

强还原土壤灭菌法防控瓜菜土壤连作障碍效果的影响因素

王广印¹, 郭卫丽¹, 陈碧华¹, 潘飞飞¹, 黄新琦^{2,3}, 蔡祖聪^{2,3}, 周建华⁴, 顾桂兰⁵

(1. 河南科技学院园艺园林学院·河南省园艺植物资源利用与种质创新工程研究中心 河南新乡 453003;

2. 南京师范大学地理科学学院 南京 210023; 3. 云南丽然农业科技发展有限公司 云南红河 662200;

4. 郑州市蔬菜研究所 郑州 450015; 5. 濮阳市农林科学院 河南濮阳 457000)

摘要: 强还原土壤灭菌法(reductive soil disinfestation, RSD)是一种作物种植前的土壤处理方法,也是目前快速、有效防控土传病害和消除设施蔬菜土壤连作障碍的新方法。该法具有杀灭土传病原菌和改善土壤理化性质等特点,已成功用于设施蔬菜土壤连作障碍的防控。RSD的防控效果受到有机物料、土壤温度、土壤处理时间、土壤水分含量、石灰添加量、前茬土壤性质、前茬作物类型、后茬作物类型、土壤内部环境因素及外源添加物等10个方面因素的影响。综述了RSD防控瓜菜土壤连作障碍效果的影响因素及研究进展,以期为RSD应用提供理论参考,促进设施瓜菜绿色和可持续生产。

关键词: 强还原土壤灭菌法; 设施土壤; 连作障碍; 有机物料; 土传病害

中图分类号:S606⁺.1 文献标志码:A 文章编号:1673-2871(2023)02-011-08

The factors affecting reductive soil disinfection (RSD) on overcoming mono-cropping obstacles of cucurbits and vegetables

WANG Guangyin¹, GUO Weili¹, CHEN Bihua¹, PAN Feifei¹, HUANG Xinqi^{2,3}, CAI Zucong^{2,3}, ZHOU Jianhua⁴, GU Guilán⁵

(1. School of Horticulture Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology/Henan Horticultural Plant Resources Utilization and Germplasm Innovation Engineering Research Center, Xinxiang 453003, Henan, China; 2. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 3. Yunnan Liran Agricultural Technology Development Co., Ltd., Honghe 662200, Yunnan, China; 4. Zhengzhou Vegetable Research Institute, Zhengzhou 450015, Henan, China; 5. Puyang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Puyang 457000, Henan, China)

Abstract: Reductive soil disinfection (RSD) is a new method for rapid and effective managing soil borne diseases and overcoming mono-cropping obstacles of vegetables in protected production. This method has the characteristics of inhibiting soil-borne pathogens and improving soil physicochemical properties and has been successfully applied to protected vegetable production for overcoming mono-cropping obstacles. The effectiveness of RSD is affected by organic materials, soil temperature, soil treatment time, soil moisture content, lime addition, previous soil properties, previous crop types, subsequent crop types, soil internal environmental factors and exogenous additives. This review summarized the influencing factors and research progress of RSD application on cucurbits and vegetables to provide references for the use of RSD and promote green and sustainable production of protected cucurbits and vegetables.

Key words: Reductive soil disinfestation (RSD); Facility soil; Mono-cropping obstacle; Organic materials; Soil borne diseases

近些年来,研究者普遍认为设施蔬菜土壤连作障碍是自毒作用、土传病原菌积累、土壤微生物区系变化、土壤养分不平衡及土壤理化性状变化(包

括土壤板结、次生盐渍化和酸化)等多因子综合作用的结果^[1]。目前,在防控设施瓜菜连作障碍及土传病害方面,研究者及生产者曾采取了不少技术措

收稿日期:2022-10-01; 修回日期:2022-10-26

基金项目:河南省大宗蔬菜产业技术体系建设项目“设施蔬菜连作障碍综合防控技术研究与示范”(S2010-03-G04, S2021-03-G09); 河南省科技攻关重点项目“设施蔬菜持续高产高效关键技术研究与示范”(112102110023); 2021年河南省重点研发与推广专项“大棚秋番茄提质增效关键技术研究与示范”(212102110433)

作者简介:王广印,男,教授,硕士生导师,主要从事蔬菜栽培生理生态研究。E-mail: wangguangyin@hist.edu.cn

施,主要有物理措施(轮作、高温闷棚等)^[2-4]、化学措施^[5-6]、生物措施(施有机肥、生物有机肥、拮抗菌等)^[7-9]、抗性品种^[10-11]及嫁接措施^[12-13]等。但这些技术措施大多针对某一特定障碍因素,如抑制土传病原菌生长、降低土壤酸化程度和提高有机质含量等,也都具有一定的防控或缓解土壤连作障碍的效果^[14-19]。由于这些技术措施作用比较单一,均有其局限性,因此并没有彻底改变土壤微生物的生长环境,未能从根本上修复退化的设施瓜菜土壤,也不能彻底解决诸多因素成因的土壤连作障碍问题^[14-19]。

近10年来,针对设施瓜菜土壤连作障碍防控效果不理想的情况,国内发展与研究了一种强还原土壤灭菌法(reductive soil disinfection, RSD)^[14-16,18,20],经实践证明是目前防治土传病害和消除连作障碍的新方法,防控设施蔬菜及其他作物土壤连作障碍成效显著^[14,17,21-27]。笔者在本文中重点概述RSD防控瓜菜土壤连作障碍效果的影响因素,以期RSD应用提供理论依据与实践指导。

1 RSD的特点

RSD是一种作物种植前的土壤处理方法^[15,18,28],即在发生连作障碍和土传病害的土壤中,添加大量的易分解有机物料,通过灌溉至土壤水分饱和、覆盖塑料薄膜或淹水阻隔与大气的交换,快速创造土壤强还原(厌氧)环境,短期内快速杀灭土传病原菌,并消减连作障碍的危害^[14,29-30]。

RSD处理的步骤^[15,18,28]包括以下四步:第一步,向土壤中大量施用易降解有机物料,并将固体粉末状有机物料均匀翻耕入土,或采用灌溉设备将液体物料冲施到土壤中;第二步,淹水或灌溉至土壤水分饱和;第三步,地面覆盖农膜以隔绝土壤与大气的交换;第四步,到预定时间结束处理,并排水、撤膜和晾干土壤。

21世纪初期,RSD在日本、荷兰和美国等国家较早研究与推广应用^[15,30]。我国科学工作者也在2010年前后开始系统研究RSD处理连作土壤,取得了杀菌和改良退化土壤的显著效果^[14-16,20,30-34]。近年来,将RSD成功应用于防控设施土壤连作障碍和瓜菜及其他作物土传病害中^[14,16,21-27],使RSD发展为一种广谱、高效、环保和新型的连作土壤处理技术。RSD不同于单纯土壤淹水、施用有机肥、秸秆还田和高温闷棚等常规防控措施,它是一种作物种植前的土壤处理方法^[15,18],具有速效、处理时间短、

要求温度不高、有机物料来源广泛、环保无污染、作用广谱和高效等优点。因此,RSD处理技术必将在快速、有效改良退化土壤^[16]和克服连作障碍中发挥重要作用。

2 RSD防控瓜菜土壤连作障碍的基本机制

2.1 RSD处理可有效杀灭土壤中的多种土传病原菌

土传病害是公认的作物连作障碍的主要因子^[1,29,35]。对RSD的杀菌作用,国内学者^[15,20,29-31,36-37]进行了深入探讨,主要有以下几个方面。

2.1.1 厌氧环境抑菌 在RSD处理时添加有机物料、覆膜和淹水,形成土壤的厌氧环境,不但能杀灭好氧病原菌,而且土壤中的许多厌氧微生物还能分解有机质,并产生大量对病原菌具有毒害作用的代谢产物,如氨、甲烷、有机酸和硫化氢等^[34]。*Fusarium oxysporum*(尖孢镰刀菌)是连作障碍的主要致病菌,RSD处理形成的厌氧还原环境对*F. oxysporum*具有很强的抑制效果^[38]。

2.1.2 土壤高pH值抑菌 在RSD处理中添加大量易分解有机物料和淹水,创造了剧烈的土壤强还原条件,提高了土壤pH值^[37,39]。由于土壤pH值与尖孢镰刀菌数量呈显著负相关^[37-38],因此土壤pH值的提高即可抑制该病原菌^[29]。

2.1.3 有机酸对土传病原菌的抑制作用 在RSD处理过程中,缺氧或厌氧条件能使微生物分解有机物料产生挥发性有机酸,尤其是乙酸和丁酸等,对于杀菌有重要的作用^[20,39-41]。

2.1.4 有害气体对土传病原菌的抑制作用 在RSD处理土壤过程中,土壤中的 NH_4^+ 大量增加,且土壤中的 SO_4^{2-} (硫酸根)和 NO_3^- (硝态氮)也被强还原,从而使土壤中挥发出来的 NH_3 (氨气)、 H_2S (硫化氢)和 N_2O (氧化亚氮)等气体大量增加^[37],而这些气体对土传病原菌(如尖孢镰刀菌等)具有明显的毒害(杀菌、抑制)作用^[15,18,20,40,42]。

2.1.5 Fe^{2+} 抑制病原菌的增殖 研究表明,强还原和淹水处理均有效提高了地黄连作土壤中的 Fe^{2+} 和有机酸含量^[43],而土壤中 Fe^{2+} 和有机酸含量的提升能够有效抑制病原菌的增殖^[44-45]。可见,土壤 Fe^{2+} 和有机酸含量的提升消减了尖孢镰刀菌导致的地黄连作障碍。

2.1.6 土壤微生物群落结构改变的抑菌作用 短时间和强烈的还原环境对土壤微生物群落结构的

影响是 RSD 处理防控土传病害的可能机制之一^[15]。RSD 处理能够在高效杀灭土传病原真菌的同时,还能维持或刺激土壤中其他真菌类群的存活与增殖,从而通过加剧其他真菌类群与病原菌在养分和生态位上的竞争,以增强 RSD 处理后土壤微生物的整体抑菌(病)能力^[29]。

2.2 RSD 处理使土壤理化性质发生变化

RSD 处理能显著提高酸化土壤的 pH 值^[14,16-17,26-29,32,40,46-50],降低土壤电导率(EC)^[14,17,28,32,40,46],这都表明 RSD 处理可降低土壤酸化和盐渍化程度。RSD 处理还可使土壤氧化还原电位(Eh)迅速下降至 0 mV 以下^[14,16,46],而土壤 Eh 的显著下降^[51]创造了土壤的厌氧还原条件,土壤反硝化作用增强,使 NO₃⁻浓度迅速降低,这对于酸性土壤的改良具有显著的效果^[34]。

RSD 处理能快速有效消减土壤所积累的致酸离子 NO₃⁻^[16-17,25-26,29,39-40,49]和降低 SO₄²⁻离子^[16-17,49]。RSD 处理也能增加土壤 NH₄⁺含量^[14,29,39,46,49],这有利于土壤中挥发出 NH₃,其对土壤病原菌具有毒杀作用。

RSD 处理能显著增加土壤有机质^[27,29,43,48,50]、全氮^[29,50,52]、碱解氮^[17,27,29,43,48]、有效磷^[17,27,43,48,52]及速效钾^[17,27,29,40,43,48,52]的含量。另外,RSD 处理时加入的有机物料,经高温腐解转化生成土壤有机质,还可以改善土壤结构^[14-15,28]。

2.3 RSD 处理改善土壤微生物群落结构及提高微生物活性

RSD 处理能显著增加土壤细菌的数量和多样性^[17,20,29,35,46-47],包括有益微生物相对丰度的增加^[35,47,53],而细菌群落中许多功能微生物类群都具有抗病、解磷或固氮能力^[23]。RSD 处理不但显著降低土壤中真菌的数量,包括病原微生物(如镰刀菌属等)相对丰度的降低^[27,29,35,47],而且也增加了有益真菌的多样性^[17,20,27,29,35-36,47],使真菌群落中一些可抑制其他真菌的物种占据优势地位^[23]。可见,RSD 处理对于土壤微生物区系的改善与重建具有更好的作用^[51-52,54-55]。另外,土壤厌氧消毒(anaerobic soil disinfestation,ASD,RSD 的另一种叫法)处理显著改变了土壤细菌群落结构组成及多样性,厌氧和耐受型细菌丰度大幅度增加,这可能也是 ASD 防控土传病害(青枯病)的作用机制之一^[56]。

另外,RSD 处理土壤后,土壤微生物活性也有所增强,这进一步抑制了病原菌的生长^[35]。

2.4 RSD 处理可抑制土壤化感物质(自毒物质)的

积累

自毒(化感)作用是导致作物产生连作障碍的重要原因之一^[1,15,29]。有试验表明^[29,35],RSD 处理有助于消除(降解)化感物质(自毒物质)积累引起的土壤连作障碍。

2.5 RSD 处理可降低土壤根结线虫数量

根结线虫也是土传病虫害之一,在设施蔬菜生产中占较大比例^[1]。RSD 处理能够有效杀灭土壤中的根结线虫,抑制根结线虫繁殖,从而降低根结线虫的数量^[21,50,57]。朱佳双^[57]的试验结果表明,有机酸是 RSD 处理过程中产生的有效杀线虫物质。

综上,RSD 处理不仅能有效灭菌,而且能有效修复发生连作障碍的土壤,可为瓜菜生长创造良好的土壤环境条件。

3 RSD 防控瓜菜土壤连作障碍效果的影响因素

3.1 碳素有机物料

3.1.1 碳素有机物料的种类 近年来,国内外用于 RSD 处理的碳素有机物料种类较多,一般可分为易降解干物质有机物料和易降解液体物料。干物质有机物料主要包括作物秸秆(如水稻秸秆、玉米秸秆和苜蓿粉等)和作物残渣(如甘蔗渣等)等农业废弃物,而易降解液体物料包括乙醇、生物乙醇、乙酸、冰乙酸、葡萄糖、糖蜜及蔗糖发酵液等^[18]。根据目前所采用的有机物料类型及其呈现的土壤灭菌和土壤修复效果,认为麦麸、苜蓿、米糠、玉米秸秆和水稻秸秆等是低成本的优选物质有机物料,而在高投入商业化种植基地施用乙醇或生物乙醇则是优选的易降解液体物料^[18]。

3.1.2 固体和液体有机物料 利用固体和液体 2 种有机物料做 RSD 处理,可使土壤微生物活性分别提高 1.5 倍和 2 倍^[25]。采用苜蓿粉做 RSD 处理对土壤微生物区系的改良效果要优于液体乙醇处理^[20]。但用固体和液体物料做 RSD 处理各有利弊,这可能与 RSD 处理所用物料的理化性质差异有关^[29]。

此外,一般认为,在 RSD 处理中同时添加固体和液体物料能表现出加成效应。刘亮亮等^[36]的试验结果表明,RSD 处理中同时添加苜蓿粉和乙酸 2 种物料,病原菌(如尖孢镰刀菌)数量则显著下降,这可能是二者混施产生的有机酸浓度高于单独添加苜蓿粉处理,且添加的乙酸物料可进一步优化 RSD 处理的杀菌效果。在严重发生西瓜枯萎病的瓜地,

联合施用苜蓿粉和冰乙酸,土壤中尖孢镰刀菌、真菌和放线菌数量显著降低,防控西瓜枯萎病和提高西瓜产量的效果更加明显^[58]。

3.1.3 有机物料类型及施用量 主要表现在以下几个方面:

(1)不同种类固体有机物料。不同种类有机物料含碳、氮量不同,本身理化性质不同,可能的杀菌途径不同,灭菌效果则有较大的差异。有机物料降解过程中产生的有机酸是灭菌的重要物质,但由于物料中易氧化有机碳(easily oxidized organic carbon, EOC)含量不同,则产生有机酸的数量也不同。一般有机物料的 EOC 含量与有机酸累积量和产生速率呈显著正相关,而有机物料 C/N 比值则与有机酸累积量和产生速率呈极显著负相关^[22]。在有机物料 EOC 含量大致相同的情况下,有机物料总氮(total nitrogen, TN)越高,氨化作用强度越大,氨气的杀菌效果亦越好^[31]。例如,水稻秸秆属于高碳含量有机物料,腐解过程中产生的大量有机酸和酚酸等酸类物质,对病原菌生长具有抑制作用;而菜粕是含氮量较高的物料,腐解过程中产生的氨气等含氮化合物对病原菌也具有较强的杀灭效果^[46]。

一般有机碳源中的 EOC 和 TN 含量、有机酸产生速率及累积量都与杀菌效果呈显著正相关,而有机物料初始 C/N 比值与杀菌效果呈显著负相关^[22,24,31]。由此可见,RSD 处理时添加较高 EOC 和 TN 含量、较低 C/N 比值的有机物料,能够在 RSD 处理过程中快速形成厌氧环境及产生足够浓度的杀菌物质(如有机酸等),从而在 RSD 处理的前期就能够有效杀灭土传病原菌。

(2)有机物料 C/N 比值。目前已采用的农业有机物料 C/N 比值范围大致为 6.99~59.23^[18]。而低 C/N 比值有机物料具有更高的灭菌速率,能促使土壤发生较强的还原反应,导致土壤中含氮化合物(如氨和亚硝酸)的生成量增加,从而能显著抑制真菌病原体^[20,47]。

由于 C/N 比值低的麦麸 EOC 含量高,易降解并产生较多的有机酸,灭菌效果显著^[15,59],因此一般认为低 C/N 比值的有机物料所参与的 RSD 处理灭菌效果更好^[28,59]。而在改善土壤理化性质方面,低 C/N 比值及高添加量的有机物料处理效果更好^[47,60],所以建议选择有机物料的最佳 C/N 比值为 34 左右^[47]。

(3)有机物料施用量。RSD 处理的有机物料施用量^[18]一般为 0.31~10.2 kg·m⁻²。许多试验证明,一

般有机物料施用量越大,灭菌或改良退化土壤效果越显著^[14,16,18,27,32,47,48,61]。如魏光钰等^[27]的试验结果表明,土壤经 RSD 处理后所种植烤烟的产量、上等烤烟比例和产值均是随着有机物料施用量的增大而增加。

一般有机物料的施用量可根据土传病原菌及其密度、处理时的温度和可用的处理时间等实际情况作适当的调整。当土传病原菌密度大时,应适当加大有机物料的施用量^[15]。如果上下两茬蔬菜作物种植间隔时间较短,可以适当加大有机物料施用量,反之则可减少有机物料的施用量^[14,32]。

添加高量有机物料能够缩短由硝态氮积累导致的退化土壤的处理时间(添加量越大,去除硝酸盐时间越短)^[14,16,32],但有机物料添加量增大到足够大时(例如稻草和鸡粪添加量为 7%时),并不能显著改善黄瓜长势和提高产量^[6],这说明有机物料的施用量并不是最大就是最有效和最经济的。

此外,也有结果相反的试验,这可能与有机质的种类和土壤理化性质等有关。例如檀兴燕^[47]试验 3 种不同的有机物料添加量(分别是土壤质量的 0.5%、2%和 5%),结果是 5%紫花苜蓿处理虽然能够有效改善土壤性质,灭菌效果显著,但其高氮含量可能对番茄植株造成氨毒害作用,所以建议有机物料的最佳添加量为 0.5%。可见,在改善土壤理化性质及灭菌方面,低 C/N 比值有机物料比高添加量有机物料的选择更重要。

3.2 土壤温度和处理季节

RSD 处理时的土温对处理效果也有较大的影响。一般土壤温度越高,处理效果越好,处理所需要的时间也越短。RSD 处理所需温度较低,一般只需 25℃以上的温度即可,而高温闷棚处理往往需要 55℃以上的持续高温,才能在较短时间内有效杀灭病原菌。综合各试验结果,RSD 处理土壤温度为 19.7~40℃,而处理时间需要 9~27 d^[18]。

不同温度条件下,RSD 处理对根结线虫的灭菌效果有较大差异。RSD 处理的土壤温度在 16~35℃条件下对线虫抑制作用最大,而在较高(>35℃)和较低(<16℃)温度下抑制作用反而不显著;同时 RSD 处理时间小于 14 d 能显著促进线虫的存活,而处理 28~48 d 对线虫具有较强的抑制作用^[61]。

另外,关于 RSD 处理的季节,一般设施瓜菜可安排在轮作倒茬期的夏季高温时进行,但低温茬口期也可同样进行 RSD 处理。周开胜^[40]和刘亮亮

等^[36]在低温茬口期进行 RSD 处理的研究结果表明,低温季节增加有机物料量及延长处理时间也可达到夏季同样的处理效果,这也为低温季节进行 RSD 处理提供了理论依据。

3.3 土壤处理时间

RSD 处理的时间长短与处理效果密切相关。RSD 处理要求时间比较短,一般 14~28 d 即可完成处理,而传统土壤的淹水处理时间则需 3~4 个月。RSD 处理的时间一般需要 7~28 d^[15],但具体时间可根据有机物料的施用量、土壤温度、土传病原菌数量及可供处理的有效时间作调整。一般当处理温度较低时,则需要较长的处理时间。淹水时添加高量有机物料能够缩短退化设施蔬菜地土壤的处理时间^[14]。

此外,若 RSD 处理的目的是消除次生盐渍化和大量积累的 NO_3^- ,则可采用较低水分饱和度和较短的处理时间,且可在较低温度下进行^[40];若 RSD 处理是以消减土传病原菌为目标,则应使土壤水分充分饱和,且在较高温度下尽可能延长处理持续的时间^[40]。

3.4 土壤水分含量及覆膜密闭

RSD 处理的水分条件,一般要达到土壤饱和状态。塑料薄膜覆盖越严密,处理效果越好。虽然低水分(80%饱和水)RSD 处理即可显著提高酸性土壤 pH 值,并消除土壤次生盐渍化和累积的 NO_3^- 等障碍因子,但一般还是以 100%饱和水为好。另外,RSD 处理时覆膜密闭比淹水不密闭的方法效果更稳定^[40]。朱睿等^[49]的研究结果也表明,100%最大持水量的 RSD 处理对尖孢镰刀菌、疫霉菌和腐霉菌的杀菌效果均在 90%以上。

3.5 土壤添加石灰

由于土壤 pH 值与 SO_4^{2-} 含量呈显著负相关,所以在 RSD 处理中,适量添加石灰可降低土壤 SO_4^{2-} 含量、提高土壤 pH 值,从而提高 RSD 的杀菌效果。但高浓度的石灰添加并不利于发挥 RSD 处理的杀菌效果^[62]。

3.6 前茬土壤性质和前茬作物类型

前茬土壤初始性质和前茬作物类型都能不同程度地影响到 RSD 处理的效果。一般连作障碍越严重的土壤,RSD 处理改良土壤的效果越好。吴瑞妮^[23]采用田间 RSD 处理的试验结果表明,不同土壤性质、不同前茬作物和不同有机物料都对土壤病原菌的杀灭效果产生不同的影响;一般酸化、盐渍化和土传病害危害越严重的初始土壤,经 RSD 处理后

土壤 pH 值、EC 值和致病微生物数量变化幅度越大;而相比前茬为叶菜类和草莓作物,前茬作物为茄果作物的 RSD 处理对土壤理化性质的影响更为显著,控制尖孢镰刀菌的效果更好。

处理前土壤退化程度对 RSD 处理效果也有一定的影响^[22]。对于严重退化的初始土壤,由于 RSD 处理对土壤 pH 值、EC 值和病原菌数量均具有显著的影响,所以选择连作障碍严重的土壤进行 RSD 处理的效果更为显著。

土壤性质与植物健康状况有直接关系,土壤微生物群落直接决定植物的健康状况^[63]。低发病率土壤和高发病率土壤具有不同的微生物群落和理化性质,低发病率土壤具有相对较低的尖孢镰刀菌丰度、电导率(EC)和 NO_3^- -N 含量^[63]。

闫元元等^[55]以西瓜和草莓连作病土为研究对象,试验结果表明,RSD 处理对不同土壤类型的改良效果存在一定差异,但相比于时间、物料类型以及土壤含水量,认为温度是影响 RSD 处理杀菌效果的主要共性因子。

3.7 后茬种植作物类型

不同作物感染尖孢镰刀菌的难易程度不同。种植易感病作物(西瓜)后,RSD 处理过的土壤中尖孢镰刀菌丰度便会较快增加,而种植非易感病作物(药芹和茄子)后,RSD 处理土壤中的尖孢镰刀菌数量仍然显著低于未用 RSD 处理的土壤 95%以上^[24]。

3.8 土壤内部环境

诸多研究表明,土壤环境中的 pH 值、碳和氮组分能够显著影响土传病害的发生率。在 RSD 处理中,虽然土壤内部环境因素不能直接抑制土传病害,但是其决定了微生物群落的组成以及抑病因子的定殖能力,从而间接决定着病害的发生^[24]。

3.9 外源添加物

3.9.1 配施生物炭 近年来,生物炭(BC)在土壤处理中被广泛使用。在 RSD 修复中,配施 BC 能显著改变土壤基本性质,并显著提高土壤 pH 值、EC 值、TC(全碳)值和 C/N 比值,但对土壤中 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量的影响并不显著^[64]。

RSD 单独或与生物炭联合修复处理,均显著改变了微生物多样性及群落结构,促进了厌氧和发酵型微生物的生长,从而抑制病原微生物的生存^[65-66]。采用 RSD+BC 联合修复方法,短期内可以减缓土壤酸化,提升土壤可溶性有机碳(DOC)含量^[26]。另外,RSD 和 RSD+BC 处理还能显著提高

β -葡萄糖苷酶等5种胞外酶的活性^[67]。

3.9.2 配施秸秆降解菌、微生物拮抗剂、复合菌及土壤熏蒸剂 在RSD试验中,玉米秸秆和苜蓿秸秆分别配施秸秆降解菌,比配施蚯蚓粪和不添加有机物的常规栽培显著降低病害发病率,比单独使用的灭菌率更高^[37,39,68]。

如果把微生物拮抗剂与RSD法联合应用,即在RSD处理结束后进一步接种微生物拮抗剂(如短小芽孢杆菌和哈茨木霉菌),结果发现拮抗微生物更稳定地定殖于土壤,二者配合施用不仅增加了土壤微生物数量和活性,而且也进一步改变了土壤微生物群结构,更能稳定控制立枯病的发生^[18,69]。

RSD和土壤熏蒸是缓解人参连作障碍的常用方法,RSD+氯化苦熏蒸、RSD+复合菌均能增加有益细菌属的丰富度并提高土壤酶活性^[53]。

3.10 覆盖薄膜类型

利用薄膜覆盖土壤是RSD处理的技术要求,只有创造充分的厌氧还原条件,才能发挥RSD处理的效果。Song等^[70]室内试验结果表明,与高密度聚乙烯薄膜(HDPE)相比,使用TIF膜(一种中间含有EVOH阻隔性材料的复合膜)覆盖的ASD技术对镰刀菌和疫霉有更好的抑制效果,能显著降低土壤中镰刀菌和疫霉的含量,降低由草莓枯萎病引起的死苗率,进而提高草莓产量。

4 结 语

4.1 影响RSD处理效果的主要因素是有机物料类型、处理温度和处理周期

影响RSD防控连作障碍效果的因素较多,从抓主要矛盾的原理出发,影响RSD处理效果的主要因素是处理所用有机物料类型、处理温度和处理周期,特别是有机物料类型成为影响RSD处理效果的关键因素。另外,在设施农业生产中应用RSD处理,还需要根据土传病原菌种类与轻重程度、前茬与后茬种植作物类型等其他因素,采取具有针对性的技术措施,确保RSD处理效果更好、更稳定和更加持效。

而对连作病土改良效果的影响因素,闫元元等^[55]以西瓜和草莓连作病土为研究对象,设置不同处理时间、处理温度、含水量以及物料类型的RSD处理。结果表明,各因素对RSD处理杀菌效果的重要性排序为温度>时间>物料类型>含水量。可见,对不同连作病土改良而言,温度是影响RSD处理效果的主要因素。

4.2 RSD处理影响因素的相互作用有待深入探讨

先前的RSD研究大多是针对单一土壤开展的单一因素的比较研究,尚缺乏RSD处理影响因素的系统研究^[55],特别是各因素的交互影响效果尚未涉及。尽管土壤-植物-微生物系统复杂、多样,但针对某一具体瓜菜土壤,设计多因素试验,并经各种统计分析,一定会探索到最佳的处理组合,可为优化、提高RSD处理综合效果提供依据。

4.3 技术到位是发挥RSD处理综合效果的前提

RSD不同于过去单纯的土壤淹水、秸秆还田和高温闷棚等常规土壤处理措施,施入粉碎有机物、翻耕、淹水、覆农膜等“四位一体”,任何环节的不到位都会降低处理的效果。添加秸秆等有机物的强还原处理后^[43],连作土壤的有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量均有提高,提高连作地黄的存活率和产量的效果也较优,而只单纯淹水处理的效果不明显。曹明等^[71]的试验表明,淹水、覆膜处理可提高土壤速效养分含量,秸秆有机质还田可显著增加土壤有机质含量;只有两者综合作用才可有效提高酸性土壤pH值,提高土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量和土壤细菌数量,并对杀灭土壤中的真菌起积极作用。

4.4 RSD处理将成为防控瓜果蔬菜土传病虫害和连作障碍的替代措施

近10年来,RSD处理技术在我国番茄^[21,47,50-51,56-57]、黄瓜^[21,69,72-73]、西瓜^[17,36,55,58,74-77]、辣椒^[46]、草莓^[55,70]、百合^[29]、人参^[53]、三七^[35,60]、洋桔梗^[63]、香蕉^[20,24,33]等作物上得到研究与应用,证明其在防控土传病虫害和连作障碍方面效果十分显著。尽管目前化学熏蒸剂土壤消毒、嫁接等是控制瓜菜土传病害和缓解连作障碍的重要手段,但在瓜菜绿色高质量发展的形势下,为了降低化学熏蒸剂的用量,保护生态环境,土壤化学药剂消毒终将被绿色防控措施所取代。在非化学替代品中,厌氧土壤消毒(ASD)被认为是最有效的方法之一^[78],能杀灭土壤传播的真菌和细菌性植物病害,具有灭虫、防病、除草的功效。在荷兰、日本、美国及中国等国家,ASD技术作为化学熏蒸剂的替代技术被用于防治番茄、草莓、香蕉和黄瓜等作物上的土传病害,并被证实可显著提高作物的产量和品质^[79]。

参考文献

- [1] 王广印,郭卫丽,陈碧华,等.河南省设施蔬菜连作障碍现状调查与分析[J].中国农学通报,2016,32(25):27-33.
- [2] 张光明,王翠花.高温闷棚克服设施蔬菜连作障碍[J].长江蔬

- 菜,2005(7):12-13.
- [3] 骆晶晶,习平根,陈显帆,等.轮作和高温闷地在克服蔬菜连作障碍上的应用[J].西昌学院学报(自然科学版),2017,31(4):10-12.
- [4] 侯伟,程海刚,景炜明,等.水旱轮作栽培对缓解设施蔬菜连作障碍的影响[J].陕西农业科学,2015,61(1):72-74.
- [5] 李军见,王培.棉隆处理土壤克服设施草莓连作障碍效果评价[J].陕西农业科学,2018,64(10):64-66.
- [6] 孟思达,韩磊磊,武春成,等.石灰氮对日光温室番茄19年连作障碍土壤的影响[J].沈阳农业大学学报,2021,52(3):257-264.
- [7] 杨凡,王建宏,蔡毓新,等.设施黄瓜连作障碍灾变机制及酵素菌应用研究进展[J].中国瓜菜,2022,35(7):6-12.
- [8] 赵佳,杜宾,聂园军,等.施用生物有机肥对连作黄瓜生长及根际微环境的影响[J].中国瓜菜,2017,30(1):31-34.
- [9] 曲成闯,陈效民,张志龙,等.生物有机肥提高设施土壤生产力减缓黄瓜连作障碍的机制[J].植物营养与肥料学报,2019,25(5):814-823.
- [10] 罗希榕,陀海燕,李唐燕,等.贵州省28个辣椒品种抗土壤连作障碍的效果分析[J].辣椒杂志,2022(2):6-12.
- [11] 张亚萍,刘成敏,吴东升,等.几个抗根结线虫粉果番茄品种的比较试验[J].北方园艺,2015(19):54-59.
- [12] 孟佳丽,吴绍军,余翔,等.不同类型砧木对西瓜连作障碍消除的影响[J].西北农业学报,2019,28(7):1110-1118.
- [13] 吕卫光,张春兰,袁飞,等.嫁接减轻设施黄瓜连作障碍机制初探[J].华北农学报,2000,15(S1):153-156.
- [14] 朱同彬,孟天竹,张金波,等.强还原方法对退化设施蔬菜地土壤的修复[J].应用生态学报,2013,24(9):2619-2624.
- [15] 蔡祖聪,张金波,黄新琦,等.强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究[J].土壤学报,2015,52(3):469-476.
- [16] 朱同彬,孙盼盼,党琦,等.淹水添加有机物料改良退化设施蔬菜地土壤[J].土壤学报,2014,51(2):335-341.
- [17] 陈士勇,杨艳菊,黄帅,等.强还原处理对西瓜连作土壤性质及西瓜产量的影响[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2019,40(5):103-109.
- [18] 朱文娟,王小国.强还原土壤灭菌研究进展[J].土壤,2020,52(2):223-233.
- [19] 蔡祖聪,黄新琦.土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究[J].土壤学报,2016,53(2):305-310.
- [20] 刘亮亮,黄新琦,朱睿,等.强还原土壤对尖孢镰刀菌的抑制及微生物区系的影响[J].土壤,2016,48(1):88-94.
- [21] 郭晨曦,周桂芳,陈碧华,等.强还原土壤灭菌法(RSD)对大棚连续三茬蔬菜生长、产量和虫害的影响[J].河南农业科学,2020,49(11):98-109.
- [22] 常亚锋.强还原土壤处理效果影响因素分析[D].南京:南京师范大学,2020.
- [23] 吴瑞妮.强还原土壤处理效果影响因素与后效研究[D].南京:南京师范大学,2021.
- [24] 刘亮亮.强还原土壤消毒防控土传病害效果及其微生物学机制研究[D].南京:南京师范大学,2019.
- [25] 王宝英,李金泽,黄新琦,等.土壤强还原处理对连作芥蓝产量、微生物数量及活性的影响[J].土壤,2019,51(2):316-323.
- [26] 闫代红,吉春阳,何云华,等.生物炭与强还原处理对设施蔬菜土壤可溶性有机质的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):283-291.
- [27] 魏光钰,胡勇,吴永琴,等.土壤强还原处理对植烟土壤真菌群落结构及烤烟质量的影响[J].湖南农业科学,2021(3):34-39.
- [28] 孟天竹,朱同彬,张金波,等.强还原处理中pH对硫酸根去除效果及产物的影响[J].土壤,2016,48(1):117-122.
- [29] 夏青,罗晨,曾粮斌,等.强还原土壤处理对再植龙牙百合生长不利因子的消减作用[J].土壤学报,2022,59(1):183-193.
- [30] 黄新琦,蔡祖聪.土壤微生物与作物土传病害控制[J].中国科学院院刊,2017,32(6):593-600.
- [31] 刘亮亮,崔慧灵,孔继婕,等.强还原处理所使用有机物料与其杀菌效果的相互关系[J].植物保护,2017,43(2):73-81.
- [32] 朱同彬,张金波,蔡祖聪.淹水条件下添加有机物料对蔬菜地土壤硝态氮及氮素气体排放的影响[J].应用生态学报,2012,23(1):109-114.
- [33] 黄新琦,温腾,孟磊,等.土壤快速强烈还原对于尖孢镰刀菌的抑制作用[J].生态学报,2014,34(16):4526-4534.
- [34] 黄新琦,温腾,孟磊,等.土壤厌氧还原消毒对尖孢镰刀菌的抑制研究[J].土壤,2014,46(5):851-855.
- [35] 李云龙.三七化感作用及其微生物学消减机制[D].南京:南京师范大学,2020.
- [36] 刘亮亮,周开胜,黄新琦,等.低温茬口空闲期土壤强还原消毒对西瓜枯萎病的影响[J].应用生态学报,2021,32(8):2967-2974.
- [37] 于双,邹洪涛,张玉玲,等.AM真菌、蚓粪及降解菌对土壤强还原灭菌法改良的作用机制[J].北方园艺,2020(21):63-70.
- [38] 骆玉琴,许佳彬,李艳杰,等.不同处理对连作障碍土壤真菌群落结构的影响[J].浙江农业科学,2022,63(5):1068-1073.
- [39] 于双,邹洪涛,杜志德,等.强还原土壤灭菌法改良研究[J].现代农业科技,2020(12):120-124.
- [40] 周开胜.强还原土壤消毒防控连作障碍效果及影响因素研究[D].南京:南京师范大学,2021.
- [41] 黄新琦,温腾,孟磊,等.土壤强还原过程产生的有机酸对土传病原菌的抑制作用[J].植物保护,2015,41(6):38-43.
- [42] 黄新琦,刘亮亮,朱睿,等.土壤强还原消毒过程中产生气体对土传病原菌的抑制作用[J].植物保护学报,2016,43(4):627-633.
- [43] 古力,李炬楨,李明杰,等.强还原和淹水处理对地黄连作障碍的消减效应[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(8):1305-1314.
- [44] MOMMA N, KOBARA Y, MOMMA M. Fe²⁺ and Mn²⁺, potential agents to induce suppression of *Fusarium oxysporum* for biological soil disinfection[J]. Journal of General Plant Pathology, 2011,77(6):331-335.
- [45] HUANG X Q, WEN T, ZHANG J B, et al. Toxic organic acids produced in biological soil disinfection mainly caused the suppression of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*[J]. BioControl, 2015,60(1):113-124.
- [46] 王光飞,马艳,安霞,等.不同有机物料强还原处理对土壤性状影响与防控辣椒疫病效果[J].中国土壤与肥料,2016(5):124-129.

- [47] 檀兴燕. 强还原土壤灭菌法缓解番茄连作障碍的效果及其土壤微生物群落的响应机制[D]. 安徽淮北: 淮北师范大学, 2019.
- [48] 樊娅萍, 陈芳玲, 贺苗苗, 等. 强还原灭菌条件下添加橘皮对土壤性状与酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(S1): 253-259.
- [49] 朱睿. 强还原土壤处理方案选择及对杂草抑制效果的研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [50] 石磊, 赵洪海, 李明亮, 等. 土壤强还原处理对根结线虫数量、番茄生长及土壤性质的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1865-1870.
- [51] 伍朝荣, 黄飞, 高阳, 等. 土壤生物消毒对番茄青枯病的防控、土壤理化特性和微生物群落的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1933-1940.
- [52] 陶禹, 李雪峰, 张竹青, 等. 土壤灭菌方式对不同深度土壤养分和微生物群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 575-584.
- [53] 闫宁, 战宇, 苗馨月, 等. 强还原土壤灭菌处理对人参连作土壤细菌群落结构及土壤酶活的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(6): 133-144.
- [54] 滕凯, 张清壮, 彭镜先, 等. 强还原土壤灭菌对烟草种植前后土壤化学性质及微生物群落结构的影响[J]. 烟草科技, 2022, 55(4): 9-19.
- [55] 闫元元, 周开胜, 张金波, 等. 强还原土壤灭菌处理对连作病土改良效果的影响因素[J]. 土壤, 2022, 54(3): 508-516.
- [56] 伍朝荣, 林威鹏, 黄飞, 等. 土壤厌氧消毒对青枯病的控制及土壤细菌群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 987-998.
- [57] 朱佳双. 强还原土壤处理对根结线虫的抑制作用研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- [58] 周开胜. 厌氧土壤灭菌修复西瓜连作退化土壤(英文)[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(7): 1179-1188.
- [59] LIU L L, KONG J J, CUI H L, et al. Relationships of decomposability and C/N ratio in different types of organic matter with suppression of *Fusarium oxysporum* and microbial communities during reductive soil disinfection[J]. *Biological Control*, 2016, 101: 103-113.
- [60] 李云龙, 王宝英, 常亚锋, 等. 土壤强还原处理对三七连作障碍因子及再植三七生长的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 703-715.
- [61] HUANG X Q, WEN T, ZHANG J B, et al. Control of soil-borne pathogen *Fusarium oxysporum* by biological soil disinfection with incorporation of various organic matters[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2015, 143: 223-235.
- [62] 孟天竹. 石灰和硫对强还原土壤灭菌处理效果的影响及机理研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.
- [63] LIU L L, YAN Y Y, Ali A, et al. Deciphering the *Fusarium*-wilt control effect and succession driver of microbial communities managed under low-temperature conditions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 171: 104334.
- [64] 冯竞仙. 生物质炭与强还原处理对连作障碍土壤性质和温室气体排放的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- [65] 孙小飞, 吉春阳, 杨柳明, 等. 生物质炭与强还原处理对退化设施蔬菜地土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1476-1482.
- [66] 孙小飞. 生物质炭与强还原处理对退化蔬菜地土壤温室气体排放及微生物组成的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2020.
- [67] 吉春阳, 何云华, 孙小飞, 等. 强还原与生物炭对土壤酶活性和温室气体排放的影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 974-982.
- [68] 于双. 外源添加物改良土壤强还原灭菌法效果的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [69] HUANG X Q, CUI H L, YANG L, et al. The microbial changes during the biological control of cucumber damping-off disease using biocontrol agents and reductive soil disinfection[J]. *Bio-Control*, 2017, 62: 97-109.
- [70] SONG Z X, YAN D D, FANG W S, et al. Maltose and totally impermeable film enhanced suppression of anaerobic soil disinfection on soilborne pathogens and increased strawberry yield[J]. *Sustainability*, 2020, 12(13): 5456.
- [71] 曹明, 张雪彬, 陶凯, 等. 强还原条件下秸秆还田量对南繁水稻土壤肥力和微生物数量的影响[J]. 热带农业科学, 2019, 39(10): 95-99.
- [72] MENG T Z, YANG Y J, CAI Z C, et al. The control of *Fusarium oxysporum* in soil treated with organic material under anaerobic condition is affected by liming and sulfate content[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54: 295-307.
- [73] HUANG X Q, CUI H L, YANG L, et al. The microbial changes during the biological control of cucumber damping-off disease using biocontrol agents and reductive soil disinfection[J]. *Bio-Control*, 2017, 62: 97-109.
- [74] 周开胜. 强还原处理改良西瓜连作土壤[J]. 浙江农业学报, 2016, 29(6): 982-987.
- [75] ZHOU K S. Prevention and control of continuous cropping obstacle of watermelon by reductive soil disinfection (RSD) [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(5): 493-499.
- [76] 柯用春, 王爽, 任红, 等. 强化还原处理对海南西瓜连作障碍土壤性质的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(4): 880-884.
- [77] LIU L L, CHEN S H, ZHAO J, et al. Watermelon planting is capable to restructure the soil microbiome that regulated by reductive soil disinfection[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 129: 52-60.
- [78] 张宁, 董先勤, 周婷, 等. 厌氧土壤灭菌不同添加物对日光温室土壤性质及微生物群落的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 197-204.
- [79] 宋兆欣, 颜冬冬, 方文生, 等. 土壤厌氧消毒技术、作用机理及其防治效果的影响因素[J]. 植物保护学报, 2022, 49(4): 994-1003.