生物以及体内的内生微生物扮演着呵护植物健康、防御有害生物侵染,甚至与植物共存亡的角色。

根系微生物可分为根围微生物、根际微生物和根内微生物,这些微生物分层次阻挡病原微生物的进入,从而形成根围、根际和根内三层生物屏障。强化这三层生物屏障是有效控制根部病害发生的关键^[18]。根系三层生物屏障与根茎病害发生的关系见图6。三层生物屏障理论对调控根茎病害具有重要的指导作用。在育苗时期,通过在育苗基质中拌入益生菌,可以抢占生态位,强化根际生物屏障;在根围环境中,通过有机肥拌菌、创造有利于益生菌生长的土壤条件等措施,可以强化根围生物屏障;优化植物生长环境,叶面或者根际增施益生菌等可以强化根内生物屏障。

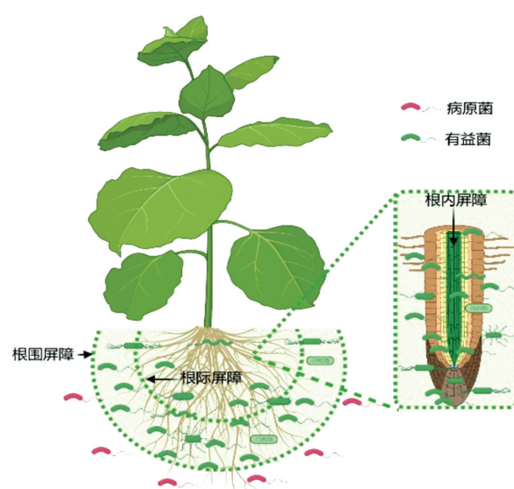


图6 植物根系三层生物屏障示意图

4 调控根际微生态控制蔬菜连作病害理论的应用

近年来,借助微生态理论研究成果,通过益生菌应用、优化植物栽培环境、调控生物屏障、增进植物健康等手段控制植物病害发生已成为植物病害防控研究的热点。*Science*、*Nature*、*Cell* 等世界著名科技杂志均十分关注植物健康与根际微生态结构和功能的关系,发表了一系列理论和技术创新成果^[29-31]。在生产实践中,我国在主要粮食和经济作物上已初步形成了通过构建多元平衡体系维护植物健康,实现持续安全生产的技术体系。西南大学根际微生态过程与调控研究团队与重庆市农业技术推广总站蔬菜病害防治团队合作研究,以连作蔬菜土传病害发生与根际微生物的关系为突破口,关注与蔬菜品质风格特色密切相关的气候条件和土壤特性,通过分析根际营养状况和微生物组学特征等关键因子,形成了影响连作土传病害发生的“四个平衡”理论^[18],筛选出对根茎病害持续控制、强化根际生物屏障、维护蔬菜与土壤健康的微生态调控技术与多项物化产品。通过技术组配进行推广示范,开展培训讲座进行技术传播,在蔬菜基地现代化、规范化发展的进程中,不断夯实蔬菜科学种植的基础,提高科技赋能产业发展的能力和蔬菜产业一线生产者的专业技术水平。依靠科技创新和机制创新,走“生态、安全、优质、高效”的科学发展道路,这对于改善蔬菜根茎病害,降低化学农药、肥料的使用量,保证蔬菜生产的健康、持续、安全发展,提高蔬菜的经济效益和菜农种植积极性具有十分重要的意义。

在推进蔬菜产业高质量发展、培育农业新质生产力的战略需求下,创新防控技术成为解决连作障碍的关键突破口。围绕蔬菜高质量发展,特别是提高新质生产力,更好地赋能蔬菜产业的创新发展,针对蔬菜连作病害病原菌在土壤中存活时间较长且易发生迁移,农业和化学调控方法存在防治周期长、环境代价大、防治难度大且效果有限等问题,蔬菜健康栽培和连作障碍克服以及高效安全生产必须走技术创新发展的新路,微生态调控技术的应用具有广阔的前景,今后还需要进一步加强以下几个方面的工作。

首先,在理论创新层面,要进一步明晰蔬菜连作病害病原菌特性、土壤微生态相关因素(土壤理化性质、土壤养分、根系分泌物、酶活性、微生物群落特征等),特别是微生物组的特征和控病机制;深化调控土壤健康和微生态平衡的理论依据。当前,利用生物农药、生防菌剂等调

控土壤微生态已具备较强的理论基础,以根际微生物群落组成与功能定向筛选为核心的土壤微生态调控途径研究显得尤为关键。

第二,在技术创新层面,从微生态调控技术入手,探索根围、根际、根内的生物屏障优化技术。生物防治主要通过改善蔬菜根际微环境和微生物群落功能,抑制病原菌的入侵和生长,兼具精准、高效、生态等特点,成为蔬菜连作病害土壤微生态调控的重要方法。现阶段应结合育种、轮作种植、土壤调理、栽培管理等农业防治方法,构建合理的根际微生物群落结构和功能,改善土壤微生态环境,提高蔬菜对病害的免疫能力,创新可持续、多样化、常态化的综合绿色防治技术。

第三,在产品创新层面,特别关注蔬菜的安全、高效生产,避免化学肥料、农药和生物激素的过分使用。更加重视高效生物农药、拮抗菌剂、合成菌群、生物菌肥、以根际健康调控为主的土壤调理剂等优化根际微生态的产品的研制。

第四,在手段创新层面,要强化数字化和智能化技术在蔬菜健康栽培领域的应用。立足蔬菜健康管理的多个层面,从自身健康、单一病虫害防治上升到综合治理;从病害防治为核心,上升到监测、预警、精准施药、全面评估的数字化管理;从一家一户一块地的局部防控上升到全区域、长周期、多病虫害、全链条的安全管理。

第五,在服务体系层面,强化专业化服务队伍的作用,针对性地建设各地植物医院。特别是建立区域蔬菜专业化的植物医院服务平台,将健康与病害诊断、土壤基础管理、品种与种植布局等纳入医院管理范畴,把责任明确到政府、植物医院和菜农等多个层面,确保技术措施和技术规程能够持续发挥作用。

随着理论、技术、产品和服务体系的不断完善,从植物医学和植物健康管理的理念出发,瞄准植物根际健康的关键问题,积极推进根际健康管理的技术和产品应用,持续优化根际健康的微生态体系,从根源上消除发病原因,对于有效解决长期困扰我们的连作蔬菜病害及其带来的经济损失等问题,具有十分重要的意义和价值。

参考文献:

- [1] 郑军辉,叶素芬,喻景权. 蔬菜作物连作障碍产生原因及生物防治[J]. 中国蔬菜, 2004(3): 57-59.
- [2] 吴凤芝,赵凤艳,刘元英. 设施蔬菜连作障碍原因综合分析与防治措施[J]. 东北农业大学学报, 2000, 31(3): 241-247.
- [3] 王靖,黄云,李小兰,等. 十字花科根肿病研究进展 [J]. 植物保护, 2011, 37(6): 153-158.
- [4] 乔俊卿,陈志谊,刘卮洲,等. 茄科作物青枯病研究进展 [J]. 植物病理学报, 2013, 43(1): 1-10.
- [5] 王喜刚,杨波,郭成瑾,等. 宁夏回族自治区马铃薯镰刀菌根腐病原菌的分离鉴定与致病性测定[J]. 植物保护学报, 2020, 47(3): 609-619.
- [6] 崔鑫,岳向国,李斌,等. 蔬菜作物根结线虫病害防治研究进展 [J]. 中国蔬菜, 2017(10): 31-38.
- [7] 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.
- [8] DU J F, GAO Q X, JI C, et al. *Bacillus licheniformis* JF-22 to Control *Meloidogyne incognita* and Its Effect on Tomato Rhizosphere Microbial Community [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 863341.
- [9] 张福锁,申建波,冯固. 根际生态学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- [10] BAKKER P A H M, BERENDSEN R L, DOORBOS R F, et al. The Rhizosphere Revisited: Root Microbiomics [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2013, 4: 165.
- [11] 卢维宏,张乃明,包立,等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(4):

- 651-658.
- [12] KUZUYAKOV Y, DOMANSKI G. Carbon Input by Plants into the Soil. Review [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2000, 163(4): 421-431.
- [13] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望 [J]. 植物生态学报, 2014, 38(3): 298-310.
- [14] LIU Q, CHENG L, NIAN H, et al. Linking Plant Functional Genes to Rhizosphere Microbes: A Review [J]. Plant Biotechnol J, 2023, 21(5): 902-917.
- [15] 毕开涛, 韩伟, 陈佛源, 等. 基于根际生物屏障构建的烟草青枯病绿色防控技术的应用研究 [J]. 植物医学, 2024, 3(1): 22-32.
- [16] 赵辉, 赵铭钦, 程玉渊, 等. 河南南阳烟区不同类型土壤的根际和非根际微生物及酶活性变化 [J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1057-1063.
- [17] 程尉烜, 康业斌. 生物羊粪对烟株农艺性状及其根际土壤微生物与酶活性的影响 [J]. 江西农业学报, 2021, 33(11): 121-125.
- [18] 丁伟, 刘晓姣. 植物医学的新概念——生物屏障 [J]. 植物医生, 2019, 32(1): 1-6.
- [19] BERENDSEN R L, PIETERSE C M J, BAKKER P A H M. The Rhizosphere Microbiome and Plant Health [J]. Trends in Plant Science, 2012, 17(8): 478-486.
- [20] 丁伟, 李石力. 植物医学的新概念——土壤免疫 [J]. 植物医生, 2019, 32(2): 1-7.
- [21] 刘烈花. 利用土壤微生物多样性控制十字花科根肿病的研究进展 [J]. 植物医生, 2020(5): 32-35.
- [22] TRIVEDI P, LEACH J E, TRINGE S G, et al. Plant-Microbiome Interactions: From Community Assembly to Plant Health [J]. Nature Reviews Microbiology, 2020, 18(11): 607-621.
- [23] CAO Y, YANG Z X, YANG D M, et al. Tobacco Root Microbial Community Composition Significantly Associated with Root-Knot Nematode Infections: Dynamic Changes in Microbiota and Growth Stage [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 807057.
- [24] 游川, 杨天杰, 周新刚, 等. 连作根系分泌物加剧土传病害的机制和缓解措施研究进展 [J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1201-1211.
- [25] LIU X J, JIANG Q P, HU X Q, et al. Soil Microbial Carbon Metabolism Reveals a Disease Suppression Pattern in Continuous Ginger Mono-Cropping Fields [J]. Applied Soil Ecology, 2019, 144: 165-169.
- [26] ZHANG S T, JIANG Q P, LIU X J, et al. Plant Growth Promoting Rhizobacteria Alleviate Aluminum Toxicity and Ginger Bacterial Wilt in Acidic Continuous Cropping Soil [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 569512.
- [27] 何洪令. 烟草青枯菌拮抗细菌的筛选鉴定及其生防特性研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [28] ZHAO M, ZHAO J, YUAN J, et al. Root Exudates Drive Soil-Microbe-Nutrient Feedbacks in Response to Plant Growth [J]. Plant Cell Environ, 2021, 44(2): 613-628.
- [29] MENDES R, KRUIJT M, DE BRUIJN I, et al. Deciphering the Rhizosphere Microbiome for Disease-Suppressive Bacteria [J]. Science, 2011, 332(6033): 1097-1100.
- [30] CASTRILLO G, TEIXEIRA P J P L, PAREDES S H, et al. Root Microbiota Drive Direct Integration of Phosphate Stress and Immunity [J]. Nature, 2017, 543(7646): 513-518.
- [31] ZHOU F, EMONET A, DÉNERVAUD TENDON V, et al. Co-Incidence of Damage and Microbial Patterns Controls Localized Immune Responses in Roots [J]. Cell, 2020, 180(3): 440-453. e18.

责任编辑 孙文静 崔玉洁