

# 生物熏蒸研究进展

夏秀清<sup>1</sup>, 温亮<sup>2</sup>, 程云吉<sup>2</sup>, 陈秀斋<sup>2</sup>, 李军民<sup>3</sup>, 曹长代<sup>3</sup>, 田雷<sup>2</sup>, 欧开元<sup>2</sup>, 杨杰<sup>2</sup>,  
陈为习<sup>2</sup>, 李峰<sup>2</sup>, 高强<sup>2</sup>, 宗浩<sup>2</sup>, 谭效磊<sup>2</sup>, 蒋龙<sup>2</sup>, 李林达<sup>4</sup>, 李泓良<sup>5</sup>, 侯欣<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>山东省临沂市蒙阴县蒙阴街道办事处, 山东 临沂

<sup>2</sup>山东临沂烟草有限公司, 山东 临沂

<sup>3</sup>山东日照烟草有限公司, 山东 日照

<sup>4</sup>浙江中烟工业有限责任公司, 浙江 杭州

<sup>5</sup>山东农业大学植物保护学院, 山东 泰安

收稿日期: 2024年3月4日; 录用日期: 2024年6月20日; 发布日期: 2024年6月28日

## 摘要

生物熏蒸是一种替代目前主流的化学药剂熏蒸的一种方法, 随着对环境保护越来越重要的情况下, 生物熏蒸的重要性也变得愈加重要。目前主要的熏蒸材料以十字花科的芸苔属植物为主, 但是对于植物来说, 还存在着许多富含抗病原菌的植物, 如中草药。许多中草药中都富含许多可以杀菌、杀虫的物质。这对于实际生产中有着重要的作用。

## 关键词

生物熏蒸, 芸苔属植物, 中草药

# Research Progress of Biofumigation

Xiuqing Xia<sup>1</sup>, Liang Wen<sup>2</sup>, Yunji Cheng<sup>2</sup>, Xiuzhai Chen<sup>2</sup>, Junmin Li<sup>3</sup>, Changdai Cao<sup>3</sup>,  
Lei Tian<sup>2</sup>, Kaiyuan Ou<sup>2</sup>, Jie Yang<sup>2</sup>, Weixi Chen<sup>2</sup>, Feng Li<sup>2</sup>, Qiang Gao<sup>2</sup>, Hao Zong<sup>2</sup>,  
Xiaolei Tan<sup>2</sup>, Long Jiang<sup>2</sup>, Linda Li<sup>4</sup>, Hongliang Li<sup>5</sup>, Xin Hou<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Mengyin Street Office, Mengyin County, Linyi Shandong

<sup>2</sup>Shandong Linyi Tobacco Limited Company, Linyi Shandong

<sup>3</sup>Shandong Rizhao Tobacco Limited Company, Rizhao Shandong

<sup>4</sup>Zhejiang China Tobacco Industry Company of Limited Liability, Hangzhou Zhejiang

<sup>5</sup>College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an Shandong

Received: Mar. 4<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2024; published: Jun. 28<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 夏秀清, 温亮, 程云吉, 陈秀斋, 李军民, 曹长代, 田雷, 欧开元, 杨杰, 陈为习, 李峰, 高强, 宗浩, 谭效磊, 蒋龙, 李林达, 李泓良, 侯欣. 生物熏蒸研究进展[J]. 微生物前沿, 2024, 13(2): 125-131.

DOI: 10.12677/amb.2024.132014

## Abstract

Biological fumigation is a method to replace the current mainstream chemical fumigation. With the increasing importance of environmental protection, the importance of biological fumigation has become more and more important. At present, the main fumigation materials are mainly *Brassica L.*, but for plants, there are still many plants rich in anti-pathogenic bacteria, such as Chinese herbal medicine. Many Chinese herbal medicines are rich in many substances that can kill bacteria and insects. This plays an important role in actual production.

## Keywords

Biofumigation, *Brassica L.*, Chinese Herbal Medicines

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

土壤熏蒸是通过向土壤中施加一些化合物达到对有害细菌、真菌、线虫等进行防治的方法。通常用于农业生产中控制土壤传播的真菌病原体、线虫和杂草。土壤熏蒸可以降低植物病害发生率、提高作物产量和改善食品安全，所有这些都为农业生产创造了直接的经济效益。然而，传统熏蒸剂的使用在许多国家的监管仍然是一个有争议的问题[1]，因为它们可能会持续存在于环境中并污染土壤和水；也可能影响植物、动物和水生生物，并对人类健康构成风险。

Angus 等人发现在小麦田中施入油菜和芥菜的根组织可显著减少禾谷全蚀病菌(*Gaeumannomyces graminisvartritici*)的数量，Sarwar 等人首次发现芸薹属植物组织腐烂过程中会生成黑芥子酶，可以水解硫代葡萄糖苷，生成异硫氰酸酯类物质，该物质具有杀菌性，这是芸苔属植物可以用作生物熏蒸的关键，其种类和含量不同对病原菌抑制作用强弱不同[2]。

## 2. 传统熏蒸方式的影响

传统的土壤熏蒸药剂通常以一些具有毒性的化学物质作为主要材料，这些熏蒸剂在其初期以其合理的价格以及不错的防治效果，在实际生产中深受广大农民所喜爱，然而随着技术的发展，环境保护意识的增强，食品安全问题的重视，越来越多的国家开始广泛关注因使用土壤熏蒸剂所引起的一系列安全问题，甲基溴是最常用的熏蒸剂，但因其破坏臭氧层的能力在 2015 年在全球范围内被禁止使用。从那时起，甲基溴就被氯仿(CP)、棉隆(DZ)、1,3-二氯丙烯(1,3-d)、元钠(MS)、二甲基二硫醚(DMDS)和异硫氰酸烯丙酯(AITC)等产品所取代。熏蒸剂因其性质而言对土壤微生物的消杀作用是广谱的，其不仅对目标土壤有害生物有作业，同时对一些已经被研究证明的有益微生物同样具备消杀作用[3]。

### 2.1. Dazomet

DZ 是一种广谱杀菌剂，其作用机制是与真菌细胞中存在的亲核位点(如氨基、羟基和巯基)发生羰基化反应来控制土壤传播的真菌病原体[4]。

用 DZ 作为熏蒸剂熏蒸土壤，土壤细菌多样性改变情况略有不同，要么增加[5]，要么减少[6]，要么

没有显著影响[7]。这种对土壤细菌多样性造成效果不同的原因可能是因为不同试验设计中 DZ 剂量使用有所不同；或者是因为土壤理化性质和环境条件有所差异，这些不同的使用条件影响了其作为一种杀菌剂的发挥效果[8] [9]。例如，在湿度较高的情况下 DZ 可以更快地分解成高效杀菌剂异硫氰酸甲酯(MITC) [10]。当然，就目前为止，细菌的多样性和丰度的变化情况与在使用 DZ 熏蒸后的对土壤取样时间和取样方法的不同之间的联系尚未清楚。一般来说，目前主流取样方法是在熏蒸处理结束后立即取样，在这一时间段内，因为熏蒸剂的广谱杀菌特性，细菌多样性会显著减少。之后，随着时间的推移，再次取样所观察到的细菌多样性普遍会呈现一种上升的趋势，这可能是因为熏蒸剂效果过后，土壤微生物进行恢复导致多样性上升。根据不同的研究，DZ 熏蒸处理过后的土壤细菌多样性会在 30~120 天内恢复到与空白对照相似的水平[6]。以上这些结果表明细菌群落对 DZ 熏蒸过后表现出较高的恢复力，因为它们能够在 DZ 熏蒸的土壤中重新定植[11]。

## 2.2. Chloropicrin

CP 又称氯化苦，是一种广谱杀菌剂，目前大部分试验表明在 120 天内，经过 CP 熏蒸的土壤中，土壤细菌群落的多样性和丰度会出现显著降低的情况[9]。这种多样性和丰度的下降可能是由于土壤微生物死亡率增加而导致的，熏蒸后与微生物碳水化合物/脂质运输和代谢相关的蛋白质相对丰度增加，这是微生物死亡率和细胞裂解增加的共同特征[12]。在研究中发现，经过 CP 熏蒸后，与微生物碳水化合物/脂质转运和代谢相关的蛋白质相对丰度增加，这是微生物死亡率和细胞裂解增加的共同特征[12]。然而，CP 对某些特定细菌属的影响例如，葡萄球菌、*Actinomadura*、*Acinetobacter* 和链霉菌等有益菌属的相对丰度降低，鞘氨醇单胞菌、假单胞菌数量增加[13]，这些菌属的改变有可能对土壤 C 循环产生影响。其中数量增加的菌属可能对 CP 熏蒸的耐受性更好，可能具有利用 CP 作为 C 源的能力[14]。

## 2.3. 1,3-dichloropropene

1,3-d 是一种常用于防治线虫、土传病原体和杂草的土壤熏蒸剂[15]。

有研究发现，在 1,3-d 处理后的前 10~25 天内，土壤细菌丰度会出现上升的情况，这可能因为被 1,3-d 熏蒸后线虫死亡，土壤可利用养分的增加或使用 1,3-d 可作为 C 源导致的[16]。1,3-d 熏蒸后细菌群落组成也会发生变化。例如，与对照土壤相比，施用熏蒸剂后 28 至 168 天，放线菌、溶菌、假单胞菌、*Mycobacterium* 的相对丰度逐渐增加[17]。与此同时，芽孢杆菌、鞘氨醇单胞菌的相对丰度呈下降趋势。出现这种情况的原因可能是因为这些物种对 1,3-d 熏蒸的耐受性有所差异。例如，假单胞菌可以降解 1,3-d。Mocali 等人从 1,3-d 处理超过 20 年的土壤中分离出的革兰氏阳性细菌数量明显多于革兰氏阴性细菌。这些结果表明，革兰氏阳性细菌比革兰氏阴性细菌更能抵抗熏蒸造成的影响，这可能是由于它们的孢子形成能力和细胞壁组成。

# 3. 生物熏蒸的研究进展

## 3.1. 生物熏蒸的发展

生物熏蒸(Biofumigation)主要是通过利用某些植物组织分解过程中产生的具有消杀或抑制作用的活性物质来抑制或杀死土壤中的有害生物的一种方法[18]。Angus 等首次发现在小麦田中施加芸薹属植物组织，可以减少土壤中小麦全蚀病菌的数量，并首次将该种土壤处理方法称为生物熏蒸。国外对利用芸薹属植物作为生物熏蒸材料的研究较多，目前已知的生物熏蒸材料甘蓝、芥菜和花椰菜等植物，通过该种土壤熏蒸方式，发现生物熏蒸对镰刀菌、立枯丝核菌、丽花轮枝孢、根腐丝囊霉、疫霉和线虫等多种土传植物病原菌都有一定的抑制作用[19]。具研究发现，十字花科芸薹属植物之所以具备对病虫害的消杀特

性, 主要源于其含有丰富的硫代葡萄糖苷(Glucosinolates, GLs.), 虽然该物质的本身并没有对植物病原菌展现出很强杀生活性, 但是一旦植物组织被破坏后, 液泡中的黑芥子酶(Myrosinase)释放出来水解硫代葡萄糖苷, 会产生大量的异硫氰酸酯(Isothiocyanates, ITC.)类物质, 这类物质具有广泛的除草、杀菌等效应, 而这也是目前生物熏蒸主要运用来减少有害病原生物的数量原因。李淑敏等利用芥菜、雪里红和油菜 3 种芸薹属蔬菜作为生物熏蒸材料对茄子的连作土壤进行熏蒸处理, 结果表明经过生物熏蒸处理后的连作土壤的茄子黄萎病的发病率明显下降[20]。巩彪等研究明, 土壤中添加大蒜秸秆可以有有效的克制番茄根结线虫病, 根际土壤中细菌、真菌和放线菌的数量显著增加[21]。除此因为, 因为生物熏蒸大部分都是通过利用植物组织进行处理土壤, 这变相的向土壤中添加了额外的有机质, 可以增添土壤养分, 减少化学肥料的使用, 这也是生物熏蒸的一大优势之一。

### 3.2. 生物熏蒸的应用

通过在作物种植前使用不同的生物熏蒸材料进行熏蒸, 可以不同程度的缓解因为土壤连作障碍所引起的各种植物病害, 例如在烟草上进行的生物熏蒸材料筛选得出通过使用西兰花和芝麻菜作为熏蒸材料, 可以很好的缓解烟草青枯病的发病情况, 西兰花和芝麻菜二者对青枯病菌的抑制效果可达 95.3%、95.1%。在生物熏蒸中, 土壤微生物的组成和变化一直是当前所关注的重点, 在使用西兰花处理与芝麻菜处理后, 提高了土壤细菌丰度, 两组处理下物种多样性均大于对照组[22]。变形菌门是细菌中最大的门, 其中的许多类群可以进行固氮作用, 并能够适应各种复杂的环境, 厚壁菌门通常被分类为富营养菌或 r-策略细菌, 即在富含 C 或 N 的条件下能快速生长的微生物, 说明生物熏蒸给土壤微生物提供了丰富的碳源或氮源从而促进了厚壁菌门细菌的生长, 这可能是因为生物熏蒸所添加的植物组织本身可以作为一种有机质的补充, 增添土壤营养[22]。通过芥菜(*Brassica napiformis*, BFN)和油菜(*Brassica napus*, BFC)做为熏蒸材料处理大丽黄萎病, 在茄子移栽 15 d 后, 经过熏蒸的土壤真菌、细菌的多样性出现显著下降。在移栽后 15 天, 各处理茄子样品的有益土壤细菌为黄杆菌、节杆菌、芽孢杆菌和假单胞菌。但是经过芥菜熏蒸处理的黄杆菌和假单胞菌丰度是对照处理的 10 倍。假单胞菌、黄杆菌和摩氏菌的相对群落丰度显著高于其他处理。已知细菌中的黄杆菌属、节杆菌属和芽孢杆菌属以及真菌中的毛菌属和摩氏菌属中都含有能够对出病原体表现出一定拮抗作用的菌株, 这可能是芥菜和油菜熏蒸后茄子的黄萎病发病减轻的原因之一。Hollister 等人(2013)使用芥菜(含有固定油脂和 GSLs 的种子)、亚麻(含有固定油脂但不含 GSLs 的种子)和高粱(不含 GSLs)作为对照, 验证了生物熏蒸的效果, 得出了类似的结果。他们的研究表明, 芥菜诱导与真菌疾病抑制相关的细菌分类群(如芽孢杆菌、假单胞菌和链霉菌)的丰度大幅增加, 从而对植物病害起到一定程度的抑制作用。对于非土传病害, 生物熏蒸依旧能起到很好的防治功效, 例如对采后的苹果进行芥菜的熏蒸, 可以很好的防治苹果灰霉病的发生, 经过芥菜熏蒸后, 观察到一些显著的异常现象。如灰霉病菌菌丝体出现扭曲肿胀, 分枝增加, 尖端发育不良的情况, 与此同时还发现芥菜熏蒸后灰霉病菌孢子的产生也能得到很好的抑制, 除此以外, 芥菜熏蒸的抑菌图谱具有广泛性, 对于荔枝疫霉(*Phytophthora litchii*)、蛇皮霉(*Pythium aphanidermatum*)、尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)、番茄镰刀菌(*Fusarium solani*)、炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)也具有抑制作用[23], 这可能是因为芥菜中硫代葡萄糖苷物质, 该物质水解产生的异硫氰酸酯在实验中表明对番茄灰霉病的 EC50 最低[24], 这可能也是其对其他诸多真菌病害有影响的原因之一。

对于地下害虫的防治, 生物熏蒸同样具有很好的效果, 如通过花椒种子熏蒸可以控制番茄根结线虫, 经过花椒种子熏蒸后番茄根结线虫发病率出现了明显的降低, 这可能与花椒种子所含的一些挥发性物质包括桉树醇(桉树脑)、 $\beta$ -茶香烯、辛酸(癸酸)、己酸(癸酸)和黄原酸有关, 这些物质在以往试验中表现出一定的杀虫和杀菌的活性[25], 可以对害虫产生接触毒害、抑制害虫生育能力来抑制害虫[26]。辛酸和己

酸具有杀线虫活性。番木瓜种子熏蒸可以控制番茄根结线虫,通过分析木瓜种子的挥发性物质,并对其挥发性物质做出纯化后分别用于根结线虫的防治,最后得出乙酸乙烯酯、苯乙醛和苯乙腈这几种木瓜种子挥发物中含有对根结线虫具有毒性的物质[27]。

生物熏蒸在缓解连作障碍方面研究较少,王晓芳等利用利用万寿菊粉末在种植 25 年苹果土壤中进行熏蒸,增加了土壤有益细菌的数量,降低了土壤中病原真菌数量,维持了土壤微生物群落结构的多样性,缓解连作障碍[28]。在连作 10 年的桃园,以茭白秸秆为原材料进行土壤熏蒸,显著提高了土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性,增加了镰孢菌属、青霉属(*Penicillium*)、毛壳菌属(*Chaetomium*)等有益菌类的相对丰度,降低了真菌、细菌的多样性和细菌丰富度、真菌均匀度,提高土壤养分,缓解桃树连作障碍[29]。

在连作土壤中芸薹属蔬菜作为绿肥改善了土壤理化性质。利用二道眉芥菜作熏蒸材料,连作 12 年茄子大棚土壤有机质含量比不使用熏蒸剂处理增加 1.61 倍,病原菌大丽轮枝菌数量比不使用熏蒸剂处理降低 34.74%,缓解大棚茄子的连作障碍[20]。使用高硫芥菜对连作 3 年的黄瓜土壤进行熏蒸,土壤有机质含量在黄瓜苗期、花期、盛果期和拉秧期分别比不进行熏蒸处理的土壤增加 48.42%、23.11%、17.36%和 12.83%,并且熏蒸后显著提高土壤速效钾含量,更有利于维持地力[30]。

#### 4. 展望

随着绿色农业的兴起,越来越多的生物熏蒸材料将会被发现,从传统的十字花科植物熏蒸到一些其他作物熏蒸,不同于国外专注于十字花科植物熏蒸,国内更具有的优势是中草药当作生物熏蒸材料,相比于传统的十字花科植物,中草药更具一些特有的化学物质,可以对植物病原菌产生更好的防治效果。当然,对生物熏蒸过程中到底是如何实现防治效果,其中具体原理还有待商榷,目前的生物熏蒸过程中,在防治一些土传病害的同时,因其熏蒸过程是普遍性的,在熏蒸过程中不仅仅是杀死病原体,还同时消灭了土壤中的其他微生物,因此在目前为止我们对于生物熏蒸的解释就不能仅仅关注于其对病原微生物的杀伤效果,更应该关注的是其对于土壤微整个微生物群落的影响,在整个微生物群落的熏蒸后重建过程中,新的生态群落的构建是否会更符合当前植物生长发育所需要也是我们应该关注的内容。此外,对于在熏蒸过程中一些对熏蒸过程受性更好的微生物种群、熏蒸后恢复效果更明显的种群、其中的优势种群,它们所具备的功能,所发挥的作用,在生态系统中扮演的角色,与其他微生物的联系是否紧密都应该是我们所需要关注的重点。最后,对于有效果的熏蒸材料,其是否能够应用于实际生产中,它的用量,效果,生长发育所需要的季节是否会与当前主栽作物生育期发生冲突,这些都是我们需要在试验中需要思考的问题。

#### 参考文献

- [1] Guedes, R.N.C., Smagghe, G., Stark, J.D. and Desneux, N. (2016) Pesticide-Induced Stress in Arthropod Pests for Optimized Integrated Pest Management Programs. *Annual Review of Entomology*, **61**, 43-62. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-010715-023646>
- [2] 曲红瑶. 中药肥料对金丝皇菊田土壤特性和植株生长的调控研究[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [3] Dangi, S.R., Tirado-Corbala, R., Cabrera, J.A., Wang, D. and Gerik, J. (2014) Soil Biotic and Abiotic Responses to Dimethyl Disulfide Spot Drip Fumigation in Established Grape Vines. *Soil Science Society of America Journal*, **78**, 520-530. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.08.0324>
- [4] Fang, W.S., Yan, D.D., Wang, X.L., Huang, B., Song, Z.X., Liu, J., Liu, X.M., Wang, Q.X., Li, Y., Ouyang, C.B. and Cao, A.C. (2018) Evidences of N<sub>2</sub>O Emissions in Chloropicrin-Fumigated Soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **66**, 11580-11591. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b04351>
- [5] Zhao, S., Chen, X., Deng, S.P., Dong, X.N., Song, A.P., Yao, J.J., Fang, W.M. and Chen, F.D. (2016) The Effects of

- Fungicide, Soil Fumigant, Bio-Organic Fertilizer and Their Combined Application on Chrysanthemum *Fusarium* Wilt Controlling, Soil Enzyme Activities and Microbial Properties. *Molecules*, **21**, Article 526. <https://doi.org/10.3390/molecules21040526>
- [6] Huang, B., Yan, D.D., Wang, Q.X., Fang, W.S., Song, Z.X., Cheng, H.Y., Li, Y., Ouyang, C.B., Han, Q.L., Jin, X. and Cao, A.C. (2020) Effects of Dazomet Fumigation on Soil Phosphorus and the Composition of *PhoD*-Harboring Microbial Communities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **68**, 5049-5058. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b08033>
- [7] Yun, C.X., Liu, E.K., Rippa, M., Mormile, P., Sun, D.B., Yan, C.R. and Liu, Q. (2020) Effects of Chemical and Solar Soil-Disinfection Methods on Soil Bacterial Communities. *Sustainability*, **12**, Article 9833. <https://doi.org/10.3390/su12239833>
- [8] Chen, H.J., Zhao, S., Zhao, J.M., Zhang, K.K., Jiang, J., Guan, Z.Y., Chen, S.M., Chen, F.D. and Fang, W.M. (2020) Deep Tillage Combined with Biofertilizer Following Soil Fumigation Improved Chrysanthemum Growth by Regulating the Soil Microbiome. *MicrobiologyOpen*, **9**, e1045. <https://doi.org/10.1002/mbo3.1045>
- [9] Huang, X.Q., Zhao, J., Zhou, X., Zhang, J.B. and Cai, Z.C. (2019) Differential Responses of Soil Bacterial Community and Functional Diversity to Reductive Soil Disinfestation and Chemical Soil Disinfestation. *Geoderma*, **348**, 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.027>
- [10] Spyrou, I.M., Karpouzias, D.G. and Menkissoglou-Spiroudi, U. (2009) Do Botanical Pesticides Alter the Structure of the Soil Microbial Community? *Microbial Ecology*, **58**, 715-727. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9522-z>
- [11] Mocali, S., Landi, S., Curto, G., Dallavalle, E., Infantino, A., Colzi, C., D'Errico, G., Roversi, P.F., D'Avino, L. and Lazzeri, L. (2015) Resilience of Soil Microbial and Nematode Communities after Biofumigant Treatment with Defatted Seed Meals. *Industrial Crops and Products*, **75**, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.031>
- [12] Huang, B., Yan, D.D., Ouyang, C.B., Zhang, D.Q., Zhu, J.H., Liu, J., Li, Y., Wang, Q.X., Han, Q.L. and Cao, A.C. (2020) Chloropicrin Fumigation Alters the Soil Phosphorus and the Composition of the Encoding Alkaline Phosphatase *PhoD* Gene Microbial Community. *Science of the Total Environment*, **711**, Article 135080. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135080>
- [13] Li, J., Huang, B., Wang, Q.X., Li, Y., Fang, W.S., Yan, D.D., Guo, M.X. and Cao, A.C. (2017) Effect of Fumigation with Chloropicrin on Soil Bacterial Communities and Genes Encoding Key Enzymes Involved in Nitrogen Cycling. *Environmental Pollution*, **227**, 534-542. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.076>
- [14] Zhang, S.T., Liu, X.J., Jiang, Q.P., Shen, G.H. and Ding, W. (2017) Legacy Effects of Continuous Chloropicrin-Fumigation for 3-Years on Soil Microbial Community Composition and Metabolic Activity. *AMB Express*, **7**, Article No. 178. <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0475-1>
- [15] Qiao, K., Shi, X. G., Wang, H.Y., Ji, X.X. and Wang, K.Y. (2011) Managing Root-Knot Nematodes and Weeds with 1,3-Dichloropropene as an Alternative to Methyl Bromide in Cucumber Crops in China. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **59**, 2362-2367. <https://doi.org/10.1021/jf104553f>
- [16] Liu, X.M., Cheng, X.K., Wang, H.Y., Wang, K.Y. and Qiao, K. (2015) Effect of Fumigation with 1,3-Dichloropropene on Soil Bacterial Communities. *Chemosphere*, **139**, 379-385. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.034>
- [17] Zhang, D.L., Ji, X.X., Meng, Z., Qi, W.Z. and Qiao, K. (2019) Effects of Fumigation with 1,3-Dichloropropene on Soil Enzyme Activities and Microbial Communities in Continuous-Cropping Soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **169**, 730-736. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.071>
- [18] 李世东, 李明社, 缪作清, 郭荣君. 生物熏蒸用于治理蔬菜根结线虫病的研究[J]. 植物保护, 2007, 33(4): 68-71.
- [19] 李明社, 李世东, 缪作清, 郭荣君, 赵震宇. 生物熏蒸用于植物土传病害治理的研究[J]. 中国生物防治, 2006, 22(4): 296-302.
- [20] 李淑敏, 郑成斌, 张润芝, 杨自超, 曲红云, 刘彤彤, 袁睿, 姚小桐, 王雪蓉, 许宁, 张春怡. 生物熏蒸对大棚连作茄子产量和黄萎病发病率影响[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(5): 35-41.
- [21] 巩彪, 张丽丽, 隋申利, 王秀峰, 魏珉, 史庆华, 杨凤娟, 李岩. 大蒜秸秆对番茄根结线虫病及根际微生态的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 933-941.
- [22] 刘琛. 烟草青枯病菌生物熏蒸材料的筛选及条件优化[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [23] Tian, Y.E., Yang, Z.T., Song, W., Zhao, H.Q., Ye, Q., Xu, H., Hu, B.S., Shen, D.Y. and Dou, D.L. (2023) Biofumigation by Mustard Plants as an Application for Controlling Postharvest Gray Mold in Apple Fruits. *Agronomy*, **13**, Article 1490. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061490>
- [24] Sansone, G., Lambrese, Y., Calvente, V., Fernández, G., Benuzzi, D. and Ferramola, M.S. (2018) Evaluation of *Rhodosporidium fluviale* as Biocontrol Agent against *Botrytis cinerea* on Apple Fruit. *Letters in Applied Microbiology*, **66**, 455-461. <https://doi.org/10.1111/lam.12872>
- [25] Chermenskaya, T.D., Stepanycheva, E.A., Shchenikova, A.V., Savelieva, E.I. and Chakaeva, A.S. (2012) Insecticidal

- 
- Effects of *Ungernia severtzovii* Bulb Extracts against the Grain Aphid *Schizaphis graminum* (Rondani). *Industrial Crops and Products*, **36**, 122-126. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.08.010>
- [26] Karabörklü, S. and Ayzav, A. (2023) A Comprehensive Review of Effective Essential Oil Components in Stored-Product Pest Management. *Journal of Plant Diseases and Protection*, **130**, 449-481. <https://doi.org/10.1007/s41348-023-00712-0>
- [27] Gomes, V.A., Campos, V.P., Da Silva, J.C.P., Silva, F.D., Silva, M.D. and Pedroso, M.P. (2020) Activity of Papaya Seeds (*Carica papaya*) against *Meloidogyne incognita* as a Soil Biofumigant. *Journal of Pest Science*, **93**, 783-792. <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01192-z>
- [28] 王晓芳, 徐少卓, 王玫, 段亚楠, 王海燕, 盛月凡, 毛志泉. 万寿菊生物熏蒸对连作苹果幼苗和土壤微生物的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 213-224.
- [29] 高志远, 杨淑娜, 王朝丽, 王智豪, 奚昕琰, 何娟, 贾惠娟. 不同熏蒸方式对连作桃园土壤的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(10): 2251-2258.
- [30] 潘明阳. 生物熏蒸对设施连作黄瓜产量和土壤养分含量的影响[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.