

◆ 专论:熏蒸剂(特约稿)◆

基于meta分析研究土壤消毒对微生物群落演替的影响

方文生¹,田文凤^{1,2},李园¹,颜冬冬¹,王秋霞^{1*},曹坳程^{1*}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所,植物病虫害综合治理全国重点实验室,北京 100193; 2. 湖南农业大学园艺学院,长沙 410128)

摘要:微生物是土壤生态系统的重要组成部分,熏蒸剂作为广谱杀菌杀线虫剂,对土壤微生物群落产生了显著影响。采用meta分析对目前已公开发表的数据进行整合,系统分析了土壤消毒技术对土壤细菌和真菌群落的影响。结果表明,土壤消毒对微生物群落的影响因熏蒸剂种类、用量和时间而异。研究结果可为较全面地了解土壤消毒技术对土壤微生态效应的影响提供数据支撑。

关键词:土壤消毒;熏蒸剂;土壤微生物;meta分析

中图分类号:S 154 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2024.01.003

The effects of soil disinfection on microbial community succession studied based on meta-analysis

FANG Wensheng¹, TIAN Wenfeng^{1,2}, LI Yuan¹, YAN Dongdong¹, WANG Qiuxia^{1*}, CAO Aocheng^{1*}

(1. State Key Laboratory for Integrated Management of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. College of Horticulture, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China)

Abstract: Soil microorganisms are an important part of ecosystem. The fumigants, as broad-spectrum bactericidal and nematocidal agents, also have significant effects on soil microbial communities. In this paper, meta-analysis was used to integrate the published data and systematically analyzed the effects of soil disinfection technology on soil bacterial and fungal communities. The results showed that the effect of soil disinfection on microbial community varied with the fumigant type, dosage and time. The results provided data support for understanding the effect of soil disinfection technology on soil ecology.

Key words: soil fumigation; fumigant; soil microorganism; meta-analysis

土壤微生物在土壤生态系统中分解有机物质,促进养分循环和生物质的分解,从而影响土壤的肥力和结构^[1];并抑制土壤病原菌的生长,帮助植物吸收养分,促进植物生长,提高土壤的抗旱能力和抗病能力^[2-3]。因此,土壤微生物对于维持土壤生态系统的平衡和健康起着至关重要的作用。

土壤熏蒸能够有效抑制土传病害的发生,降低农药使用量,促进作物生长并显著提高其产量,表

现出一定的肥料效应,但同时对土壤微生物群落也产生了一定的影响^[4-11]。Zeng等^[4-5,8-9]研究表明,溴甲烷、氯化苦、威百亩、棉隆等显著抑制了微生物的多样性和群落组成。如氯化苦熏蒸显著降低了土壤细菌和真菌群落的多样性,至试验结束(90 d)土壤细菌和真菌群落 α 多样性依旧未能恢复至对照水平^[7]。Fang等^[12-13]研究也显示,氯化苦显著降低了细菌群落的多样性,熏蒸后细菌群落 α 多样性指数

收稿日期:2024-02-02

基金项目:国家重点研发计划(2023YFD1701200)

作者简介:方文生(1989—),江西于都人,博士,副研究员,主要从事土壤消毒与土传病害防控的微生物机制研究。E-mail:fangwensheng@caas.cn

通信作者:王秋霞(1977—),女,黑龙江牡丹江人,博士,研究员,主要从事熏蒸剂环境行为研究。E-mail:wqxcasy@163.com

共同通信作者:曹坳程(1963—),男,湖北麻城人,博士,研究员,主要从事土壤消毒技术研究。E-mail:caoac@vip.sina.com

Shannon、Chao1和ACE显著降低,Simpson显著升高。但也有试验显示,棉隆、1,3-二氯丙烯、二甲基二硫、异硫氰酸烯丙酯熏蒸对土壤微生物群落 α 和 β 多样性影响较小,熏蒸后第24天,4种熏蒸剂处理的土壤细菌ACE、Chao1和Shannon多样性指数显著增加,在第38天,4种熏蒸剂处理的土壤细菌多样性指数与对照没有显著差异,表明微生物群落多样性恢复到了未消毒水平^[12]。上述结果表明,棉隆、1,3-二氯丙烯、二甲基二硫、异硫氰酸烯丙酯熏蒸均促进了土壤微生物群落 α 多样性的增加,但刺激作用是短暂的。根据Zhu等^[14]的研究,异硫氰酸烯丙酯熏蒸降低了细菌群落的多样性,但增加了真菌群落的多样性。由于土壤本身的特异性差异巨大,同一种熏蒸剂对微生物群落的影响可能存在不同的结果。

以往大多数研究均基于特定试验进行分析,因而其结果只适用于特定的生物地理环境与熏蒸剂,导致土壤熏蒸对微生物的影响研究存在一定的不确定性。为了进一步明确土壤熏蒸对微生物群落的影响,本文基于数据整合分析方法(meta-analysis)原理,鉴于已有的研究成果,定量分析我国常用6种熏蒸剂氯化苦(chloropicrin, CP)、棉隆(dazomet, DZ)、二甲基二硫(dimethyl disulfide, DMDS)、1,3-二氯丙烯(1,3-dichloropropene, 1,3-D)、乙蒜素(ethylicin, EH)和异硫氰酸烯丙酯(allyl isothiocyanate, AITC)对土壤微生物群落多样性和结构组成的影响,为科学应用土壤消毒技术提供依据。

1 研究方法

1.1 数据收集

数据来自于web of science和中国知网2个文献数据库。数据收集过程中,设置“土壤消毒”“熏蒸剂”和“微生物群落”3个关键词进行搜索。筛选条件:同一试验包含配对的对照组与处理组,对照组为不熏蒸,处理组为熏蒸处理;试验处理重复数大于或等于3。数据收集内容主要包括细菌和真菌多样性及群落组成结构,以及每个试验对应的相关信息,如熏蒸剂用量、采样时间、土壤类型、pH等。共获得符合条件的已发表文献37篇,相匹配的有效数据117组。

1.2 数据分析

采用反应比($\ln R$)作为meta分析效应大小的度量标准(效应值),该指标反映了土壤消毒对微生物群落变化的影响。计算公式和方差分别为:

$$\ln R = \ln \left(\frac{X_e}{X_c} \right) \quad (1)$$

$$V(\ln R) = \frac{S_e^2}{N_e X_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c X_c^2} \quad (2)$$

式中: X_e 、 X_c 分别为熏蒸组和对照的平均值; S_e 、 S_c 分别为熏蒸组和对照的标准差; N_e 、 N_c 分别为熏蒸组和对照的样本数。 $\ln R > 0$,表示熏蒸对微生物产生刺激效应(正效应); $\ln R < 0$,则表示熏蒸对微生物产生抑制效应(负效应)。 $\ln R$ 及 $V(\ln R)$ 利用metafor包在R(4.01)中完成^[15]。

1.3 统计分析

考虑到不同试验地点熏蒸试验的差异性,采用随机效应模型对连续变量(熏蒸剂用量、采样时间等)和分类变量(土壤类型)进行检验,图表均采用ggplot2包进行绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤消毒对微生物群落多样性的影响

土壤消毒对土壤微生物群落多样性产生了显著影响,但不同熏蒸剂的影响程度不同,见图1。图中*表示显著性,*表示 $p < 0.05$,**表示 $p < 0.01$,***表示 $p < 0.001$ 。氯化苦和异硫氰酸烯丙酯对细菌群落的多样性具有显著抑制效应,其中,氯化苦对ACE指数和Shannon指数的分别为-0.16($p < 0.001$)和-0.12($p < 0.001$),异硫氰酸烯丙酯分别为-0.089($p = 0.023$)和-0.088($p = 0.0014$),表明氯化苦对细菌群落的抑制效应强于异硫氰酸烯丙酯。相反,乙蒜素、棉隆、二甲基二硫、1,3-二氯丙烯对细菌群落多样性无显著影响。

真菌群落多样性的结果表明,5种熏蒸剂中只有氯化苦对其产生了显著的抑制效应,ACE指数和Shannon指数分别为-0.36($p < 0.001$)和-0.28($p < 0.001$)。而异硫氰酸烯丙酯和1,3-二氯丙烯对真菌群落的多样性表现出一定的刺激效应($\ln R > 0$),但只有1,3-二氯丙烯对ACE指数具有显著性($0.19, p < 0.01$)。与细菌群落一致,乙蒜素和棉隆对真菌群落多样性无显著影响。

总体而言,氯化苦熏蒸对细菌和真菌群落多样性具有显著抑制效应,异硫氰酸烯丙酯对细菌群落多样性有抑制作用,但对真菌群落无显著影响;相反,1,3-二氯丙烯对细菌群落多样性无显著影响,但对真菌群落多样性具有刺激效应;而乙蒜素、棉隆、二甲基二硫对细菌和真菌群落多样性均不产生显著影响。

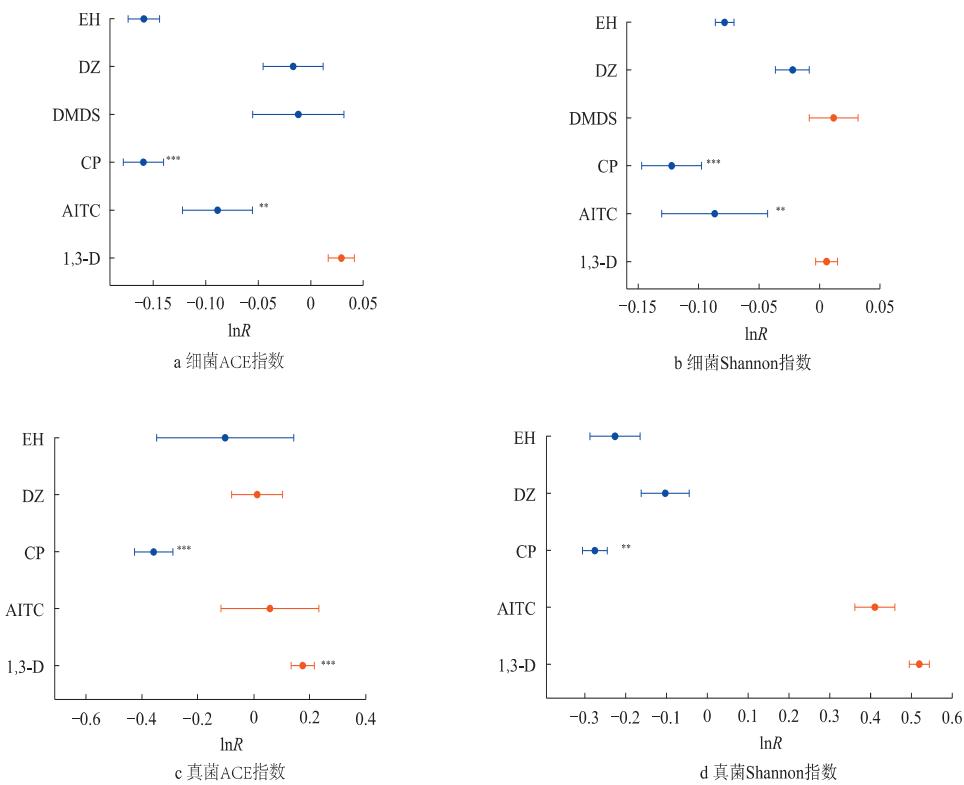


图1 不同熏蒸剂对土壤细菌和真菌群落多样性的效应值

2.2 土壤消毒对微生物群落结构的影响

土壤中丰度较高的优势细菌包括Proteobacteria、Chloroflexi、Acidobacteria、Firmicutes、Gemmatimonadetes、Actinobacteria、Planctomycetes, 其相加的总丰度占土壤总细菌的84.12%~92.05%。土壤消毒对优势细菌的丰度产生显著影响,既有抑制效应也有刺激效应,见图2。

尽管乙蒜素对Proteobacteria、Chloroflexi、Acidobacteria、Firmicutes、Gemmatimonadetes、Actinobacteria、Planctomycetes等7个门细菌水平无显著影响,但棉隆和异硫氰酸烯丙酯对Proteobacteria和Planctomycetes产生显著负效应,且对Planctomycetes的抑制效应大于Proteobacteria (DZ, -0.55与-0.12, $p < 0.05$; AITC, -0.94与-0.18, $p < 0.05$) ,同时对Firmicutes和Actinobacteria (AITC除外) 产生显著正效应。棉隆和异硫氰酸烯丙酯具有相似的微生物物种选择性作用,可能是因为两者均为异硫氰酸酯类物质^[16]。二甲基二硫和1,3-二氯丙烯熏蒸对Acidobacteria产生显著负效应,对Chloroflexi、Firmicutes、Gemmatimonadetes产生正效应但无显著性。相反,氯化苦熏蒸除了对Proteobacteria无显著影响外,对其他6种细菌均产生显著影响,如对Planctomycetes (-0.86, $p < 0.001$) 、Chloroflexi (-0.89, $p < 0.001$) 、Acidobacte-

ria (-0.59, $p < 0.001$) 具显著抑制作用,对Firmicutes (0.87, $p < 0.001$) 、Gemmatimonadetes (0.44, $p < 0.01$) 、Actinobacteria (0.36, $p < 0.01$) 具显著刺激作用。可见,氯化苦对细菌群落组成的影响较其他几种熏蒸剂更显著。

由于真菌通常以菌丝或孢子的形式存在土壤中,其应对外界胁迫比细菌具有更强的抵抗力。通过比较4种优势真菌Ascomycota、Mortierellomycota、Basidiomycota、Chytridiomycota的lnR(图3),发现1,3-二氯丙烯和异硫氰酸烯丙酯只对Mortierellomycota产生了显著正效应($\ln R=2.25, p=0.02$; $\ln R=0.99, p<0.001$),氯化苦只对Basidiomycota产生了显著负效应($\ln R=-1.22, p<0.05$),而乙蒜素和棉隆对4种优势真菌均无显著影响。相比于细菌,熏蒸剂对土壤真菌群落物种组成的影响较小,大部分物种在门水平无显著变化。

总体而言,土壤消毒对微生物群落结构产生了显著的抑制和刺激作用,且对细菌群落的影响大于真菌。多数熏蒸剂对Firmicutes、Gemmatimonadetes、Mortierellomycota具正向刺激效应,而对Proteobacteria、Planctomycetes、Acidobacteria 和 Basidiomycota具负向抑制效应。其中乙蒜素对细菌和真菌群落结构均无显著影响,棉隆对真菌群落无显著影响。

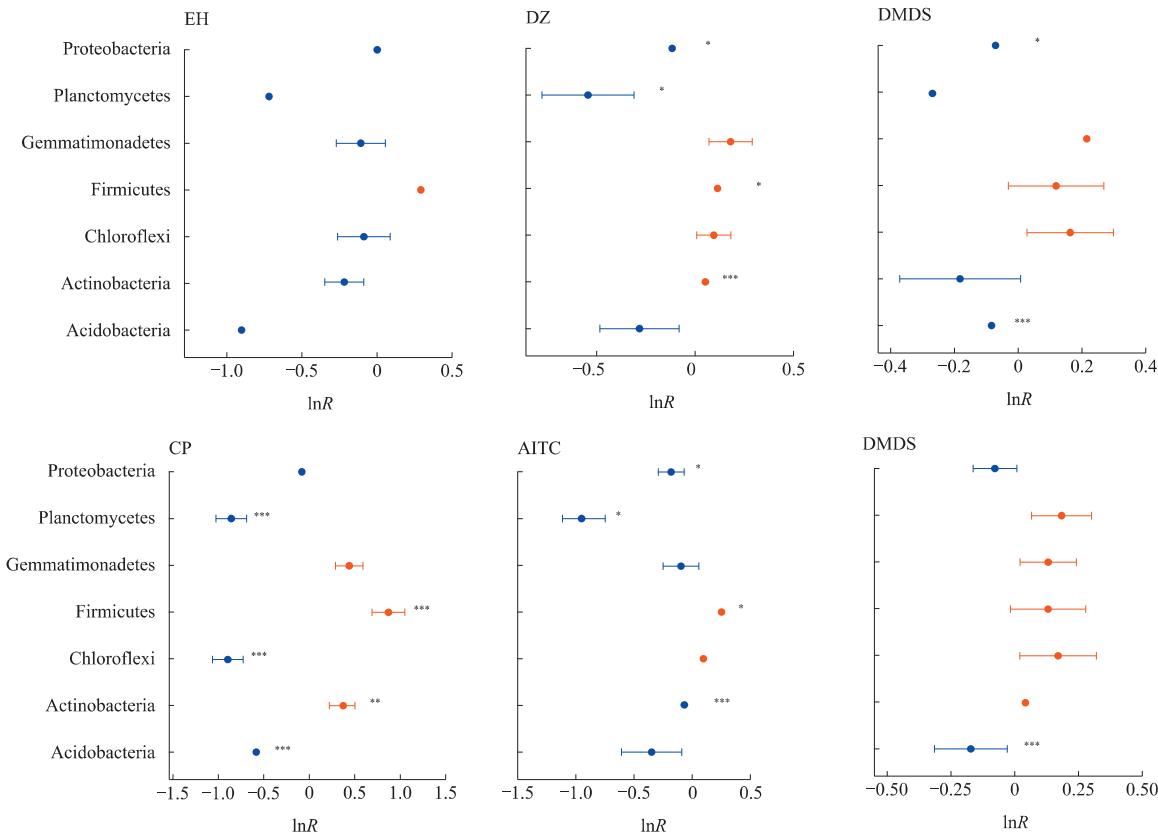


图2 不同熏蒸剂对细菌群落结构效应值

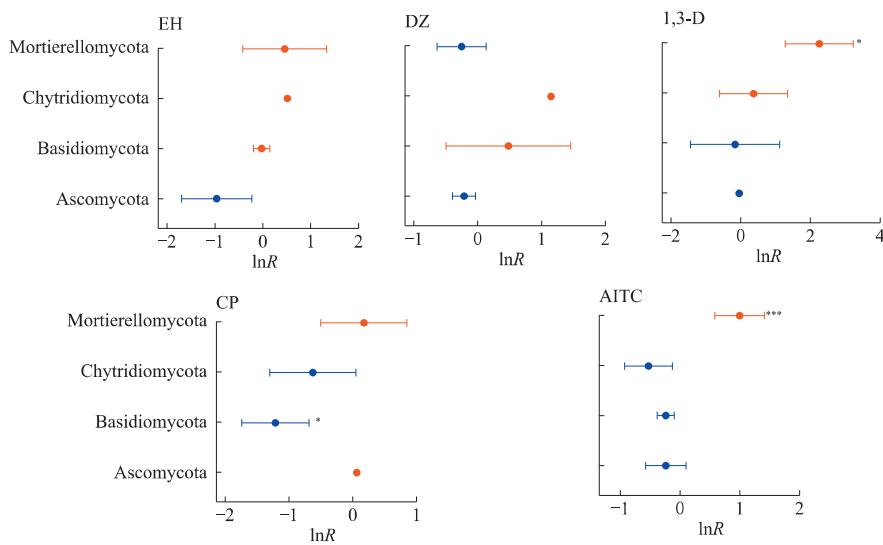


图3 不同熏蒸剂对真菌群落结构效应值

2.3 土壤消毒后微生物群落演替的影响因素

以上分析表明,无论是对细菌还是真菌群落,氯化苦与其他几种熏蒸剂相比,均产生更显著的影响,因此,选用氯化苦作为代表药剂以进一步分析影响熏蒸效应值的关键变量。收集的117组数据中包含红壤、潮土、黏土3种土壤类型。土壤类型显著影响熏蒸剂对细菌群落的效应值(异质性统计量

$Q_m=34.73, p<0.001$),但对真菌群落多样性无显著影响($Q_m=5.62, p=0.23$)。

氯化苦田间用量通常为 $30\sim60\text{ g/m}^2$ ^[17-18],本文收集的文献中氯化苦用量范围为 $11\sim123\text{ g/m}^2$,涵盖了其常规用量。将效应值与熏蒸剂用量进行相关性绘图,发现细菌群落多样性效应值与氯化苦用量呈显著负相关($R=-0.93, p<0.001$),见图4~图5。图

中细菌和真菌群落多样性均选用Shannon指数。图4表明氯化苦对细菌群落的抑制效应随着剂量增加而显著增加。相反,由图5可见,真菌群落多样性效应值与氯化苦用量呈正相关但无显著性($p=0.13$),表明随着用量增加,氯化苦对真菌群落的抑制效应逐渐减弱。分析其原因,可能是由于高剂量作用下,氯化苦促进了某些真菌的生长^[19]。

田间操作时一般熏蒸30 d后再敞气30 d才可移栽作物,本文考察了120 d时间跨度土壤微生物群落的演替。由图4可知,随着时间的推移,氯化苦熏蒸对细菌多样性的效应值逐步向0靠拢,表明熏蒸抑

制效应随时间显著减弱。相关性表明细菌群落多样性效应值与时间成显著正相关($R=0.70, p=0.043$),表明氯化苦消毒对细菌群落的抑制效应具显著的时间性。同样,由图5可见,氯化苦对真菌多样性效应也随时间缓慢减弱,但相关性较弱且无显著性。

本文收集的文献中土壤pH从5.4~7.6,包括了酸性、中性和弱碱性土壤。相关性结果表明(图4~图5),氯化苦对细菌群落多样性抑制效应随着pH升高而增加,真菌群落多样性抑制效应随着pH升高而降低,表明弱碱性条件下增加了氯化苦对细菌群落的抑制效应,减少了对真菌群落的抑制效应。

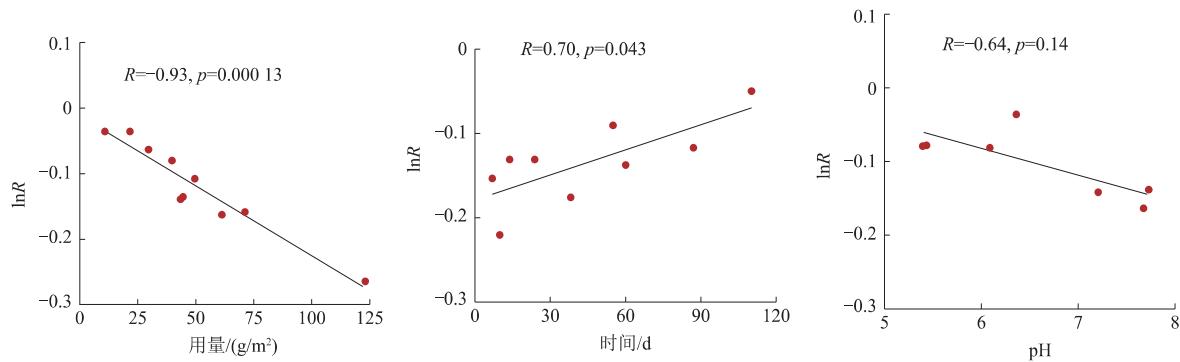


图4 细菌多样性效应值与熏蒸剂用量、时间、土壤pH相关性

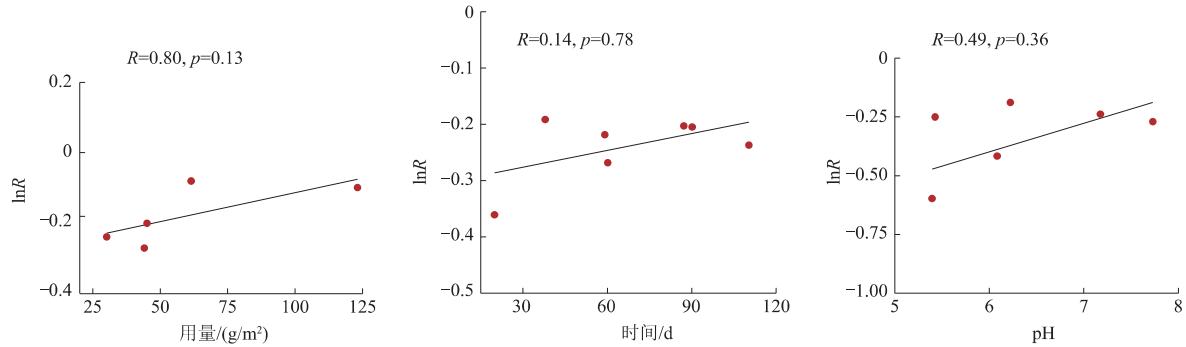


图5 真菌多样性效应值与熏蒸剂用量、时间、土壤pH相关性

2.4 讨论

本文中熏蒸剂的用量分别为氯化苦11~123 g/m²、乙蒜素10~105 g/m²、棉隆40~90 g/m²、二甲基二硫60~80 g/m²、异硫氰酸烯丙酯10~80 g/m²、1、3-二氯丙烯20~44 g/m²,各药剂用量均涵盖了其田间常规和高低剂量^[20-23]。Meta分析结果表明:

(1) 氯化苦熏蒸对土壤细菌和真菌群落多样性均产生显著抑制效应,细菌和真菌群落结构发生显著变化,这与前期的研究结果一致。Li等^[24-25]采用宏基因组测序手段,发现氯化苦熏蒸之后,细菌群落

多样性显著下降,群落组成在属水平和OTU水平发生显著改变;Ibekwe等^[26]发现氯化苦对土壤微生物群落的影响作用能持续到第8周,其作用强度弱于溴甲烷,但强于1,3-二氯丙烯,同时,氯化苦熏蒸后土壤某些物种的丰度也显著增加,如熏蒸10 d后土壤中好氧性革兰氏阴性菌数量增加10倍,假单胞菌Pseudomonas生物量增加70%以上,而Pseudomonas正是降解氯化苦的主要微生物^[19]。

(2) 异硫氰酸烯丙酯对细菌多样性和群落结构产生显著抑制效应,对真菌具有刺激效应。Zhu等^[14]

研究认为,异硫氰酸烯丙酯熏蒸暂时降低了土壤细菌群落的多样性,但长期刺激了真菌群落的多样性,显著改变了真菌群落结构;同时,异硫氰酸烯丙酯熏蒸后显著促进了植物益生菌如Sphingomonas、Streptomyces、Hypocreales、Acremonium、Aspergillus、Pseudallescheria等的相对丰度^[14,27]。熏蒸后微生物群落的重建为植物及其有益菌群之间的潜在相互作用提供了重要信息,通过调控真菌群落种间关系可以强化优势菌对潜在病原真菌的拮抗作用,进而提高对土传病害的抑制效果。

(3) 棉隆对细菌和真菌群落多样性无显著影响,但显著改变了细菌群落的结构,刺激了Firmicutes和Actinobacteria门水平的生长而抑制Proteobacteria和Planctomycetes丰度,对真菌群落结构无显著影响。Chen等^[28-31]研究表明,棉隆熏蒸后土壤优势菌门发生变化,细菌多样性明显下降。不同物种对棉隆耐受性不同,如部分细菌经2 000 mg/kg棉隆处理后仍可存活;而经100 mg/kg棉隆处理后的土壤真菌只有木霉菌存活,但该剂量下病原菌均被杀灭;线虫对棉隆具较高的抗性^[32]。土壤生物对棉隆的敏感性因物种而异,有耐受性的生物可能会进行再定植。Yakabe等^[33]认为,棉隆熏蒸后可以显著减少根癌农杆菌和疫霉菌种群数量,且熏蒸后的土壤更利于病原菌或有益菌的定植。

(4) 1,3-二氯丙烯对细菌群落多样性无显著影响,但增加了真菌群落的多样性,改变了细菌和真菌群落结构。Liu等^[34]研究表明,1,3-二氯丙烯对土壤细菌群落有短暂的抑制效应,但该抑制效应很快消失,细菌丰度在后期逐渐恢复。对30 cm和60 cm土层研究发现,1,3-二氯丙烯熏蒸对不同深度土壤微生物群落结构的总体影响很小^[4],可能是因为试验所用熏蒸剂用量较低(14 g/m³)。1,3-二氯丙烯熏蒸短期内引起了直接参与氮循环的微生物种类组成和数量发生显著变化,如降低了酸性红壤和碱性潮土中涉及固氮、硝化和反硝化的11个功能基因的丰度,且含有nifH、nrxR、napA和qnorB基因的微生物对1,3-二氯丙烯熏蒸较为敏感,但所有功能微生物在24~59 d孵育阶段均恢复到未熏蒸水平^[35]。

(5) 二甲基二硫和乙蒜素对细菌多样性和群落结构均无显著影响。二甲基二硫和乙蒜素均为植物源熏蒸剂,具有优异的杀线虫活性^[36-37],相比其他熏蒸剂,对土壤微生物的影响较少。Li等^[38]发现,乙蒜素虽然轻微降低了土壤细菌群落的多样性,但增加了真菌群落的分类多样性,同时促进了部分有益菌

如Firmicutes、Steroidobacter和Chytridiomycota的生长。对于功能微生物而言,二甲基二硫对大部分氮循环基因nifH、AOA、narG、qnorB等无显著影响^[39]。二甲基二硫是目前公认的溴甲烷最有潜力的替代品,但目前尚无其对土壤真菌群落的报道。

熏蒸剂对土壤微生物群落的影响程度高度依赖熏蒸剂类别、用量和时间尺度。氯化苦对土壤细菌群落的抑制效应随着用量增加而增加,但随着时间推移显著减弱。Zhu等^[14,39]研究表明,异硫氰酸烯丙酯对细菌群落的抑制效应只持续24~42 d,之后抑制效应消失。棉隆熏蒸短期增加了固氮微生物Rhizobium、反硝化微生物Alcanivorax、Bacillus、Streptomyces等的丰度,但59 d后恢复至对照水平^[40]。熏蒸剂的抑制效应或刺激效应在熏蒸后期逐步减弱,微生物也逐步恢复,而且细菌群落恢复力快于真菌群落^[41]。

3 结论

氯化苦和异硫氰酸烯丙酯对细菌群落多样性产生了显著的抑制效应,乙蒜素、棉隆、1,3-二氯丙烯、二甲基二硫对细菌群落多样性无显著影响;对于真菌群落多样性,只有氯化苦对其有显著的抑制效应。在物种组成方面,除乙蒜素外,其他5种熏蒸剂对细菌群落同时产生正向刺激和负向抑制作用,其中氯化苦的影响较其他几种熏蒸剂影响更显著。相比于细菌,熏蒸剂对土壤真菌群落物种组成影响较小,大部分物种在门水平无显著变化。熏蒸剂用量和采样时间是影响土壤熏蒸对微生物群落正负效应的最主要因素,抑制效应随着熏蒸剂用量的增加而增加,随着时间延长而显著减弱。

土壤消毒技术是一项涵盖了许多熏蒸剂的土传病害防控措施,其对土壤微生物的影响需要具体到特定的熏蒸剂种类,否则容易以偏概全;同时,熏蒸剂用量的大小、取样时间的长短、土壤特性如酸碱性的差异等因素均显著影响了熏蒸剂对土壤微生物的作用强度。综合考虑上述两点,才能全面而准确地了解熏蒸剂的土壤微生态效应。

参考文献

- [1] WU D, WANG W, YAO Y, et al. Microbial interactions within beneficial consortia promote soil health[J]. Science of the Total Environment, 2023, 900: 165801.
- [2] ZENG Q, XIONG C, YIN M, et al. Research progress on ecological functions and community assembly of plant microbiomes [J].

- Biodiversity Science, 2023, 31(4): 22667.
- [3] 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.
- [4] ZENG Y, ABDO Z, CHARKOWSKI A, et al. Responses of bacterial and fungal community structure to different rates of 1,3-dichloropropene fumigation[J]. *Phytiomes Journal*, 2019, 3(3): 212-223.
- [5] SUN Z, LI G, ZHANG C, et al. Contrasting resilience of soil microbial biomass, microbial diversity and ammonification enzymes under three applied soil fumigants[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19 (10): 2-11.
- [6] SENNETT L, BURTON D L, GOYER C, et al. Influence of chemical fumigation and biofumigation on soil nitrogen cycling processes and nitrifier and denitrifier abundance[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 162: 108421.
- [7] PU R, GUO L, LI M, et al. The remediation effects of microbial organic fertilizer on soil microorganisms after chloropicrin fumigation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 231: 113188.
- [8] LI X, SKILLMAN V, DUNG J, et al. Legacy effects of fumigation on soil bacterial and fungal communities and their response to metam sodium application[J]. *Environment Microbiome*, 2022, 17 (1): 59.
- [9] GE A, LIANG Z, XIAO J, et al. Microbial assembly and association network in watermelon rhizosphere after soil fumigation for *Fusarium* wilt control[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 312: 107336.
- [10] CHEN B, SHAO G, ZHOU T, et al. Dazomet changes microbial communities and improves morel mushroom yield under continuous cropping[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1200226.
- [11] CASTELLANO-HINOJOSA A, BOYD N S, STRAUSS S L. Impact of fumigants on non-target soil microorganisms: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 427: 128149.
- [12] FANG W, WANG X, 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*, 2019, 187: 109850.
- [13] FANG W, YAN D, WANG X, et al. Evidences of N_2O emissions in chloropicrin-fumigated soil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66, (44): 11580-11591.
- [14] ZHU J, REN Z, HUANG B, et al. Effects of fumigation with allyl isothiocyanate on soil microbial diversity and community structure of tomato[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68 (5): 1226-1236.
- [15] VIECHTBAUER W. Conducting meta-analyses InR with the metafor package[J]. *Journal of Statistical Software*, 2010, 36 (3) : 28-47.
- [16] DI PRIMO P, GAMLIEL A, AUSTERWEIL M, et al. Accelerated degradation of metam-sodium and dazomet in soil: characterization and consequences for pathogen control[J]. *Crop Protection*, 2003, 22(4): 635-646.
- [17] ANASTASSIOU M, ARENA M, AUTERI D, et al. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance chloropicrin [J]. *EFSA Journal*, 2020, 18(3): 6028.
- [18] BITTARA F G, SECOR G A, GUDMESTAD N C. Chloropicrin soil fumigation reduces spongospora subterranea soil inoculum levels but does not control powdery scab disease on roots and tubers of potato[J]. *American Journal of Potato Research*, 2016, 94 (2): 129-147.
- [19] CASTRO C E, WADE R S, BELSER N O. The metabolism of chloropicrin by *Pseudomonas* sp[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1983, 31(6): 1184-1187.
- [20] 曹坳程, 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.
- [21] 方文生, 王秋霞, 颜冬冬, 等. 土壤熏蒸剂棉隆防治土传病害研究进展及未来发展趋势[J]. 植物保护学报, 2023, 50 (1) : 40-49.
- [22] 王秋霞, 颜冬冬, 方文生, 等. 新型土壤熏蒸剂二甲基二硫研究进展[J]. 植物保护学报, 2023, 50 (1) : 32-39.
- [23] 任立瑞, 李文静, 李青杰, 等. 不同熏蒸剂复配对生姜田土传病害的防控及产量的影响[J]. 农药, 2022, 61 (9) : 674-678.
- [24] LI J, HUANG B, WANG Q, et al. Effects of fumigation with metam-sodium on soil microbial biomass, respiration, nitrogen transformation, bacterial community diversity and genes encoding key enzymes involved in nitrogen cycling[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 598: 1027-1036.
- [25] LI J, HUANG B, WANG Q, et al. Effect of fumigation with chloropicrin on soil bacterial communities and genes encoding key enzymes involved in nitrogen cycling[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227: 534-542.
- [26] 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.
- [27] LI Y, LU D, XIA Y, et al. Effects of allyl isothiocyanate fumigation on medicinal plant root knot disease control, plant survival, and the soil bacterial community[J]. *Research Square*, 2022, 23(1): 278.
- [28] CHEN R, JIANG W, XU S, et al. An emerging chemical fumigant: two-sided effects of dazomet on soil microbial environment and plant response[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(2): 3022-3036.
- [29] NICOLA L, TURCO E, ALBANESE D, et al. Fumigation with dazomet modifies soil microbiota in apple orchards affected by

- replant disease[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 113: 71-79.
- [30] WANG Q, MA Y, YANG H, et al. Effect of biofumigation and chemical fumigation on soil microbial community structure and control of pepper Phytophthora blight [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2014, 30(2): 507-518.
- [31] PARTHIPAN B, MAHADEVAN A. Effects of methylisocyanate on soil microflora and the biochemical activity of soils[J]. Environmental Pollution, 1995, 87(3): 283-287.
- [32] EO J, PARK K C. Effects of dazomet on soil organisms and recolonisation of fumigated soil[J]. Pedobiologia, 2014, 57(3): 147-154.
- [33] YAKABE L, PARKER S, KLUEPFEL D. Effect of pre-plant soil fumigants on *Agrobacterium tumefaciens*, pythaceous species, and subsequent soil recolonization by *A. tumefaciens*[J]. Crop Protection, 2010, 29(6): 583-590.
- [34] LIU X, CHENG X, WANG H, et al. Effect of fumigation with 1,3-dichloropropene on soil bacterial communities[J]. Chemosphere, 2015, 139: 379-385.
- [35] FANG W, YAN D, WANG Q, et al. Changes in the abundance and community composition of different nitrogen cycling groups in response to fumigation with 1,3-dichloropropene[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 44-55.
- [36] ILIEVA Z, LAZAROVA T, MITEV A, et al. Monitoring of long-lasting effects of fumigation with dimethyl disulfide (DMDS) on root-gall index, root-knots, other nematode populations, and crop yield over three protected cucumber crops in bulgaria [J]. Agronomy, 2021, 11(6): 1206.
- [37] PAPAZLATANI C, ROUSIDOU C, KATSOULA A, et al. Assessment of the impact of the fumigant dimethyl disulfide on the dynamics of major fungal plant pathogens in greenhouse soils[J]. European Journal of Plant Pathology, 2016, 146(2): 391-400.
- [38] LI W, REN L, LI Q, et al. Evaluation of ethylicin as a potential soil fumigant in commercial tomato production in China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 854: 158520.
- [39] FANG W, YAN D, HUANG B, et al. Biochemical pathways used by microorganisms to produce nitrous oxide emissions from soils fumigated with dimethyl disulfide or allyl isothiocyanate[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 132: 1-13.
- [40] FANG W, YAN D, WANG X, et al. Responses of nitrogen-cycling microorganisms to dazomet fumigation[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 2529.
- [41] FANG W, HUANG B, SUN Y, et al. Soil amendments promoting nitrifying bacteria recovery faster than the denitrifying bacteria at post soil fumigation[J]. Science of the Total Environment, 2023, 908: 168041.

(编辑:胡新宇)

(上接第14页)

参考文献

- [1] 常钦. 目前全国现代设施种植面积达到4 000万亩: 发展设施农业丰富食物供给[EB/OL]. (2023-08-05). [2024-02-14]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202308/content_6897358.htm.
- [2] 曹坳程, 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.
- [3] 曹坳程, 方文生, 李园, 等. 我国土壤熏蒸消毒60年回顾[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 325-335.
- [4] 曹坳程, 刘晓漫, 郭美霞, 等. 作物土传病害的危害及防治技术[J]. 植物保护, 2017, 43(2): 6-16.
- [5] PIZANO M, PORTER I. 2018 Report of the methyl bromide technical options committee[R]. Nairobi: UNEP, 2018.
- [6] PIZANO M, PORTER I. 2022 Report of the methyl bromide technical options committee[R]. Nairobi: UNEP, 2022.
- [7] ZHANG D Q, CHENG H Y, HAO B Q, et al. Fresh chicken manure fumigation reduces the inhibition time of chloropicrin on soil bacteria and fungi and increases beneficial microorganisms [J]. Environmental Pollution, 2021, 286: 117460.
- [8] ZHANG D Q, YAN D D, FANG W S, et al. Chloropicrin alternated with biofumigation increases crop yield and modifies soil bacterial and fungal communities in strawberry production[J]. Science of the Total Environment, 2019, 675: 615-622.
- [9] 方文生, 曹坳程, 王秋霞, 等. 新型土壤消毒一体机提高棉隆土壤分布均匀性[J]. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2570-2580.
- [10] MAO L G, WANG Q X, YAN D D, et al. Flame soil disinfection: a novel, promising, non-chemical method to control soilborne nematodes, fungal and bacterial pathogens in China[J]. Crop Protection, 2016, 83: 90-94.
- [11] WANG X N, CAO A C, YAN D D, et al. Evaluation of soil flame disinfection (SFD) for controlling weeds, nematodes and fungi[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18: 2-10.
- [12] 曹坳程, GONZÁLEZ J A. 中国甲基溴土壤消毒替代技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000: 172-176.
- [13] 张学进, 金永奎, 张玲, 等. 土壤射频消毒技术试验 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 274-277.
- [14] 杨风波, 张玲, 金永奎, 等. 射频制热技术应用现状及土壤射频消毒展望[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 299-309.

(编辑:胡新宇)