



土壤熏蒸剂棉隆防治土传病害研究进展 及未来发展趋势

方文生¹ 王秋霞¹ 颜冬冬¹ 李园¹ 曹兵伟² 徐进³ 靳茜⁴ 曹焯程^{1*}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193; 2. 农业农村部农药检定所, 北京 100125; 3. 北京市农业技术推广站, 北京 100029; 4. 河北省土传病害绿色防控技术创新中心, 保定 071000)

摘要: 棉隆对病原细菌、真菌、根结线虫及杂草均有较高防效, 而且作为固体微颗粒剂具有使用简单、安全的特性, 被广泛用于作物种植前熏蒸土壤以防治土传病虫害。施用过程中, 土壤环境因素(包括土壤类型、土壤温湿度、土壤有机质及pH等)、施药方式、施药季节和施药剂量均会对棉隆的熏蒸效果产生显著影响, 不正确的使用方式常会导致熏蒸效果不理想或产生药害问题。该文系统综述土壤熏蒸剂棉隆的使用概况(包括作用机制、适用作物、施用方式和施用效果等)、存在的问题及原因分析(包括施用深度、水分、温度对棉隆有效成分含量的影响及其熏蒸对土壤微生物群落结构的影响等)、解决对策(包括改善施药方式、优化土壤环境和活化熏蒸后土壤微生物等)以及未来发展趋势, 以期为棉隆的高效应用提供借鉴。

关键词: 棉隆; 异硫氰酸甲酯; 土传病害; 土壤熏蒸; 土壤微生物

Research progresses and future development trends of soil fumigant dazomet in control of soil-borne diseases

Fang Wensheng¹ Wang Qiuxia¹ Yan Dongdong¹ Li Yuan¹ Cao Bingwei² Xu Jin³
Jin Xi⁴ Cao Aocheng^{1*}

(1. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Institute for the Control of Agrochemicals, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 3. Beijing Agricultural Technology Extension Station, Beijing 100029, China; 4. Hebei Technology Innovation Center for Green Management of Soil-Borne Diseases, Baoding 071000, Hebei Province, China)

Abstract: As a solid microgranule, dazomet is widely used to control soil-borne diseases and insect pests before crop planting because of its properties of simple and safe. However, soil environmental factors during application (including soil type, soil temperature and humidity, soil organic matter and pH, etc.), application method, and application season and application dose all have significant impacts on the efficacy of dazomet. Incorrect use methods often cause problems such as unsatisfactory fumigation effect or drug damage. In this paper, the general situation of the use of dazomet (including the mechanism of action, applicable crops, application methods, application effects, etc.), the existing problems and the causes (including the effects of application depth, water and temperature on the degradation of dazomet to the active components), as well as the solutions (including the improvement of application methods, optimization of soil environment, activation of fumigated soil microorganisms, etc.) and the future development prospects were summarized. This paper expect to provide a theoretical basis for the

基金项目: 国家自然科学基金(32001952, 31972313)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: caoac@vip.sina.com

收稿日期: 2021-04-18

efficient application of dazomet.

Key words: dazomet; methyl-isothiocyanate; soil-borne disease; soil fumigation; soil microorganism

目前,土传病害是限制高附加值作物生产的重要瓶颈。土传病害的传统防治方法包括化学防治、物理防治和生物防治等,这些方法存在各自的不足,如不合理的化学防治会污染环境并增加农副产品中的农药残留,物理防治和生物防治存在防效不稳定等问题(曹坳程等,2017)。目前,在作物种植前对土壤进行熏蒸消毒是防治土传病害、缓解连作障碍最有效的方法之一。土壤熏蒸消毒是指将熏蒸剂通过注射或混土的方式施入到土壤中,采用专用塑料薄膜密封熏蒸10~15 d,使熏蒸剂气体扩散至不同深度土层,达到杀虫防病的效果(王秋霞等,2017)。熏蒸剂防治谱广,对土壤中的病原细菌、真菌、杂草和地下害虫均有较好的防效;此外,土壤熏蒸剂大多为小分子化合物,在土壤中降解快,在作物和果实中均无残留(王秋霞等,2017)。鉴于土壤熏蒸消毒高效且安全,已逐渐成为国内外病虫害综合防治的重要组成部分。

溴甲烷是过去应用最广、效果最好的土壤熏蒸剂,因破坏臭氧层已被限制在农业上使用(Martin, 2003),我国已于2015年全面取消溴甲烷作为土壤熏蒸剂的应用。当前国际上使用的溴甲烷替代品主要包括氯化苦、1,3-二氯丙烯、棉隆、威百亩、二甲基二硫和辣根素等(曹坳程等,2022)。威百亩和棉隆在土壤中转化为活性物质异硫氰酸甲酯(methyl-isorhodanate, MITC),但MITC蒸气压低,易溶于水,其蒸气在土壤中的扩散范围小(Martin, 2003),为了增加扩散性,MITC一般以母体形式——威百亩或棉隆施于土壤中。其中,棉隆作为固体粒剂,人工撒施并混入土壤即可完成施药,因使用简单、安全和快捷高效的施药方式使得其成为我国应用最广泛的土壤熏蒸剂。

本文基于棉隆使用过程中出现熏蒸消毒效果不稳定及产生药害风险等问题,从棉隆作用机制、适用作物、施用方式和施用效果,以及施用深度、水分、温度对其有效成分含量的影响和熏蒸对土壤微生物群落结构的影响等方面剖析棉隆应用中存在的问题及原因分析,并基于改善施药方式、优化土壤环境和活化熏蒸后土壤微生物等途径提出解决对策,以期棉隆的高效应用及科学施用标准的制定提供参考依据。

1 棉隆使用概况

1.1 作用机制

棉隆自1960年首次获得登记并在土壤熏蒸领域被广泛应用,目前已成为国外施用量排前5位的土壤熏蒸剂之一,也是我国应用面积及用量排前2位的土壤熏蒸剂之一。它是一种无色晶体,熔点为104℃,20℃时在水中的溶解度达3 g/L。按照我国农药毒性分级标准,棉隆属低毒杀菌剂、杀线虫剂。棉隆的兔急性经皮半致死剂量(median lethal dose, LD₅₀)是2 360~2 600 mg/kg,大鼠急性经口LD₅₀是500~650 mg/kg,对鲤鱼的半致死浓度(median lethal concentration, LC₅₀)(48 h)是10 mg/L,对蜜蜂安全,对动物无致畸、致癌作用。

棉隆本身没有杀虫、杀菌活性,其活性成分是MITC。当棉隆施用到湿润的土壤中后可以快速分解成MITC,MITC可迁移至不同深度土层并与有害生物接触后将其杀灭。棉隆的作用机制主要是通过MITC的羰基化反应来破坏生物体内酶结构达到杀虫灭菌的效果,如MITC中的N=C=S可与含氨基、羟基、硫醇等亲核位点的蛋白和酶等发生反应,使蛋白失活(Lin et al., 2000)。

1.2 适用作物

棉隆是一种广谱性土壤熏蒸剂,可用在苗床、新耕地、盆栽、温室、花圃、苗圃、木圃及果园等场所(曹坳程和王久臣,2015)。棉隆在美国、日本以及澳大利亚等发达国家均已登记作为土壤熏蒸剂使用,广泛用于防治土传病害。如在美国棉隆已登记用于草莓、花卉、番茄、坚果、树籽苗、树莓幼苗、玫瑰幼苗、果苗定植和草坪等;在日本棉隆已登记用于生姜;在澳大利亚棉隆已登记用于草莓幼苗;在以色列棉隆已登记用于甜瓜、西瓜和番茄等作物(毛连纲,2015)。在我国,棉隆已登记用于草莓、番茄、生姜、花卉和中药材,以防治根腐病和植物病原线虫(表1)。

1.3 施用方式

根据熏蒸剂的剂型,土壤熏蒸剂的施用方式有滴灌法(如威百亩水剂)、注射法(如氯化苦和二甲基二硫液剂等)、气体分布带施药法(如溴甲烷和硫酰氟等)。其中棉隆作为固体颗粒剂,通过简单的混土施药方式即可完成熏蒸操作,即将药剂均匀撒施后进行均匀旋耕,而旋耕的深度和均匀程度是影响土壤熏蒸效果的重要因素。

表1 棉隆在中国作物上的登记情况
Table 1 The registration of dazomet in China

作物/场所 Crop/site	防治对象 Object	用量 Dosage/(g/m ²)	施用方法 Application
白术 <i>Atractylodes macrocephala</i>	根腐病 Root rot	30-45	撒施 Broadcast
草莓 <i>Fragaria × ananassa</i>	根腐病 Root rot	30-45	撒施 Broadcast
番茄(保护地) <i>Solanum lycopersicum</i> (protective cultivation)	线虫病 Nematodosis	30-45	土壤处理 Soil treatment
杭白菊 <i>Chrysanthemum morifolium</i>	根腐病 Root rot	30-45	撒施 Broadcast
姜 <i>Zingiber officinalis</i>	线虫病 Nematodosis	30-45	土壤处理 Soil treatment
菊科和蔷薇科观赏花卉 Ornamental flowers of Compositae and Rosaceae	线虫病 Nematodosis	30-45	土壤处理 Soil treatment

表中数据收集自中国农药信息网(<http://www.chinapesticide.org.cn/>)。Data collected from China Pesticide Information Network (<http://www.chinapesticide.org.cn/>).

不同的混土施药方式将影响棉隆颗粒在土壤中的分布均匀度及对土传病原菌的防效(Kelpsas & Campbell, 1994; Juzwik et al., 1997)。Fraedrich & Dwinell(2003)比较了采用旋耕机和铲土机施用棉隆的效果,发现无论是低剂量(280~325 kg/hm²)还是高剂量(493~560 kg/hm²)处理,2种机械混药方式对松树苗床幼苗密度及生长状况均无显著影响,但两者均显著高于手撒施药处理。这是因为采用机械施药可将棉隆施入较深土层,能获得更好的分布均匀度及熏蒸效果。目前,棉隆在国内主要依靠手撒施药+小型旋耕机翻理或者人工翻土方式施用,该施药方式存在许多不足,如手撒施药容易导致药剂漂移、污染周边环境及作物;药剂撒施均匀度和分散性较差,导致棉隆分布不均匀而出现防效不理想或产生药害问题;小型旋耕机或人工翻土深度不够,一般最深为20 cm,而致病菌在0~40 cm深度土层中

均有分布(曹劫程等,2017),导致对病原菌的防治不彻底,分布在深层土壤的致病菌将再次入侵暴发。

1.4 施用效果

棉隆对土传病原细菌、真菌、植物病原线虫(简称植物线虫)及杂草均有较好的防效(表2)。如棉隆以280~325 kg/hm²用量进行土壤熏蒸消毒,能显著减少土壤疫霉菌属真菌 *Phytophthora* spp. 和镰刀菌属 *Fusarium* spp. 真菌,减退率分别为78.6%~84.2%和55.9%~90.7%,同时植物寄生线虫数量也有所降低,且能促进松树幼苗生长(Fraedrich & Dwinell, 2003)。棉隆对杂草的防效不如溴甲烷,如Skroch(1995)发现棉隆用量为392 kg/hm²时对大部分杂草具有较好的防效,但对香附子的防效较差。尽管棉隆对莎草科杂草香附子的防效不理想,但对早熟禾及狗牙根表现出高活性,防效均高于90%(Park & Landschoot, 2003; Jeffries et al., 2017)。

表2 棉隆主要防治对象及防效
Table 2 The control effects of dazomet fumigation against some main targets

防治对象 Object	用量 Dosage	防效评价 Control effect	参考文献 Reference
菌核菌 <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	450 kg/hm ²	良好 Good	Jones, 1974
疫霉菌属真菌 <i>Pythium</i> spp.	280-560 kg/hm ²	非常好 Very good	Fraedrich & Dwinell, 2003
镰刀菌属真菌 <i>Fusarium</i> spp.	280-560 kg/hm ²	满意 Satisfaction	Fraedrich & Dwinell, 2003
<i>Phellinus noxius</i>	600 kg/hm ²	非常好 Very good	Fu et al., 2012
黄瓜枯萎病菌 <i>Fusarium oxysporum</i>	-	非常好 Very good	Tian et al., 2014
青枯菌 <i>Ralstonia solanacearum</i>	800 kg/hm ²	非常好 Very good	Mao et al., 2017
十字花科根肿病菌 <i>Plasmodiophora brassicae</i>	400 kg/hm ²	良好 Good	Hwang et al., 2017
早熟禾 <i>Poa annua</i>	194-388 kg/hm ²	非常好 Very good	Park & Landschoot, 2003
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	291-583 kg/hm ²	非常好 Very good	Jeffries et al., 2017
香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	280-560 kg/hm ²	不满意 Dissatisfaction	Fraedrich & Dwinell, 2003
真滑刃属线虫 <i>Aphelenchus</i> sp.	200 mg/kg	不满意 Dissatisfaction	Eo & Park, 2014
南方根结线虫 <i>Meloidogyne incognita</i>	2 g/L	良好 Good	Hussain et al., 2020

非常好指防效≥85%;良好指70%≤防效<85%;满意指60%≤防效<70%;不满意指防效<60%。Very good indicates the control effects≥85%; good indicates 70%≤the control effects<85%; satisfaction indicates 60%≤the control effects<70%; dissatisfaction indicates the control effects<60%.

由木层孔菌属真菌 *Phellinus noxius* 引起的烂根病是危害热带、亚热带地区树木生长的重要病害, Fu et al. (2012) 评估了棉隆熏蒸消毒对 *Phellinus noxius* 的防效, 发现 600 kg/hm² 棉隆可有效抑制该菌生长, 且对植物生长未产生负面影响。尽管棉隆对镰刀菌属真菌的防效较对疫霉菌属真菌的防效低, 但 Tian et al. (2014) 研究表明棉隆对由尖孢镰刀菌 *F. oxysporum* 引起的黄瓜枯萎病防效达 88%, 且与生防菌粉红螺旋聚孢霉 *Clonostachys rosea* 联合使用时的防效更高, 可达 100%。对根肿病发生严重的油菜地进行棉隆熏蒸消毒, 不仅可降低发病指数, 而且能增加油菜种子出苗率, 促进油菜生长, 增加菜籽产量 (Hwang et al., 2017)。Mao et al. (2017) 评估了棉隆熏蒸消毒对姜瘟病的防效, 当棉隆用量为 800 kg/hm² 时对姜瘟病病原菌——青枯菌 *Ralstonia solanacearum* 的抑制率达 90% 以上, 且能显著增加生姜产量。而且, 在较低温度下棉隆仍然能表现出高杀菌活性, 如在 20℃ 下熏蒸 2~4 d 可以很好地抑制大豆菌核菌 *Sclerotinia sclerotiorum*, 在 5℃ 下熏蒸 8 d 依然能够高效抑制菌核菌的生长 (Jones, 1974)。但低温条件下使用棉隆时需要综合考虑防治对象及土壤环境条件, 否则容易导致熏蒸效果下降。

2 存在问题和原因分析

2.1 存在的问题

尽管棉隆的使用历史已超过 60 年, 但棉隆熏蒸效果不稳定, 易使后茬作物出现药害现象 (McGovern et al., 1998; Martin, 2003)。如对美国南部苗床经营者的调查结果表明, 近 40% 的农场主对棉隆的熏蒸效果不满意 (Fraedrich, 1994)。这是因为土壤条件如温湿度、施药剂量、使用方法、土壤改良剂、施药季节及播种时期均会影响棉隆的熏蒸效果。如因手撒施药导致药剂分布不均, 有些地方药剂浓度过高易带来药害问题, 有些地方药剂浓度过低导致防效不理想。Martin (2003) 研究报道棉隆的活性成分 MITC 在土壤中移动性较差, 从施药点向四周移动的距离小于 10 cm, 易导致土壤中药剂分布不均匀。而且在冬季低温条件下进行棉隆熏蒸消毒时, 棉隆分解成 MITC 的速度变慢, 影响熏蒸效果 (Zheng et al., 2004); 且当土壤湿度低于 60% 田间持水量时棉隆分解不彻底, 容易引起药害问题 (毛连纲, 2015)。因此, 明确土壤温湿度和土壤类型等环境因子对棉隆分解、迁移和扩散的影响, 对于提高棉隆的熏蒸消毒效果、避免药害问题具有重要的实践意义。

此外, 熏蒸剂作为一种广谱性药剂, 除了杀灭土壤病原生物, 对土壤非靶标生物也产生一定影响。土壤微生物作为植物健康的第 2 道免疫阀门, 在调控土传病害发生以及作物根际营养吸收利用方面发挥着重要作用。因此, 明确棉隆熏蒸消毒对土壤微生物群落多样性及结构组成的影响, 对熏蒸后期采取适宜的措施提高作物根际免疫具有重要意义。

2.2 原因分析

2.2.1 棉隆降解过程受土壤环境影响大

棉隆自身没有杀菌活性, 其活性成分是一级降解产物 MITC。当棉隆施用到湿润的土壤中时可降解产生 MITC, 但降解速率受土壤类型、土壤温湿度、土壤酸碱度和土壤改良剂等环境因子的影响很大。如 Fang et al. (2018a) 调查了棉隆在我国 7 个省作物种植区土壤中的降解情况, 发现棉隆的降解半衰期在 36~143 h 之间, 如在北京市、山东省、河北省和辽宁省等北方地区, 棉隆的降解半衰期小于 50 h, 而在浙江省、四川省和湖南省等南方地区, 棉隆的降解半衰期在 120 h 以上, 表明棉隆降解速率因土壤类型而异。棉隆降解速率还会随着土壤含水量、温度、pH 的增加而增加, 当土壤含水量从 10% 增加到 30% 时, 棉隆降解速率增加 16.2~38.0 倍; 当土壤温度从 5℃ 升高到 30℃ 时, 降解速率增加 14.9~23.5 倍; 当土壤 pH 从 6.2 调节至 9.6 时, 棉隆降解速率增加 42.1%~56.1% (Fang et al., 2018a), 可见土壤温湿度及 pH 是影响棉隆降解的主要因子。此外, 当土壤中添加鸡粪时会显著抑制棉隆的降解, 如棉隆在未添加鸡粪土壤中的降解速率较其在添加 1.0%、2.5% 和 5.0% 鸡粪土壤中的降解速率分别高 50.0%、1.9 倍和 2.6 倍 (Fang et al., 2018a)。施用尿素也会影响棉隆的降解, 如棉隆在未施用尿素土壤中的降解速率较其在施用 50、100 和 200 mg/kg 尿素土壤中的降解速率分别高 80.0%、1.5 倍和 2.3 倍。但是, 土壤中微生物对棉隆的降解并无显著影响, 如棉隆在采集自北京市的灭菌和未灭菌土壤中的降解半衰期为 35~38 h, 在采集自浙江省的灭菌和未灭菌土壤中的降解半衰期为 120~126 h, 均无显著差异 (Fang et al., 2018a)。棉隆在 pH 为 7.8 的水中降解半衰期只有 6.5 h, 远小于在土壤中的降解半衰期 (36~143 h), 而且当水的 pH 升至 11, 降低半衰期只有 0.6 h (Fang et al., 2018a), 表明棉隆的降解过程主要为水解, 且碱性条件可以加速其水解。

本文以我国北方潮土 (弱碱性, pH=7.2) 和南方红壤 (酸性, pH=5.8) 为代表性土壤, 绘制了棉隆降

解半衰期-土壤含水量及降解半衰期-土壤温度间的回归方程(图1),发现无论是在北方碱性潮土还是南方酸性红壤中,棉隆的降解半衰期均与土壤湿度($R^2 \geq 0.720$, $P < 0.001$)、温度($R^2 \geq 0.799$, $P < 0.001$)呈显著线性正相关。因此,依据土壤类型及土壤酸碱

度,结合该回归方程,可初步预测棉隆在不同含水量、不同温度土壤中的降解半衰期。但因土壤本身的复杂性,今后需结合更多土壤参数如土壤有机质含量和孔隙度等才能准确预测棉隆在不同环境中的降解半衰期。

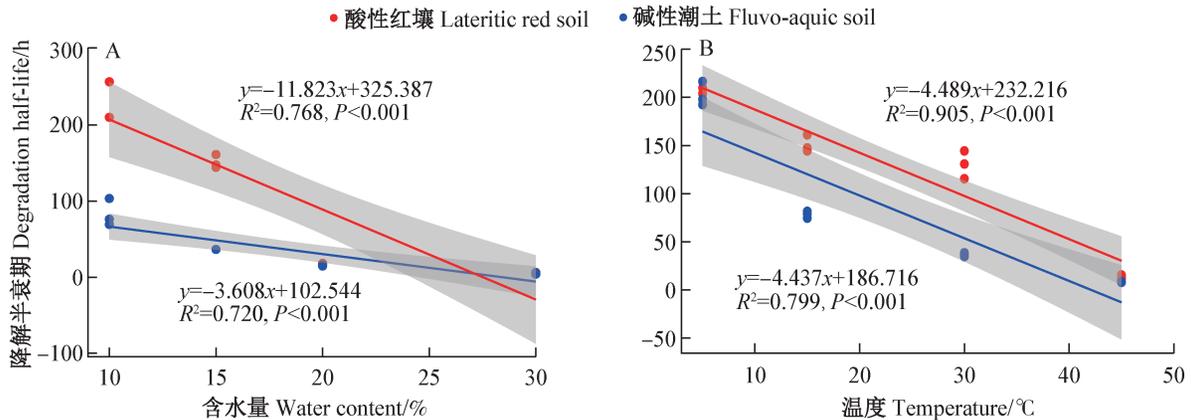


图1 棉隆降解半衰期与土壤含水量(A)及土壤温度(B)的回归方程

Fig. 1 Degradation half-life of dazomet was dependent on soil water content (A) and soil temperature (B)

红色代表酸性红壤,采自浙江省, pH=5.8; 蓝色代表碱性潮土,采自北京市, pH=7.2。数据收集自 Fang et al. (2018a)。Red represents lateritic red soil from Zhejiang Province, pH=5.8; blue represents fluvo-aquic soil from Beijing, pH=7.2. Data collected from Fang et al. (2018a).

2.2.2 MITC的熏蒸效果受土壤环境影响大

MITC是棉隆或威百亩的主要分解成分,也是其活性成分,MITC在土壤中的降解速率直接影响其熏蒸效果。MITC在土壤中的降解受土壤温湿度、土壤类型及土壤添加物等环境因子的影响。如MITC降解速率随着土壤温度的升高而增加,当土壤温度从4°C增加到21°C,在腐殖质砂壤中MITC的降解半衰期由34.6 d降至6.9 d,在壤质砂土中则从17.3 d降至4.6 d (Smelt & Leistra, 1974)。同样, Dungan et al. (2003)发现当土壤温度从20°C增加至40°C, MITC的降解半衰期由5.8 d降至1.8 d。本文收集 Smelt & Leistra (1974) 及 Dungan et al. (2003) 在不同温度下开展的MITC降解数据绘制回归方程 $y = -0.400x + 15.861$ ($R^2 = 0.843$, $P < 0.001$, 图2), 表明MITC的降解半衰期与土壤温度呈显著线性关系,该方程可初步预测砂壤土中不同温度下MITC的降解半衰期。

土壤含水量对MITC的降解也会产生影响,但影响程度不如土壤温度大,如当田间持水量为25%、50%和75%时,MITC的降解半衰期分别为4.3、5.8和5.3 d (Dungan et al., 2003)。Fang et al. (2016)也发现当土壤含水量由5%增加至15%时,MITC的降解半衰期由0.89 d延长至0.92 d。Gan et al. (1999)

研究也表明土壤温度为30°C时,MITC降解速率随着田间持水量增加而增大,其降解速率在90%田间持水量下比80%田间持水量时快2.6倍。由此可见,MITC降解速率随着土壤含水量的增加而轻微减慢,可能是因为MITC易溶于水(20°C下溶解度为7.6 g/L),土壤含水量继续增加时水相中MITC的比例及微生物可降解比例不再增加 (Dungan et al., 2003)。

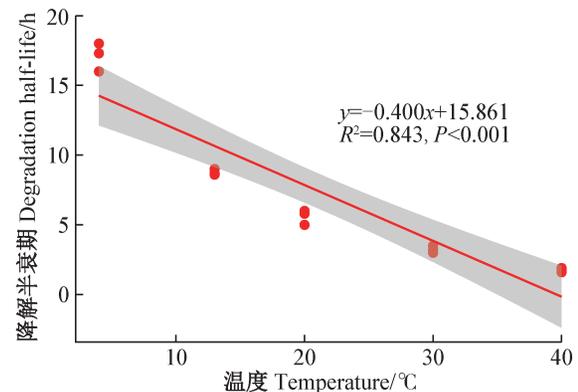


图2 异硫氰酸甲酯降解半衰期与土壤温度的回归方程

Fig. 2 Regression equation between degradation half-life of methyl isothiocyanate and soil temperature

土壤类型为砂壤土, pH=7.2。数据收集自 Smelt & Leistra (1974) 和 Dungan et al. (2003)。The soil type was sandy loam, pH=7.2. Data collected from Smelt & Leistra (1974) and Dungan et al. (2003).

向土壤中添加鸡粪能显著加速 MITC 的降解速率,如在土壤温度为 30℃ 条件下,添加 1.0%、2.5% 和 5.0% 新鲜鸡粪,土壤中 MITC 的降解半衰期分别为 1.4、1.2 和 0.8 d (Dungan et al., 2003)。大量研究报告,MITC 的降解途径主要为微生物降解,且微生物降解比例占总降解比例的 50.1%~90.0% (Dungan et al., 2003; Fang et al., 2017)。鸡粪中含有大量有机质及微生物,因此土壤中添加有机质可显著加速 MITC 降解。降解 MITC 的微生物在土壤中不会轻易消失,当重复施用棉隆或威百亩时,会加速 MITC 的降解 (Frick et al., 1998; Di Primo et al., 2003)。

2.2.3 熏蒸干扰土壤生物群落平衡

土壤生物包括细菌、真菌、原生生物、病毒以及如线虫、蚯蚓等无脊椎动物,它们在维持土壤生态服务功能及土壤健康方面发挥着重要作用。土壤生物应对棉隆胁迫的响应不一,如大部分细菌可抵抗棉隆胁迫,2 000 mg/kg 用量下(比推荐用量 400 kg/hm² 高 15 倍)仍有 0.001% 细菌存活,而大于 200 mg/kg 用量下可杀死全部真菌,20 mg/kg 处理下只有 9.1% 的线虫存活 (Eo & Park, 2014)。微型节肢动物对棉隆表现出高敏感性,如弹尾目昆虫和甲螨在 20 mg/kg 棉隆处理下完全消失 (Eo & Park, 2014)。由此可见,土壤生物对棉隆的敏感程度不同,依次为微型节肢动物>线虫>真菌>细菌。

棉隆熏蒸会对土壤中的真菌群落产生较大影响。Eo & Park (2014) 从棉隆熏蒸后的人参种植土壤中分离抗性真菌,发现木霉属 *Trichoderma* 真菌最耐棉隆胁迫,在采集的 21 个样品中有 7 个样品分离到木霉属真菌,各有 1 个样品分离到根霉属 *Rhizopus* 和接酶属 *Zygorhynchus* 真菌,而 21 个样品中均未分离到致病真菌。Fraedrich & Dwinell (2003) 研究也表明棉隆熏蒸对土壤真菌丰度无显著影响或产生轻微影响,但高浓度 (560 kg/hm²) 棉隆能显著增加根际有益菌木霉 *Trichoderma* spp. 的丰度。因此,未来研究中可以考虑将棉隆熏蒸消毒与生防菌木霉联合使用。Eo & Park (2014) 对人参种植过程中的 6 种致病真菌进行棉隆敏感性分析,发现疫霉 *Phytophthora* spp. 和丝核菌 *Rhizoctonia solani* 最易受棉隆影响,人参柱孢锈腐菌 *Cylindrocarpon destructans* 和腐皮镰刀菌 *F. solani* 最耐棉隆熏蒸。同时,棉隆熏蒸消毒也可改变土壤真菌群落多样性及结构组成。如土壤真菌的磷脂脂肪酸条带数在棉隆熏蒸后期逐渐增加 (Eo & Park, 2014); 但熏蒸后 19 个月,苹果树苗根际土壤真菌多样性与未熏蒸处理无显著差

异,苹果树苗枝条生长量与毛壳菌属 *Chaetomium* 和假霉样真菌属 *Pseudallescheria* 呈显著正相关,与棘壳孢属 *Pyrenochaeta* 和被孢霉属 *Mortierella* 呈显著负相关 (Nicola et al., 2017)。棉隆熏蒸还会显著降低菌根真菌的定殖,而且 1 年后也未能恢复至熏蒸前水平 (Mark & Cassells, 1999), 可能是因为熏蒸减少或者消灭了可利用的真菌繁殖体,导致菌根真菌定殖量下降。如 Robertson & Boyle (1988) 报道 MITC、氯化苦和 1,3-二氯丙烯熏蒸后真菌繁殖体数量约是熏蒸前的 1/100,而且土传真菌繁殖体需要超过 6 个月的时间才能恢复至熏蒸前水平 (Ridings et al., 1977)。

棉隆熏蒸也会对土壤中的细菌群落产生重要影响。棉隆熏蒸短期内能降低土壤细菌群落多样性,显著改变细菌群落组成 (Huang et al., 2019),但在熏蒸后期会显著增加植物抗病相关有益菌包括芽胞杆菌属 *Bacillus*、类芽胞杆菌属 *Paenibacillus* 和青霉菌属 *Penicillium* 的丰度 (Zhu et al., 2020)。而 Fang et al. (2018b) 研究结果也表明棉隆熏蒸能短暂增加土壤细菌多样性,但这种刺激作用很快会消失。Nicola et al. (2017) 通过长期定位试验发现棉隆熏蒸后 19 个月,苹果树苗根际土壤细菌多样性与未熏蒸处理无显著差异,但细菌群落结构发生显著变化,表明熏蒸后期细菌群落多样性可快速恢复。但当土壤类型不同时,微生物的响应也可能不同,如 Fang et al. (2018b) 研究发现棉隆熏蒸消毒显著降低了土壤细菌总丰度,且这种抑制作用在江西省酸性红壤中较在北京市碱性潮土中更明显;熏蒸后期,细菌总丰度逐步恢复,且在北京市碱性潮土中的恢复速度快于在江西省酸性红壤中;如在北京市碱性潮土中,细菌总丰度在熏蒸后 38 d 恢复至对照水平,而在江西省酸性红壤中细菌总丰度在整个培养周期 (59 d) 持续低于未熏蒸处理;尽管在门水平上细菌结构组成未发生显著变化,但细菌在门水平的相对丰度发生了显著变化,如短暂降低优势菌门酸杆菌门和氯弯菌门细菌的相对丰度,而熏蒸后期显著促进放线菌门、厚壁菌门、芽单胞菌门、硝化螺旋菌门以及酸杆菌门细菌的相对丰度。

棉隆熏蒸会显著影响土壤中的氮循环功能微生物及氮循环过程。如 Fang et al. (2018b) 定量了土壤氮循环过程中 11 个功能基因的丰度,发现在北京市碱性潮土中棉隆只短暂降低氨氧化古菌 (ammonia-oxidizing archaea, AOA) *amoA*、*napA*、*narG*、*nirK*、*nirS*、*qnorB* 基因丰度,且其丰度在熏蒸后 38 d 恢复

对对照水平;而氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB) *amoA*、*cnorB* 和 *nosZ* 基因的丰度相对稳定,其丰度在整个培养阶段(59 d)与未熏蒸处理无显著差异;相反在江西省酸性红壤中,棉隆持续抑制 *nifH*、*AOAamoA*、*napA*、*narG*、*nirK* 和 *nosZ*;且短暂(24 d)抑制 *AOBamoA*、*cnorB*、*qnorB* 和 *nirS*;同时,棉隆熏蒸后期显著促进部分氮循环功能基因 *nxrB*、*nirK*、*nirS* 和 *cnorB* 的丰度(Fang et al., 2018b)。高通量测序结果表明,棉隆熏蒸显著改变了土壤氮循环

相关细菌的群落结构(表3),如熏蒸前期会短暂降低固氮菌中的慢生根瘤菌属 *Bradyrhizobium* 和固氮弓菌属 *Azoarcus*、硝化细菌中的亚硝化单胞菌属 *Nitromonas*、反硝化细菌中的芽胞杆菌属和假单胞菌属 *Pseudomonas* 等细菌的丰度,熏蒸后期会增加固氮菌中的慢生根瘤属和根瘤菌属 *Rhizobium*、硝化细菌中的硝化螺菌属 *Nitrocellulose*、反硝化细菌中的芽胞杆菌属和黄杆菌属 *Flavobacterium* 等细菌的丰度(Fang et al., 2018b)。

表3 棉隆熏蒸消毒对土壤氮循环关键微生物的影响

Table 3 Response of key microorganisms involved in nitrogen cycle following dazomet fumigation

分类 Classify	属水平 Genus level	响应特征 Response characteristic
固氮细菌 Nitrogen-fixing bacteria	中慢生根瘤菌属 <i>Mesorhizobium</i>	熏蒸前期(24 d)降低 Decreased in the early fumigation period (24 d)
	固氮弓菌属 <i>Azoarcus</i>	熏蒸前期(24 d)降低 Decreased in the early fumigation period (24 d)
	类芽胞杆菌属 <i>Paenibacillus</i>	熏蒸前期(24 d)降低 Decreased in the early fumigation period (24 d)
	根瘤菌属 <i>Rhizobium</i>	熏蒸后 24~38 d 显著增加 Increased from 24 to 38 days
	慢生根瘤属 <i>Bradyrhizobium</i>	熏蒸后 24~38 d 显著增加 Increased from 24 to 38 days
	固氮螺菌属 <i>Azospirillum</i>	对棉隆不敏感 Insensitive to dazomet
硝化细菌 Nitrifying bacteria	念珠藻属 <i>Nostoc</i>	对棉隆不敏感 Insensitive to dazomet
	亚硝化螺菌属 <i>Nitrosospira</i>	熏蒸前期(24 d)增加 Increased in the early fumigation period (24 d)
	硝化螺菌属 <i>Nitrospira</i>	熏蒸后期(59 d)增加 Increased at post-fumigation (59 d)
	亚硝化单胞菌属 <i>Nitrosomonas</i>	熏蒸后期(38 d)减少 Decreased at post-fumigation (38 d)
反硝化细菌 Denitrifying bacteria	亚硝化球菌属 <i>Nitrosococcus</i>	对棉隆不敏感 Insensitive to dazomet
	芽胞杆菌属 <i>Bacillus</i>	熏蒸前期(24 d)短暂增加 Increased in the early fumigation period (24 d)
	黄杆菌属 <i>Flavobacterium</i>	熏蒸前期(24 d)短暂增加 Increased in the early fumigation period (24 d)
	链霉菌属 <i>Streptomyces</i>	持续增加(59 d) Increased during the 59 d incubation
	无氧芽胞杆菌属 <i>Anoxybacillus</i>	熏蒸前期(24 d)降低 Decreased in the early fumigation period (24 d)
	假单胞菌属 <i>Pseudomonas</i>	熏蒸前期(24 d)降低 Decreased in the early fumigation period (24 d)
	副单胞菌属 <i>Paracoccus</i>	熏蒸前期(24 d)降低 Decreased in the early fumigation period (24 d)
	贪铜菌属 <i>Cupriavidus</i>	熏蒸前期(24 d)降低 Decreased in the early fumigation period (24 d)
	鞘脂单胞菌属 <i>Sphingomonas</i>	熏蒸前期(24 d)降低 Decreased in the early fumigation period (24 d)
	剑菌属 <i>Ensifer</i>	对棉隆不敏感 Insensitive to dazomet
	分枝杆菌属 <i>Mycobacterium</i>	对棉隆不敏感 Insensitive to dazomet
	硫杆菌属 <i>Thiobacillus</i>	对棉隆不敏感 Insensitive to dazomet
	红球菌属 <i>Rhodococcus</i>	对棉隆不敏感 Insensitive to dazomet

表中数据收集自 Fang et al. (2018b)。Data collected from Fang et al. (2018b).

此外,棉隆熏蒸显著影响土壤线虫群落结构,如食细菌线虫和食真菌线虫数量在熏蒸后1周减至0,线虫总数在熏蒸后12周仍无法恢复;但真滑刃线虫属 *Aphelenchus* 线虫在棉隆熏蒸胁迫下相对稳定,表明熏蒸后期有利于真滑刃线虫属线虫的再定殖(Eo & Park, 2014)。

3 解决对策

3.1 改善施药方式

施药深度及均匀程度是影响棉隆熏蒸效果的重

要因素,而当前棉隆田间施用主要依靠人工撒施,药剂无法达到均匀分布,因此增加药剂分布均匀性,特别是20~40 cm 深层土壤中药剂的分布均匀性可有效提高熏蒸效果。如方文生等(2021)通过比较人工撒施+手扶式拖拉机与自走式精细旋耕机进行棉隆熏蒸的效果,发现人工手撒模式下棉隆主要分布在0~20 cm 土层,20~40 cm 深层土壤中检测不到MITC,导致对深层土壤中疫霉菌属及镰刀菌属的抑制率低于43%,熏蒸效果不理想;相反精细旋耕机则显著提高了深层土壤中MITC的含量,且对20~40 cm

土层病原菌的防效达90%~100%,可见自走式精细旋耕机能显著提高棉隆在土壤中的分布均匀性,进而提高了对深土层中病原菌的防效。

自走式精细旋耕机采用全封闭药箱和尾轮驱动、偏心旋耕轴设计,结合高速反转的合金专用刀具和双侧液压油缸,保障了施药量的精确性,药量误差小于1 kg/667 m²,翻土深度达30~40 cm。可有效解决人工撒药不均匀及传统旋耕机深度不达标等问题,大幅提高了作业效率,降低了劳动强度,同时确保了作业人员的安全。因此,改善施药方式、增加棉隆混土深度及分布均匀性可大幅提高熏蒸效果。

3.2 优化土壤环境

土壤温湿度是影响熏蒸效果的重要因素,如温度和湿度不仅影响棉隆的分解,而且也影响MITC的降解。若土壤湿度小、温度低,棉隆分解缓慢,导致残留的棉隆易对移栽作物产生药害问题。因此在田间施用棉隆时,必须确保适宜的土壤温湿度才能保证熏蒸效果,避免产生药害问题。如棉隆熏蒸前3~5 d进行大水漫灌使土壤保持湿润状态(田间持水量约70%),施用完棉隆后再滴灌3~5 h或表面浇透水,最后覆膜熏蒸(毛连纲,2015)。当在冬季低温条件下进行棉隆熏蒸时,除了保证土壤湿度外,将熏蒸时间延长2~3周也可提高熏蒸效果。

3.3 活化熏蒸后的土壤微生物

棉隆熏蒸会短暂干扰土壤微生物群落结构,向熏蒸后土壤中添加有机质可以促进土壤生物的恢复,如棉隆熏蒸土壤中添加豆粉和米糠后,在第6周微生物磷脂脂肪酸条带数显著增加,在第12周土壤线虫数量显著增加,而且线虫增加量持续到第42周(Eo & Park, 2014)。此外,添加生物炭、腐殖酸以及有益菌肥等均可加速熏蒸后土壤微生物的恢复,促进氮循环相关功能微生物及植物抗病相关微生物的再定殖(Cheng et al., 2020; Fang et al., 2020)。土壤熏蒸消毒可有效消除土壤病原菌,同时熏蒸后土壤微生物受到较大干扰,向土壤中添加有益菌群,引导根际微生物形成免疫屏障,可阻控致病菌的再次入侵,防止危害土壤及作物健康(Elad et al., 1982; 陈杰等, 2013)。

4 展望

无论是何种熏蒸剂,良好的施药技术及土壤条件都是获得最佳熏蒸效果的重要条件。特别是对棉隆来说,其熏蒸效率直接依赖土壤湿度,足够的土壤含水量是保证棉隆发挥药效的第一条件。当土壤湿

度较低时,棉隆向MITC的转换将延迟或停止,导致土壤中MITC有效杀菌浓度不足。熏蒸后期适当补充有机质或生物菌肥可促进土壤微生物的恢复及有益菌群的定殖,有利于形成根际屏障以阻控致病菌的再次入侵。因此,未来棉隆的发展应重点围绕以下几个方面开展。

第一,棉隆施药设备及施药技术的开发与升级。目前,国内棉隆的施用主要依靠手撒施药+小型旋耕机翻理方式,该施药方式存在施药不均匀、施药深度不够等许多不足。因此,研发、升级新型棉隆施药消毒一体机,使药剂均匀分布且能进入深层土壤是保障棉隆熏蒸效果的首要前提。

第二,加速棉隆或活性成分MITC新剂型的研发及应用。针对冬季低温条件下棉隆颗粒剂分解难的问题,研发适合低温环境应用的MITC新剂型。针对棉隆对线虫及部分病原真菌防效不足的问题,开发棉隆+杀线虫剂或棉隆+杀菌剂的组合新剂型,扩大棉隆防治谱。

第三,建立不同类型土壤中棉隆的应用技术及标准。棉隆分解成活性成分MITC的过程及MITC在土壤中的消解均受土壤类型、土壤温湿度和土壤改良剂等环境因子的影响,因此因地制宜制定特定类型土壤中棉隆的应用技术及标准,可最大程度保证棉隆的熏蒸效果。

第四,研发棉隆与其他杀菌或熏蒸剂的轮用技术。针对棉隆重复使用后MITC降解速率加快和熏蒸效果下降的问题,建议在棉隆熏蒸1~2次后,轮用其他熏蒸剂如氯化苦和二甲基二硫等进行土壤熏蒸消毒。因MITC的降解途径主要为微生物降解,与其他熏蒸剂轮用可以改变微生物群落,杀灭降解型微生物,延缓MITC的降解。

第五,研发棉隆熏蒸后高效土壤生态改良技术。由于熏蒸对土壤微生物造成较大干扰,在分离鉴定棉隆耐受型及敏感型微生物的基础上,探明熏蒸后期微生物的演替规律,包括细菌与真菌、致病菌与功能微生物间的演替次序及规律,开发高效土壤改良剂。

第六,研发棉隆与有益菌的联合使用技术。如木霉对棉隆熏蒸不敏感,且熏蒸后期可促进木霉的定殖。在分离及鉴定耐受棉隆胁迫的特异木霉基础上,将其开发为微生物菌剂。此外,将已有的木霉菌肥与棉隆熏蒸消毒联合使用,研发熏蒸剂与微生物菌剂联合使用技术。

参考文献 (References)

- Cao AC, Fang WS, Li Y, Yan DD, Wang QX, Guo MX, Huang B, Song ZX, Jin Q. 2022. Review on 60 years of soil fumigation and disinfection in China. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 325–335 (in Chinese) [曹焯程, 方文生, 李园, 颜冬冬, 王秋霞, 郭美霞, 黄斌, 宋兆欣, 靳茜. 2022. 我国土壤熏蒸消毒60年回顾. *植物保护学报*, 49(1): 325–335]
- Cao AC, Liu XM, Guo MX, Wang QX, Li Y, Ouyang CB, Yan DD. 2017. Incidences of soil-borne diseases and control measures. *Plant Protection*, 43(2): 6–16 (in Chinese) [曹焯程, 刘晓漫, 郭美霞, 王秋霞, 李园, 欧阳彬彬, 颜冬冬. 2017. 作物土传病害的危害及防治技术. *植物保护*, 43(2): 6–16]
- Cao AC, Wang JC. 2015. Principle and application of soil disinfection. Beijing: Science Press (in Chinese) [曹焯程, 王久臣. 2015. 土壤消毒原理与应用. 北京: 科学出版社]
- Chen J, Guo TW, Tang L, Tan XL, Zhu WB, Xue QH. 2013. The antagonism of *Penicillium griseofulvum* CF₃ against soil-borne fungal pathogens of potato and its growth promoting effect on the plant. *Journal of Plant Protection*, 40(4): 301–308 (in Chinese) [陈杰, 郭天文, 汤琳, 谭雪莲, 朱渭兵, 薛泉宏. 2013. 灰黄青霉 CF₃ 对马铃薯土传病原真菌的拮抗性及其促生作用. *植物保护学报*, 40(4): 301–308]
- Cheng H, Zhang D, Huang B, Song Z, Ren L, Hao B, Liu J, Zhu J, Fang W, Yan D, et al. 2020. Organic fertilizer improves soil fertility and restores the bacterial community after 1,3-dichloropropene fumigation. *Science of the Total Environment*, 738: 140345
- Di Primo P, Gamliel A, Austerweil M, Steiner B, Beniches M, Peretz-Alon I, Katan J. 2003. Accelerated degradation of metam-sodium and dazomet in soil: characterization and consequences for pathogen control. *Crop Protection*, 22(4): 635–646
- Dungan RS, Gan JY, Yates SR. 2003. Accelerated degradation of methyl isothiocyanate in soil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 142 (1/2/3/4): 299–310
- Elad Y, Chet I, Henis Y. 1982. Degradation of plant pathogenic fungi by *Trichoderma harzianum*. *Canadian Journal of Microbiology*, 28(7): 719–725
- Eo J, Park KC. 2014. Effects of dazomet on soil organisms and recolonisation of fumigated soil. *Pedobiologia*, 57(3): 147–154
- Fang WS, Cao AC, Yan DD, Han DW, Huang B, Li J, Liu XM, Guo MX, Wang QX. 2017. The effect of two types of biochars on the efficacy, emission, degradation, and adsorption of the fumigant methyl isothiocyanate. *Energies*, 10(1): 16
- Fang WS, Cao AC, Wang QX, Yan DD, Li Y, Jin X, Zhao QL, Qiu YK, Zhao HM. 2021. A new integrated soil disinfection machine improves the uniformity of dazomet in soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 54(12): 2570–2580 (in Chinese) [方文生, 曹焯程, 王秋霞, 颜冬冬, 李园, 靳茜, 赵奇龙, 仇耀康, 赵宏明. 2021. 新型土壤消毒一体机提高棉隆土壤分布均匀性. *中国农业科学*, 54 (12): 2570–2580]
- Fang WS, Song ZX, Tao S, Zhang DQ, Huang B, Ren LR, Cheng HY, Yan DD, Li Y, Cao AC, et al. 2020. Biochar mitigates the negative effect of chloropicrin fumigation on beneficial soil microorganisms. *Science of the Total Environment*, 738: 139880
- Fang WS, Wang QX, Han DW, Liu PF, Huang B, Yan DD, Ouyang CB, Li Y, Cao AC. 2016. The effects and mode of action of biochar on the degradation of methyl isothiocyanate in soil. *Science of the Total Environment*, 565: 339–345
- Fang WS, Wang QX, Yan DD, Huang B, Ren ZJ, Wang Q, Song ZX, Liu XM, Li Y, Ouyang CB, et al. 2018a. Environmental factors and soil amendment affect the decomposition rate of dazomet fumigant. *Journal of Environment Quality*, 47(5): 1223–1231
- Fang WS, Yan DD, Wang XL, Huang B, Wang X, Liu J, Liu XM, Li Y, Ouyang CB, Wang QX, et al. 2018b. Responses of nitrogen-cycling microorganisms to dazomet fumigation. *Frontiers in Microbiology*, 9: 2529
- Fraedrich SW. 1994. Soil fumigation in southern forest tree nurseries: current status and future needs for pest management. *Colloques De l'INRA: International Union of Forest Research Organization*, pp. 267–282
- Fraedrich SW, Dwinell LD. 2003. An evaluation of dazomet incorporation methods on soilborne organisms and pine seedling production in southern nurseries. *Southern Journal of Applied Forestry*, 27(1): 41–51
- Frick A, Zebarth BJ, Szeto SY. 1998. Behavior of the soil fumigant methyl isothiocyanate in repacked soil columns. *Journal of Environmental Quality*, 27(5): 1158–1169
- Fu CH, Hu BY, Chang TT, Hsueh KL, Hsu WT. 2012. Evaluation of dazomet as fumigant for the control of brown root rot disease. *Pest Management Science*, 68(7): 959–962
- Gan J, Papiernik SK, Yates SR, Jury WA. 1999. Temperature and moisture effects on fumigant degradation in soil. *Journal of Environmental Quality*, 28(5): 1436–1441
- Huang X, Zhao J, Zhou X, Zhang J, Cai Z. 2019. Differential responses of soil bacterial community and functional diversity to reductive soil disinfection and chemical soil disinfection. *Geoderma*, 348: 124–134
- Hussain M, Manasova M, Zouhar M, Ryšánek P. 2020. Comparative virulence assessment of different nematophagous fungi and chemicals against northern root-knot nematodes, *Meloidogyne hapla*, on carrots. *Pakistan Journal of Zoology*, 52(1): 199–206
- Hwang SF, Ahmed HU, Strelkov S, Zhou Q, Gossen BD, McDonald MR, Peng G, Turnbull GD. 2017. Suppression of clubroot by dazomet fumigant. *Canadian Journal of Plant Science*, 98(1): 172–182
- Jeffries MD, Gannon TW, Reynolds WC, Yelverton FH, Silcox CA. 2017. Herbicide applications and incorporation methods affect dazomet efficacy on bermudagrass. *HortTechnology*, 27(1): 24–29
- Jones D. 1974. Fungicidal effects of the fumigant dazomet on sclerotia of *Sclerotinia sclerotiorum* in soil. *Transactions of the British Mycological Society*, 63(2): 249–254
- Juzwik J, Stenlund DL, Allmaras R, Copeland SM, McRoberts RE. 1997. Incorporation of tracers and dazomet by rotary tillers and

- a spading machine. *Soil and Tillage Research*, 41: 237–248
- Kelsas BR, Campbell SJ. 1994. Influence of mechanical incorporation method on dazomet distribution in conifer nursery soil. *Tree Planters' Notes*, 45(2): 53–57
- Lin CM, Preston JF, Wei CI. 2000. Antibacterial mechanism of allyl isothiocyanate. *Journal of Food Protection*, 63(6): 727–734
- Mao LG. 2015. Toxicity evaluation of new fumigants and research on the application technology. PhD thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [毛连纲. 2015. 新型熏蒸剂的毒力评价及应用技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院]
- Mao LG, Jiang HY, Wang QX, Yan DD, Cao AC. 2017. Efficacy of soil fumigation with dazomet for controlling ginger bacterial wilt (*Ralstonia solanacearum*) in China. *Crop Protection*, 100: 111–116
- Mark GL, Cassells AC. 1999. The effect of dazomet and fosetyl-aluminium on indigenous and introduced arbuscular mycorrhizal fungi in commercial strawberry production. *Plant and Soil*, 209: 253–261
- Martin FN. 2003. Development of alternative strategies for management of soilborne pathogens currently controlled with methyl bromide. *Annual Review of Phytopathology*, 41: 325–350
- McGovern RJ, Vavrina CS, Noling JW, Datnoff LA, Yonce HD. 1998. Evaluation of application methods of metam sodium for management of *Fusarium* crown and root rot in tomato in southwest Florida. *Plant Disease*, 82(8): 919–923
- Nicola L, Turco E, Albanese D, Donati C, Thalheimer M, Pindo M, Insam H, Cavalieri D, Pertot I. 2017. Fumigation with dazomet modifies soil microbiota in apple orchards affected by replant disease. *Applied Soil Ecology*, 113: 71–79
- Park BS, Landschoot PJ. 2003. Effect of dazomet on annual bluegrass emergence and creeping bentgrass establishment in turf maintained as a golf course fairway. *Crop Science*, 43: 1387–1394
- Ridings WH, Schenck NC, Snell RR, Keen W, Cornell J. 1977. Reinvansion of methyl bromide treated soil by soil-borne fungi and their subsequent effect on citrus seedling growth. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 90: 70–74
- Robertson W, Boyle C. 1988. Endomycorrhizal status of certified strawberry nursery stock. *Journal of the American Society for Horticultural*, 113: 525–529
- Skroch WA. 1995. Dazomet, a methyl bromide alternative.//1995 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions. San Diego, California: Methyl Bromide Alternatives Outreach, pp. 50-1–50-2
- Smelt JH, Leistra M. 1974. Conversion of metham-sodium to methyl isothiocyanate and basic data on the behaviour of methyl isothiocyanate in soil. *Pest Management Science*, 5(4): 401–407
- Tian T, Li SD, Sun MH. 2014. Synergistic effect of dazomet soil fumigation and *Clonostachys rosea* against cucumber *Fusarium* wilt. *Phytopathology*, 104(12): 1314–1321
- Wang QX, Yan DD, Wang XL, Lü PX, Li XY, Cao AC. 2017. Research advances in soil fumigants. *Journal of Plant Protection*, 44(4): 529–543 (in Chinese) [王秋霞, 颜冬冬, 王献礼, 吕平香, 李雄亚, 曹焯程. 2017. 土壤熏蒸剂研究进展. 植物保护学报, 44(4): 529–543]
- Zheng W, Yates SR, Papiernik SK, Guo M. 2004. Effect of combined application of methyl isothiocyanate and chloropicrin on their transformation. *Journal of Environmental Quality*, 33(6): 2157–2164
- Zhu F, Xiao J, Zhang Y, Wei L, Liang Z. 2020. Dazomet application suppressed watermelon wilt by the altered soil microbial community. *Scientific Reports*, 10(1): 21668

(责任编辑:李美娟)