

DOI:10.13718/j.cnki.zwxy.2025.03.002

基于土壤消毒联合微生物生态重构技术防治 土传病害的研究进展

范天宇¹, 周再阳², 卢军², 易蔓², 刘勇²,
张奇福³, 辉正华⁴, 李石力¹, 鄢敏²

1. 西南大学 植物保护学院, 重庆 400715;
2. 四川省烟草公司 宜宾市公司, 四川 宜宾 644600;
3. 云南省烟草公司 临沧市公司 云县分公司 忙怀烟叶工作站, 云南 临沧 677000;
4. 云南省烟草公司 临沧市公司 云县分公司 茂兰烟站, 云南 临沧 677000

摘要: 土壤消毒通过消除土壤中病原菌, 降低其对根系侵染的风险, 可有效减少病害发生, 尤其在土传病害防治中, 是一种行之有效的技术。然而, 该项技术能消灭土壤中绝大多数甚至所有的微生物, 导致土壤出现阶段性生物真空, 通过生防菌或生物菌肥外源补施等技术, 可快速占领空白生态位, 对土壤微生态进行重构, 提高对土传病害的控制效果。基于此, 系统梳理了广谱与局部消毒在防治土传病害中的技术特征, 分析了消毒技术对土壤理化性质与微生物群落结构的影响, 总结了基于微生物的微生态重构在消毒技术中的应用现状, 并提出了土壤消毒中微生态重构的技术途径与对策, 可为土传病害绿色高效防控提供重要的技术支持。

关键词: 土传病害, 土壤消毒; 土壤修复;

土壤微生态; 微生态重构

中图分类号: S432.4

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)03-0013-09

Research Progress on the Prevention and Control of Soil-borne Diseases Based on Soil Disinfection Combined with Microecological Reconstruction Technology

收稿日期: 2024-06-10

基金项目: 中国烟草总公司四川省公司科技项目(SCYC202418); 西南大学中央高校基本科研业务费项目(SWU-KR22049)。

作者简介: 范天宇, 硕士研究生, 主要从事土传病害绿色防控技术研究。

通信作者: 鄢敏, 硕士, 农艺师。

FAN Tianyu¹, ZHOU Zaiyang², LU Jun², YI Man², LIU Yong²,
ZHANG Qifu³, HUI Zhenghua⁴, LI Shili¹, YAN Min²

1. College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Sichuan Tobacco Company Yibin Company, Yibin Sichuan 644600, China;

3. Manghuai Tobacco Workstation, Yunxian Branch of Lincang Tobacco Company, Yunnan Province, Lincang Yunnan 677000, China;

4. Maolan Tobacco Workstation, Yunxian Branch of Lincang Tobacco Company, Yunnan Province, Lincang Yunnan 677000, China

Abstract: Soil disinfection can effectively reduce disease incidence by eliminating soil pathogens and reducing the risk of root infestation, and may be an effective technique, especially in the control of soil-borne diseases. However, this technology can eliminate the most or even all microorganisms in the soil, resulting in a biological vacuum in the soil. The soil microbiology can be reconstructed by occupying the blank ecological niches rapidly through the application of bio-control bacteria or exogenous supplementation of biofungal fertilizers, which can improve the effect of controlling soil-borne diseases. Based on this, this paper systematically combed the technical characteristics of broad-spectrum and local disinfection in the prevention and control of soilborne diseases, analyzed the impact of disinfection technology on soil physicochemical properties and microbial community structure, summarized the current status of microbial-based microecological reconstruction in disinfection technology, and put forward the technological pathways and countermeasures of microecological reconstruction in soil disinfection, which can provide an important technologic support for the green, efficient prevention and control of soil-borne diseases.

Key words: soil-borne diseases; soil sterilization; soil remediation; soil microbiology; microecological reconfiguration

土传病害指生活在土壤或残留于病株残体中的病原体在适宜条件下从植物根部或茎基部侵染植物引起的植物病害的统称^[1],具有侵染隐蔽性强、分布范围广、危害程度大等特点^[2]。土传病害一旦发生,往往难以实现有效控制,已成为多种作物可持续稳定生产的限制性因素。土壤消毒能有效降低土壤中病原菌的相对丰度,广泛应用于连作土壤修复以及土传病害防治等方面^[3]。土壤消毒具有效果快、广谱性、高效性的特点,能迅速降低土壤中病原菌的数量,减少土传病害的发生^[4]。然而,土壤消毒处理后,在短期内虽然能降低致病菌数量,但同时也可能对有益微生物产生抑制作用^[5],从而导致土壤微生物群落结构失衡,增加土传病害再次发生的风险。

土壤健康是抑制土传病害发生、保证植物正常生长的关键与基础^[6],主要由有机质含量、pH值、生物可利用养分和土壤微生物等因素共同决定^[7]。这些因素与植物及土壤环境之间相互作用,长期协同进化,形成微生态系统和天然生物屏障体系,以应对外界环境带来的压力与挑战,抵御土传病原微生物的侵染^[8]。土壤消毒有利于控制土传病害,但同时也会破坏土壤微生态体系,增加后期病害严重发生的风险。因此,消毒后的微生态修复技术显得尤为重要。

研究证实,在土壤消毒后添加生防菌、有机肥等,可使有益微生物迅速占据空白生态位,提升其在群落中的相对丰度,抑制有害菌群的扩展,从而促使根际微生物群落结构及其功能快速恢复,维持土壤微生态平衡^[9]。联合使用上述两种技术,是广泛采用且行之有效的土壤微生态重构措施。本文围绕土壤消毒技术、对土壤微生态系统的影响,以及消毒后微生态重构策略展开综述。

1 土壤消毒方式与应用现状

当前的土传病害控制中,土壤消毒主要以药剂消毒为主,通常在作物种植前将药剂施入土壤中,防止种子、种苗带病,并抑制土壤中病原菌的繁殖与扩散。根据药剂应用后作用的范围,土壤消毒方式可分为全域性消毒与局部消毒。全域性消毒大多数采用熏蒸消毒方法,即在作物种植前将熏蒸剂通过注射或混土等方式均匀施入土壤,并采用密封膜进行密封处理,使熏蒸剂中的有效成分在土壤中扩散,进而杀灭土壤中的病原菌^[10]。此外,还可以通过将杀菌剂/消毒剂直接应用于土壤中,使其有效成分在灌根区域内释放,从而进行局部消毒^[11]。

1.1 土壤熏蒸消毒

熏蒸剂具有高挥发性和强灭生性的特点,常用的土壤熏蒸剂包括氯化苦、棉隆等。氯化苦消毒控病的主要机制是在土壤中分解产生 CO_2 、氯化物和硝酸盐,通过氯化物在土壤中的不断扩散起到消毒效果^[12]。氯化苦熏蒸后能够有效降低病原菌(如镰刀菌属和疫霉属)的相对丰度^[13],还可以抑制杂草种子的萌发及土壤中线虫的数量^[14]。通过氯化苦熏蒸处理防控生姜土传病害的研究表明,熏蒸处理对青枯病后期的防效达到了 83.0%,对茎基腐病后期的防效为 83.6%^[15]。研究者还发现,经过氯化苦处理后,草莓根际土壤微生物群落结构发生显著变化,芽孢杆菌门和厚壁菌门的相对丰度增加,同时变形杆菌门、酸杆菌门和鞘氨醇门的相对丰度降低,尤其能够显著降低镰刀菌属的相对丰度,降幅超过 90%^[16]。在土壤熏蒸中,棉隆也常用于土传病害的防治,其主要作用机制为:在土壤中棉隆转化为异硫氰酸甲酯后,通过炭基化反应破坏生物体内酶结构,达到杀虫灭菌的效果^[17]。研究发现,通过棉隆熏蒸处理的草莓连作土壤,土壤中致病菌如枝顶孢属和镰孢菌属的相对丰度有效降低,分别下降 93.45% 和 23.53%^[18]。此外,在草莓种植前进行棉隆熏蒸处理,能够有效防治根结线虫病,收获期的防治效果可达 85% 以上^[19]。土壤熏蒸处理在防治土传病害的同时,还能够产生一定的营养效应。研究发现,氯化苦熏蒸后,短期内能够使土壤中铵态氮的含量增加 10 倍,并促进根系土壤中铵态氮的供应,提高底物利用活性^[20]。杨绅等^[21]的研究表明,棉隆熏蒸后可显著增加土壤中的铵态氮水平,并不同程度地提升烟草硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶的活性,促进烟草根茎叶各部位硝态氮的代谢及烟株的生长。

1.2 土壤局部消毒

局部消毒是通过将化学药剂直接应用于土壤或植物根部的局部区域,作用于病原微生物的侵染区域,从而形成对植物根部的局部性保护。王垚等^[22]采用四霉素与噻霉酮按 5:1 进行复配,在烟苗移栽后对根部进行局部灌根消毒处理,在发病初期和高峰期的防效分别为 95.59% 和 87.57%。三氯异氰尿酸是一种强氧化剂和氯化剂,具有高效、广谱、安全的特点,对细菌、病毒、真菌等均有杀灭作用,广泛应用于水稻、棉花、辣椒、烟草等作物的土传病害防治^[23]。姚红艳^[24]的研究发现,在水稻植株根部局部灌根 36% 三氯异氰尿酸可湿性粉剂,每 667 m^2 用量 60 g,显著抑制稻瘟病的发生,防效可达 68.1%。代玉豪等^[11]的研究中,每 667 m^2 使用 98% 三氯异氰尿酸 200 g 对烟草根部进行局部消毒处理,明显减少田间青枯菌的数量,降低了青枯病发生率,防效达 37.06%,但消毒后在一定程度上降低了土壤微生物群落的多样性^[11]。同样,氯溴异氰尿酸在防治水稻、瓜果、蔬菜、花生等作物的细菌性、真菌性病害方面也具有突出效果^[25]。每 667 m^2 使用 50% 氯溴异氰尿酸 2 kg 对番茄根部进行消毒,发现其对番茄的茎基

腐病及根腐病具有较好的防治效果,防效可达73.33%^[26]。

2 土壤消毒对微生物菌群结构及土壤理化特性的影响

土壤微生态环境在维持植物健康中起着关键作用,尤其是土壤微生物与土壤理化特性之间的相互作用,直接影响植物的生长与抗逆能力^[27]。土壤微生物菌群的失衡以及营养元素的失调,容易导致土传病害的发生^[28]。土壤消毒过程中,一定程度上会干扰微生物菌群的结构,影响土壤的理化特性,从而对土壤健康造成负面影响^[29]。因此,在关注土壤消毒对病原微生物的抑制作用的同时,深入了解其对土壤微生物群落及理化性质的影响,对有效防治土传病害至关重要。

2.1 土壤消毒对微生物菌群结构的影响

土壤消毒剂在防治土传病害中发挥着重要作用,但在控制土壤有害微生物的同时,也可能对一些有益微生物产生抑制作用^[30],导致土壤微生物群落的结构破坏^[31]。研究发现,使用氯化苦进行熏蒸,可显著降低土壤中细菌和真菌群落的多样性和丰富度,同时有益菌属和土传病原菌的数量均显著减少^[32]。Fang等^[3]发现,使用氯化苦、达索、二甲基二硫、异硫氰酸烯丙酯和1,3-二氯丙烯等土壤熏蒸剂后,显著改变土壤细菌的丰度和群落结构,其中变形菌门、氯杆菌门和酸杆菌门的相对丰度显著降低,而厚壁菌门、芽生菌门、放线菌门等菌门的相对丰度则有所增加。通过棉隆熏蒸处理,熏蒸揭膜后土壤中病原菌基因拷贝数显著降低,降低幅度约47.7%,尽管熏蒸60 d后病原菌基因拷贝数有所增加,但仍低于熏蒸前的基因拷贝数;棉隆熏蒸还可显著影响土壤中的真菌和细菌数量,在熏蒸揭膜后,真菌数量减少了33.3%,细菌数量减少了91%,尽管60 d后真菌数量有所恢复,对照组未表现出显著差异,但细菌数量仍未恢复至初始水平^[33]。

2.2 土壤消毒对土壤理化特性的影响

土壤理化性质中的矿质元素是影响植物健康的关键。土壤消毒对土壤理化性质具有一定的影响,例如,棉隆熏蒸可显著提高土壤中铵态氮的质量分数,降低硝态氮的质量分数,抑制土壤硝化速率及根系硝态氮供应速率,提高土壤反硝化速率及根系铵态氮供应速率^[21]。

土壤理化性质中的矿质元素是影响植物健康的关键。土壤消毒对土壤理化性质具有一定影响。例如,棉隆熏蒸显著提升土壤中铵态氮的质量分数,同时降低硝态氮的质量分数,并抑制土壤的硝化速率及根系硝态氮的供应速率,提高土壤反硝化速率及根系铵态氮的供应速率^[21]。此外,土壤消毒在抑制病原菌的同时,也会对与各种元素循环利用相关的微生物群落产生影响,从而显著改变土壤中元素的释放与利用。Fang等^[3]的研究发现,使用5种不同的土壤消毒剂处理均导致土壤中反硝化细菌的相对丰度显著下降。

3 基于微生物的微生物生态重构技术研究与应用

土壤微生物的组成和群落结构与土传病害的发生密切相关^[34],稳定的土壤微生物群落结构有助于提高植物对土壤资源的利用率以及抑制病害的能力^[35]。通过对土壤微生物生态重构,引导土壤微生物区系朝向有利于抵御病害发生的方向发展,是一种可行的防治土传病害的策略。近年来,土壤消毒后添加生防菌或施用生物菌肥已成为广泛应用的微生物生态重构技术(图1)。研究证实,土壤消毒后及时补充生防菌可迅速占领空白生态位,有助于形成抑病土壤,增强土壤

对土传疾病的抑制作用^[36]。

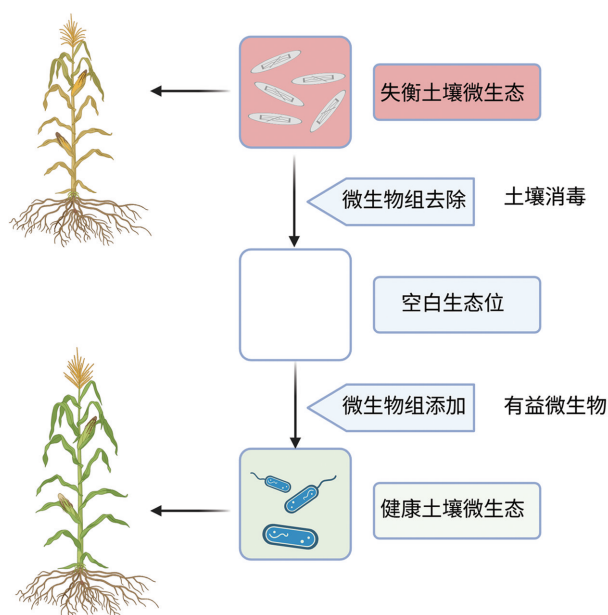


图1 土壤微生物生态重构技术模式图

3.1 土壤微生物生态重构对土壤微生物群落的影响

消毒处理形成空白生态位后添加生防菌剂可促进土壤生防菌的富集,有助于构建新的土壤微生物群落,形成有效的生物屏障^[37]。通过微生态重构,不仅能够有效改善微生物菌群结构,还能进一步提高作物的抗病能力,降低病害发生风险^[38]。研究发现,在土壤熏蒸消毒后添加生物菌剂可以显著防治三七根腐病;与仅进行土壤熏蒸处理相比,添加菌剂后不仅能有效减少三七根腐病的发生,还能显著降低土壤中镰刀菌属、链格孢属、柱孢属、小不整球壳属等三七根腐病病原菌的相对丰度,同时提高假单胞属、溶杆菌属、伯克氏菌属等有益菌属的相对丰度^[39]。研究还发现,棉隆熏蒸后添加生防菌能够发挥协同增效作用,消毒处理增强了生防菌的定殖能力以及其对病原菌的抑制能力,显著降低了土壤中病原菌的数量,并增加了有益微生物的丰度^[40]。

3.2 土壤微生物生态重构对土壤理化性质及土壤酶活性的影响

土壤理化性质(如pH值等)是驱动土壤细菌群落结构长期变化的关键因素^[41]。此外,渗透压和环境pH值也会对病菌的生长和致病力产生重要影响^[42]。土壤消毒后的生物有机肥处理能够显著提高土壤中有效磷和铵态氮的质量分数,进而影响土壤微生物之间的相互作用,影响致病菌的相对丰度和群落结构^[43]。土壤酶是土壤物质代谢和能量循环中不可或缺的参与者,几乎所有土壤中的生化反应都依赖酶的催化,因此,土壤酶活性对微生物群落的稳定性和植物的生长发育至关重要^[44]。研究表明,通过棉隆熏蒸处理后,土壤中的脲酶、磷酸酶和脱氢酶活性均有所下降,特别是与碳、氮、磷转化和氧化还原等生化过程相关的酶(如脲酶和磷酸酶)活性显著降低^[45]。此外,枯草芽孢杆菌用于1,3-D消毒土壤处理后,土壤恢复也显著加速脲酶和蛋白酶活性的恢复^[46]。此外,结合使用土壤消毒与生物菌肥和生物菌剂,能够有效提升土壤中酶活性,促进土壤功能的恢复^[47]。这些方法不仅帮助抑制病原菌,还能改善土壤的微生物生态平

衡,从而提升土壤健康和作物的产量与质量。

3.3 土壤微生态重构对土传病害的影响

微生物组被定义为在一个生态空间内所有微生物群落及其活动的周围环境^[47]。土壤微生物组作为土壤中一个重要组成部分,参与多种重要生态功能(如氮的硝化与反硝化、碳的固定等),这些功能深刻影响土壤环境,并与土传病害的发生密切相关^[48]。健康的微生物组不仅能够调节植物的营养健康状态,例如,通过溶磷解钾提升植物的营养吸收,还能通过多种机制直接或间接地抑制病原菌,从而提高植物的抗病能力。某些微生物能够分泌拮抗物质,直接杀死病原菌并降低其丰度^[49];或通过竞争稀缺的铁元素,抑制病原菌的生长^[50]。土壤消毒技术通过剔除原有的微生物组,再加入有益菌属,形成新的微生物群落,已成为防控土传病害的有效手段。这种微生态重构方法已在多个研究中得到应用。Sivan等^[51]通过联合使用甲基溴和哈茨木霉来防治番茄根腐病,发现二者联用能够显著减少镰刀菌在根部的定植,降低幅度为76%。Tian等^[52]通过使用棉隆熏蒸剂和枯草芽孢杆菌协同防治黄瓜枯萎病,发现该技术在消毒后能显著提高土壤健康指数,防效达到100%。噻唑膦与生防菌剂联合使用也表现出了良好的效果,处理后土壤中的根结线虫数量和番茄根系的根结指数显著降低,番茄移栽60 d后的根结线虫减退率为49.61%,根结指数为32.50,防治效果达64.77%^[53]。

4 展望

土传病害的发生对农业作物的产质量产生显著影响,已成为制约农业生产的重要限制因子。土壤消毒技术被广泛应用于控制土传病害,尽管其可以有效减少土壤中病原菌的数量,但对土壤中非靶标生物的影响也不可忽视。土壤消毒过程中,往往会干扰土壤的微生态结构,导致微生物群落失衡,进而可能引发其他生态问题,具有一定的风险。因此,土壤消毒技术的进一步研究和应用需要更加深入和全面,特别是如何优化土壤消毒的精准性和靶向性,以减少其对非靶标微生物的负面影响,维护土壤微生态的健康和稳定。目前土壤消毒联合生防菌的技术已经成为一种融合生物防治与化学防治的微生态重构方法,能够在一定程度上增强土壤消毒的防效,尤其是在减少病原菌数量的同时,促进有益微生物的生长。然而,土壤消毒与生防菌之间的相互作用及其影响机制仍未得到深入的研究,学者们仍需从多个角度开展更多的探索和实践。未来,土传病害的防治工作应以更加精准、经济、有效和环保为目标,结合土壤微生态重构技术的创新,提供更加灵活和可持续的解决方案。这不仅有助于提升农业生产效率,也有助于实现绿色农业的长远发展。

参考文献:

- [1] VISMANS G, SPOOREN J, PIETERSE C M J, et al. Soil-Borne Legacies of Disease in *Arabidopsis Thaliana* [J]. *Methods in Molecular Biology*, 2021, 2232: 209-218.
- [2] 周郑雄, 苟剑渝, 丁伟, 等. 基于集成技术调控的烟草青枯病绿色防控技术应用研究——以遵义市桐梓县九坝镇白盐井村为例 [J]. *植物医学*, 2023, 2(6): 13-20.
- [3] FANG W S, WANG X L, HUANG B, et al. Comparative Analysis of the Effects of Five Soil Fumigants on the Abundance of Denitrifying Microbes and Changes in Bacterial Community Composition [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 187: 109850.
- [4] CASTELLANO-HINOJOSA A, BOYD N S, STRAUSS S L. Impact of Fumigants on Non-Target Soil Micro-

- organisms: A Review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 427: 128149.
- [5] IBEKWE A M, PAPIERNIK S K, GAN J, et al. Impact of Fumigants on Soil Microbial Communities [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(7): 3245-3257.
- [6] 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.
- [7] FRIEDRICHEN C N, HAGEN-ZAKARISON S, FRIESEN M L, et al. Soil Health and Well-being: Redefining Soil Health Based upon A Plurality of values [J]. *Soil Security*, 2 (2021): 100004.
- [8] HESTER E R, HARPENSLAGER S F, VAN DIGGELEN J M H, et al. Linking Nitrogen Load to the Structure and Function of Wetland Soil and Rhizosphere Microbial Communities [J]. *mSystems*, 2018, 3(1): e00214-17.
- [9] XUE C, SHEN Z Z, HAO Y W, et al. Fumigation Coupled with Bio-Organic Fertilizer for the Suppression of Watermelon Fusarium Wilt Disease re-Shapes the Soil Microbiome [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 140: 49-56.
- [10] 曹堃程, 张大琪, 方文生, 等. 土传病害防治技术进展及面临的挑战 [J]. *植物保护*, 2023, 49(5): 260-269.
- [11] 代玉豪, 杨亮, 肖庆驹, 等. 不同土壤消毒方式对烟草青枯病及根际微生物群落的影响 [J]. *植物医学*, 2024, 3(1): 33-44.
- [12] 王秋霞, 郭美霞, 李园, 等. 氯化苦与 1, 3-二氯丙烯胶囊施用后在黄瓜及番茄果实中的残留检测 [J]. *中国蔬菜*, 2011(22/24): 88-91.
- [13] MAO L G, WANG Q X, YAN D D, et al. Evaluation of the Combination of 1, 3-Dichloropropene and Dazomet as an Efficient Alternative to Methyl Bromide for Cucumber Production in China [J]. *Pest Management Science*, 2012, 68(4): 602-609.
- [14] YAN D D, WANG Q X, MAO L G, et al. Evaluation of Chloropicrin Gelatin Capsule Formulation as a Soil Fumigant for Greenhouse Strawberry in China [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(20): 5023-5027.
- [15] 周弦, 张天晓, 贾切, 等. 土壤熏蒸剂对生姜土传病害的防治效果和产量的影响 [J]. *植物医生*, 2021, 34(3): 40-44.
- [16] LI Q J, ZHANG D Q, CHENG H Y, et al. Chloropicrin Alternated with Dazomet Improved the Soil's Physico-chemical Properties, Changed Microbial Communities and Increased Strawberry Yield [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 220: 112362.
- [17] LIN C M, PRESTON J F, WEI C I. Antibacterial Mechanism of Allyl Isothiocyanate [J]. *Journal of Food Protection*, 2000, 63(6): 727-734.
- [18] 张庆华, 曾祥国, 韩永超, 等. 土壤熏蒸剂棉隆和生物菌肥对草莓连作土壤真菌多样性的影响 [J]. *微生物学通报*, 2018, 45(5): 1048-1060.
- [19] HARRIS D C. A Comparison of Dazomet, Chloropicrin and Methyl Bromide as Soil Disinfectants for Strawberries [J]. *Journal of Horticultural Science*, 1991, 66(1): 51-58.
- [20] YAMAMOTO T, ULTRA V U, TANAKA S, et al. Effects of Methyl Bromide Fumigation, Chloropicrin Fumigation and Steam Sterilization on Soil Nitrogen Dynamics and Microbial Properties in a Pot Culture Experiment [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2008, 54(6): 886-894.
- [21] 杨绅, 方文生, 白庆荣, 等. 棉隆熏蒸对烟草氮素吸收利用的影响 [J]. *植物保护*, 2024, 50(2): 100-110.
- [22] 王垚, 黄纯杨, 杨亮, 等. 烟草青枯病复配增效药剂筛选及田间防效 [J]. *农药*, 2022, 61(10): 776-780.
- [23] 王翔, 聂湘平, 李凯彬. 三氯异氰尿酸和环丙沙星对水生生物的急性毒性 [J]. *生态科学*, 2006, 25(2): 155-157, 161.
- [24] 姚红艳. 4 种药剂防治稻瘟病药效试验 [J]. *植物医生*, 2013, 26(3): 29-31.
- [25] 王洪林. 消毒剂杀菌杀菌效果的试验观察 [J]. *中国消毒学杂志*, 2003, 20(1): 48-50.

- [26] 胡桂珍, 刘智, 张泰荣. 50%氯溴异氰尿酸防治水稻条纹叶枯病试验小结 [J]. 农业装备技术, 2007, 33(2): 45.
- [27] 方向阳, 禹桃兵, 杨磊, 等. 花生青枯病及其土壤微生态调控研究进展 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(11): 1695-1707.
- [28] 郑明子, 杨丙烨, 杨晶晶, 等. 土壤微生态在西瓜枯萎病发病过程中的变化研究 [J]. 土壤, 2022, 54(6): 1185-1192.
- [29] 高正睿, 宿翠翠, 王玉红, 等. 不同消毒方式对特殊药材连作土壤理化性质、酶活性及微生物群落的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(2): 86-94.
- [30] IMFELD G, VUILLEUMIER S. Measuring the Effects of Pesticides on Bacterial Communities in Soil: A Critical Review [J]. European Journal of Soil Biology, 2012, 49: 22-30.
- [31] IBEKWE A M, PAPIERNIK S K, GAN J, et al. Impact of Fumigants on Soil Microbial Communities [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, 67(7): 3245-3257.
- [32] LI Q J, ZHANG D Q, CHENG H Y, et al. Chloropicrin Alternated with Dazomet Improved the Soil's Physicochemical Properties, Changed Microbial Communities and Increased Strawberry Yield [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 220: 112362.
- [33] 陈利达, 石延霞, 李磊, 等. 不同土壤熏蒸剂对生菜种植土壤镰孢病菌的抑制效果及土壤微生物群落的影响 [J]. 农业生物技术学报, 2021, 29(12): 2365-2374.
- [34] KARLEN D L, MAUSBACH M J, DORAN J W, et al. Soil Quality: a Concept, Definition, and Framework for Evaluation (a Guest Editorial) [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 4-10.
- [35] 薛超, 黄启为, 凌宁, 等. 连作土壤微生物区系分析、调控及高通量研究方法 [J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 612-618.
- [36] 贾喜霞, 师桂英, 黄伟, 等. 土壤消毒剂配施微生物有机肥及生防菌剂缓解设施茄子连作障碍的作用效应微生物菌剂 [J]. 分子植物育种, 2020, 18(13): 4492-4498.
- [37] 金伟兴, 罗宝杰, 郭焕茹, 等. 土壤熏蒸和微生物菌剂防控大棚甜瓜连作障碍的土壤生态效应[J]. 土壤与作物, 2024, 13(1): 13-26.
- [38] WANG D W, WANG J, SU P, et al. Effects of Dazomet Combined with *Rhodopsesudomonas palustris* PSB-06 on Root-Knot Nematode, *Meloidogyne incognita* Infecting Ginger and Soil Microorganisms Diversity [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1021445.
- [39] 刘博文, 李蓉, 杨萍, 等. 生物菌剂与土壤熏蒸互作对三七土壤微生物群落结构的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(11): 2437-2450.
- [40] TIAN T, LI S D, SUN M H. Synergistic Effect of Dazomet Soil Fumigation and *Clonostachys Rosea* Against Cucumber *Fusarium* Wilt [J]. Phytopathology, 2014, 104(12): 1314-1321.
- [41] QIU Y, LV W C, WANG X P, et al. Long-Term Effects of Gravel Mulching and Straw Mulching on Soil Physicochemical Properties and Bacterial and Fungal Community Composition in the Loess Plateau of China [J]. European Journal of Soil Biology, 2020, 98: 103188.
- [42] 汪汉成, 郭华, 蔡琳, 等. 不同渗透压及 pH 环境对烟草青枯病菌致病力的影响 [J]. 植物保护学报, 2019, 46(4): 754-761.
- [43] GUO S, TAO C Y, JOUSSET A, et al. Trophic Interactions between Predatory Protists and Pathogen-Suppressive Bacteria Impact Plant Health [J]. The ISME Journal, 2022, 16(8): 1932-1943.
- [44] BURNS R G, DEFOREST J L, MARXSEN J, et al. Soil Enzymes in a Changing Environment: Current Knowledge and Future Directions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 58: 216-234.
- [45] 刘星, 张书乐, 刘国锋, 等. 土壤熏蒸-微生物有机肥联用对连作马铃薯生长和土壤生化性质的影响 [J]. 草业学报, 2015, 24(3): 122-133.
- [46] 刘秀梅. 枯草芽孢杆菌用于 1, 3-D 消毒土壤对番茄的促生作用及对土壤微生态的改良效应研究 [D]. 泰安: 山

东农业大学, 2017.

- [47] BERG G, RYBAKOVA D, FISCHER D, et al. Microbiome Definition re-Visited: Old Concepts and New Challenges [J]. *Microbiome*, 2020, 8(1): 103.
- [48] SCHOLTHOF K G. The Disease Triangle: Pathogens, the Environment and Society [J]. *NatureReviews Microbiology*, 2007, 5(2): 152-156.
- [49] XUZH, SHAOJH, LIB, et al. Contribution of Bacillomycin D in *Bacillus Amyloliquefaciens* SQR9 to Antifungal Activity and BiofilmFormation [J]. *AppliedandEnvironmental Microbiology*, 2013, 79(3): 808-815.
- [50] GU S H, WEI Z, SHAO Z Y, et al. Competition for Iron Drivesphytopathogen Control by Natural Rhizosphere Microbiomes[J]. *Nat Microbiol*, 2020, 5(8): 1002-1010.
- [51] SIVAN A, CHET I. Integrated Control of *Fusarium* Crown and Root Rot of Tomato with *Trichoderma Harzia-num* in Combination with Methyl Bromide or Soil Solarization [J]. *Crop Protection*, 1993, 12(5): 380-386.
- [52] TIAN T, LI S D, SUN M H. Synergistic Effect of Dazomet Soil Fumigation and *Clonostachys Rosea* Against Cucumber *Fusarium* Wilt [J]. *Phytopathology*, 2014, 104(12): 1314-1321.
- [53] 李成江, 谢小林, 陈猛, 等. 生防菌剂与噻唑膦减量配施对番茄根结线虫及根际土壤微生物的影响[J]. *植物保护*, 2024, 50(3): 155-164.

责任编辑 苏荣艳