

生物熏蒸——环境友好型土壤熏蒸技术

张大琪¹, 颜冬冬^{1,2}, 方文生¹, 黄斌¹, 王献礼¹, 王晓宁¹, 李雄亚³,
王倩³, 靳茜⁴, 李园^{1,2}, 欧阳灿彬^{1,2}, 王秋霞^{1,2}, 曹勘程^{*,1,2}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193; 2. 现代农业产业技术体系北京市创新团队, 北京 100193;
3. 生态环境部对外合作与交流中心, 北京 100035; 4. 中国农业科学院植物保护研究所-保定学院
土壤修复联合中心, 河北保定 071000)

摘要: 根据“蒙特利尔议定书”要求, 防治土传病害效果优异的溴甲烷已于 2015 年全面退出农业领域 (除必要用途豁免外), 环境友好型的生物熏蒸技术作为最具发展前景的溴甲烷非化学替代措施而受到普遍关注。文章主要综述了生物熏蒸的作用机理: 产生挥发性活性物质及提高土壤温度; 介绍了生物熏蒸对腐霉菌、疫霉菌、尖孢镰刀菌等土传病害以及线虫的防治作用; 同时阐述了生物熏蒸对土壤中氮 (N)、磷 (P)、钾 (K)、pH 值等土壤理化性质以及作物生长指标和产量的影响, 阐明了生物熏蒸材料的选择以及施用熏蒸材料时的环境条件是影响生物熏蒸效果的两个主要因素。作者认为, 由于受生物熏蒸材料自身的限制, 目前将生物熏蒸技术与其他技术相结合, 如生物熏蒸与化学熏蒸轮用等, 依然具有广阔的研究应用前景。

关键词: 土壤熏蒸; 生物熏蒸; 土传病害; 溴甲烷; 环境友好; 微生物群落结构; 作物产量

中图分类号: S 482.6; S472 文献标志码: A 文章编号: 1008-7303(2020)01-0011-08

Biofumigation—an environment-friendly soil fumigation technology

ZHANG Daqi¹, YAN Dongdong^{1,2}, FANG Wensheng¹, HUANG Bin¹, WANG Xianli¹,
WANG Xiaoning¹, LI Xiongya³, WANG Qian³, JIN Xi⁴, LI Yuan^{1,2},
OUYANG Canbin^{1,2}, WANG Qiuxia^{1,2}, CAO Aocheng^{*,1,2}

(1. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Beijing Innovation Consortium of Agriculture Research System, Beijing 100193, China; 3. FECO, Foreign Environmental Cooperation Center, Beijing 100135, China;
4. IPPCAAS-BU Joint Research Centre for Soil Remediation, Baoding University, Baoding 071000, Hebei Province, China)

Abstract: According to the requirements of the "Montreal Protocol", methyl bromide (MB), which has an excellent effect on the soil-borne diseases, has been phased out completely from agriculture (except for critical use exemptions) in 2015. Thereafter, environmenta-friendly biofumigation technology has received widespread attention as the most promising non-chemical alternative to MB. Recent mechanism studies of biofumigation was summarized in this review, including the production of volatile active substances and the increase of the soil temperature. The inhibitory effects of biofumigation on soil-borne pests and diseases such as *Pythium*, *Phytophthora*, *Fusarium oxysporum* and nematodes were also reviewed. At the same time, the effects of biofumigation on soil physico-chemical properties, such

收稿日期: 2019-05-18; 录用日期: 2019-07-30.

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0201600); 国家自然科学基金 (41601267).

作者简介: 张大琪, 女, 硕士研究生, E-mail: 1275745493@qq.com; *曹勘程, 通信作者 (Author for correspondence), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤熏蒸剂应用技术研究, E-mail: caoac@vip.sina.com

as nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) and pH, crop growth indicators and yields were also summarized. In general, the choice of biofumigation materials and the environmental conditions while applying the fumigated materials were two main factors which affected the performance of biofumigation. Due to the limitations of biofumigant materials, the combination of biofumigation technology and other technologies, like chemical fumigation, would still be of great application potential and a hot research field.

Keywords: soil fumigation; biofumigation; soil-borne disease; methyl bromide; environment-friendly; microbial community structure; crop yield

随着国际贸易往来的日益频繁,许多高附加值的作物,如番茄、草莓、黄瓜、青椒、烟草和生姜等的销量与日俱增,巨大的经济利益导致这些作物的种植面积急剧增加。在人类的参与下,许多季节性作物实现了反季节生长:夏季在田间生长,冬季则被转移到温室或塑料大棚内种植。而大棚内高温高湿的环境为土壤中的病原菌和害虫提供了良好的生存环境;另一方面,作物连作也使得土传病原菌的数量不断增加,严重危害作物生长,降低作物的产量,有些病虫害高发地块甚至绝收^[1]。为了挽回经济损失,农民往往使用大量高毒农药进行病虫害防治,从而导致农药残留问题频发。

目前,土壤熏蒸是一种防治土传病虫害,如细菌、真菌、线虫及杂草等最直接、快速和有效的方法。土壤熏蒸可以解决土壤重茬问题,促进作物生长,提高产量^[2-3]及解决农药残留问题^[4-5]。用途广泛且防治谱广的溴甲烷(methyl bromide, MB)自19世纪40年代应用以来,一直被认为是有效防治土传病害的重要土壤熏蒸剂^[6]。但后来研究人员发现,MB对臭氧层具有显著的破坏作用,可造成“臭氧空洞”^[7-8]。根据《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》做出的“2015年全面禁止溴甲烷在农业领域应用(必要用途豁免除外)”^[9-10]的决定,多种溴甲烷的化学替代品开始被研发及投入应用,其中,化学熏蒸剂氯化苦(chloropicrin, CP)^[11]、1,3-二氯乙烯(1,3-dichloropropene, 1,3-D)^[12]、棉隆(dazomet, DZ)^[12]、威百亩(metam-sodium, MS)^[13]、二甲基二硫(dimethyl disulfide, DMDS)^[14]以及它们的混合制剂CP+DMDS^[15]、DZ+1,3-D^[12]、CP+MS+1,3-D^[16]等都被广泛应用于农业生产中。

化学熏蒸对土传病害、杂草及线虫均具有较好的防治效果,并能增加作物产量^[17],但长期使

用化学熏蒸剂也会对土壤及周围环境产生不利影响。笔者等^[18]的研究表明,常年使用氯化苦熏蒸会降低土壤中细菌与真菌群落的多样性;Collins等^[19]发现,威百亩对土壤微生物种群数量,包括非植物寄生性线虫均有显著影响,而且能减弱如碳、氮矿化等重要的土壤转化过程;方文生等^[20-21]研究发现,化学熏蒸剂在使用过程中会刺激温室气体如氧化亚氮(N₂O)的排放。此外,随着中国“化肥农药双减”政策的实施,化学熏蒸剂的用量也受到了控制。因此,在寻找环境友好并能减少化学熏蒸剂用量的溴甲烷替代技术的过程中,生物熏蒸逐渐进入了农业科研人员的视野。

1 生物熏蒸的方法与类型

生物熏蒸是一种天然、环保、具有较好应用前景的溴甲烷熏蒸替代措施,通常指通过分解植物代谢物而产生挥发性气体,从而抑制或杀死土传病虫害的土壤熏蒸方法^[22]。常被用作生物熏蒸材料的有甘蓝、芥菜、油菜及花椰菜等芸薹属植物,这些植物可作为轮作或间作作物以控制土传病害。Subbarao等^[23]的研究表明,将草莓与芸薹属植物如西兰花轮作,可有效控制草莓黄萎病致病菌大丽轮枝菌 *Verticillium dahliae* 的菌群数量。此外,生物熏蒸材料还可作为绿肥或与绿肥结合使用。Larkin等^[22]发现,芥菜绿肥对普通疮痂病致病菌疮痂链霉菌 *Streptomyces scabies* 有较好的防治效果。Mojtahedi等^[24]发现,将油菜 *Brassica napus* 与小麦绿肥结合使用,能够有效防治根结线虫,并且显著提高了马铃薯的产量。生物熏蒸材料加工后的副产物也可作为土壤熏蒸剂使用,油菜籽或芥菜籽压榨后产生的油饼或种子粉可作为高附加值园艺作物的土壤改良剂^[17],菜籽粕能有效抑制引起苹果再植病害的病原菌立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani* 和穿刺短体线虫

Pratylenchus penetrans^[25] 的数量。

此外, 农业废弃物和家畜粪便也可作为生物熏蒸材料, 用于防治土传病害, 提高作物产量^[1, 26]。根据笔者等从事的家畜粪便生物熏蒸试验经验, 每年的 7—8 月份为最佳熏蒸时间, 熏蒸时长为 20—30 d。将新鲜家畜粪便与土壤混合后, 灌溉适量水以利于粪便在高温下发酵, 立即覆盖聚氯乙烯

烯膜, 防止熏蒸材料产生的有效气体成分散失, 并保证气体在膜下的累积量达到致死剂量 (图 1); 或于下茬作物种植前在土壤中播种芸薹属植物的种子, 待其长到距离下茬作物栽种期 40 d 左右时浇灌足量的水, 将植物与土壤一同粉碎、混合, 立即覆盖聚氯乙烯膜, 待其发酵^[1]。以上两种生物熏蒸方法揭膜后均需敞气 7 d 左右, 再种植下茬作物。



图 1 新鲜家畜粪便与土壤混合后立即用聚氯乙烯膜覆盖

Fig. 1 Fresh livestock manure was mixed with soil and immediately covered with polyethylene film

2 生物熏蒸作用机理

2.1 生物熏蒸材料代谢产生挥发性活性物质

芸薹属植物组织中富含硫代葡萄糖苷类物质 (glucosinolates, GSLs), 常见的 GSLs 大约有 132 种^[27]。当芸薹属植物组织在收获后或遇害虫侵袭而遭到破坏时, 在水分的参与下, 其 GSLs 被植物体内同一器官不同细胞内的黑芥子酶水解, 水解产物主要为噻唑硫酮、腈、硫氰酸盐和各种形式的异硫氰酸酯 (ITCs)^[28] (图 2), 其中具有生物活性的为 ITCs, 其侧链结构由母体 GSLs 和环境条件共同决定^[29]。ITCs 熔点较低, 有刺激性气味, 对病原菌、杂草及线虫均具有较好的防治效果, 并能提高作物产量^[30]。以异硫氰酸甲酯 (MITC) 为有效成分的威百亩和棉隆, 以及以异硫氰酸烯丙酯

(AITC) 为有效成分的辣根素等均已被应用到农业生产中。

2.2 提高土壤温度

一些熏蒸材料在熏蒸过程中会通过发酵而产生热量, 导致土层温度高于土壤中病原菌及害虫的适宜生存温度, 从而达到抑制病原菌和土传害虫数量的目的^[31]。2008 年, Abdel-Sattar 等^[32]发现, 在草莓栽培期间, 经稻秆处理 (将稻秆粉碎后与土壤混合, 并迅速覆盖塑料薄膜) 过的地块土层温度比对照区高 2~5 °C, 且草莓植株在该处理地块长势良好。Ghonaime 等^[26, 33]的研究表明, 经鲜牛粪、鸡粪和芸薹属植物熏蒸处理 3 d 后, 土壤温度可大幅上升至 50 °C 以上, 并且在熏蒸后 20 d 内土壤温度依然维持在较高水平。Riad 等^[34]在研究将稻秆作为甲基溴替代品用于生菜田块熏蒸处

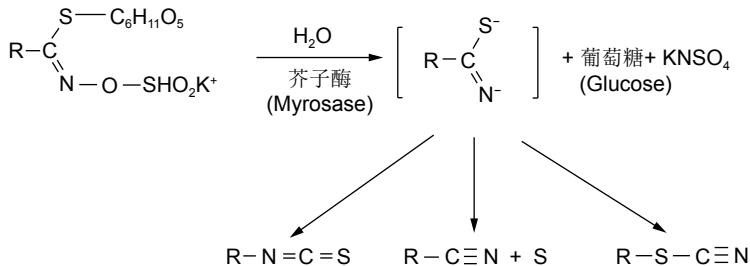


图 2 GSLs 水解过程及其产物

Fig. 2 Hydrolysis process of GSLs and its products

理时,发现稻秆处理区域 20 cm 深处的土层温度比对照区高约 2~3 °C, 10 d 后才与对照区土层温度无显著差异。此外,有研究表明,家畜粪便中含有丰富的氮,在分解、发酵过程中能产生氨及其他挥发性气体,可显著抑制病原菌的数量^[1],但具体的抑菌活性气体成分还有待进一步研究明确。

3 生物熏蒸对土传病害及土壤微生物的影响

3.1 抑制土传病害的发生

自 1994 年 Angus 等^[35]发现油菜和印度芥菜根组织能够抑制小麦全蚀病致病茵禾顶囊壳小麦变种 *Gaeumannomyces graminis* (Sacc.) Arx and Oliver var. *Triticici*, Ggt 的生长,并把这种处理方式称为生物熏蒸 (biofumigation) 以来,生物熏蒸对土传病害作用的研究越来越受到农业领域科研人员的重视。腐霉菌 *Pythium aphanidermatum* 是引起果树再植病害的主要病原菌,Weerakoon 等^[36]发现,使用棉籽粕熏蒸处理能显著抑制腐霉菌的数量,降低果树发病率。Wang 等^[37]采用菜籽粉作为生物熏蒸材料时,发现辣椒疫霉 *Phytophthora capsici* 的数量受到显著抑制,并可使辣椒疫霉病的发病率显著降低。Prasad 等^[38]发现,芸薹属植物所产生的挥发性物质对尖孢镰刀菌 *Fusarium oxysporum* 的室内抑制作用较强,用其熏蒸后能显著减少尖孢镰刀菌的数量。Handiseni 等^[39]的研究表明,生物熏蒸对水稻纹枯病致病茵立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani* 的活力、侵染力以及菌核的形成均具有较好的抑制作用。王德江等^[40]研究发现,采用芥菜熏蒸处理后,黄瓜枯萎病 (cucumber *Fusarium wilt*) 的发病率降低了 75%,且防治效果可达 52.9%。李淑敏等^[41]发现,采用生物熏蒸处理可降低茄子黄萎病 (eggplant *Verticillium wilt*) 的发病率和病情指数。此外,根结线虫 *Meloidogyne* 也是造成作物产量和品质下降的重要原因之一,利用生物熏蒸防控根结线虫的研究也常被报道。Curto 等^[42]的研究表明,芸薹属植物对根结线虫有较好的防治效果。Salem 等^[43]通过室内试验,将土壤与粉碎后的芥菜 *Sinapis nigra* 植株混合,并立即覆盖塑料薄膜以防止植株水解产生的 ITCs 挥发,显著降低了线虫卵的孵化率以及幼虫的存活率。Henderson 等^[44]报道,埃塞俄比亚芥菜 *Brassica carinata* 籽粕能够有效控制马铃薯地块中的哥伦比亚根结线虫 *Meloidogyne chitwoodi*。

3.2 改变土壤微生物群落结构

土壤微生物是土壤中最活跃的肥力因子之一^[45],它们直接或间接地参与土壤活动,与其他成分一同组成土壤生态系统,在土壤形成、物质转化、能量传递以及肥力保持等过程中担当着重要的角色,是土壤是否具有生命力的重要指标之一^[46]。此外,土壤微生物与植物生长发育也存在着错综复杂的关系。由于熏蒸是将药剂直接施用到土壤中,因此在对土传病害发挥药效的同时对土壤中微生物也必然会产生一定的影响。生物熏蒸材料虽来源于自然界,但在熏蒸过程中所产生的 ITCs 等化学物质同样会对土壤微生物产生影响。Hu 等^[47]的研究表明,ITCs 能显著改变土壤真菌群落结构组成,但对土壤细菌群落结构影响却较小。Weerakoon 等^[36]发现,使用棉籽粕熏蒸处理土壤后,在抑制腐霉菌数量的同时也能改变其真菌群落结构,并证明生物熏蒸对病原菌的抑制作用与生物群落的变化有关。同时 Yim 等^[48]也证明,生物熏蒸对土壤中真菌群落的影响大于对细菌群落的影响,且土壤微生物群落结构的改变是促进苹果生长的因素之一。刘昕昕等^[49]研究发现,采用不同生物材料熏蒸均能显著增加土壤中细菌的种类,提高细菌群落结构的多样性;而不同生物熏蒸处理对土壤中真菌群落多样性的影响则不同:芜菁熏蒸处理能够减少真菌的数量,降低真菌群落多样性,高硫芥菜熏蒸则可显著提高土壤真菌群落的多样性。Omirou 等^[50]研究发现,与威百亩相比,生物熏蒸显著改变了土壤中子囊菌的群落结构,但这种改变是较为短暂的。

4 生物熏蒸对土壤理化性质及作物生长的影响

生物熏蒸材料在土壤中的分解及发酵过程除可起到防治土传病害的作用外,由于其分解所产生的物质含有丰富的营养成分,施入土壤中必然还会引起土壤各理化指标的改变。Mbagwu^[51]和 Obi 等^[52]的研究表明,将畜禽粪便施入到耕地中可改善土壤理化性质,增加土壤有机碳和全氮的含量。Siddiquee 等^[53]采用油椰子空果束 (empty fruit bunches) 作为堆肥材料对土壤进行处理后,发现供试土壤由原来的微酸性变成了碱性,且两种不同形式的堆肥处理分别使土壤中的电导率比对照增加了 25.65% 和 4.96%,同时土壤中的 C:N

比值以及 N、P、K 的含量均高于对照组。Wang 等^[37] 的研究表明, 生物熏蒸显著增加了土壤中硝态氮 (NO_3^- -N)、有效磷 (P) 和有效钾 (K) 的含量, 但铵态氮 (NH_4^+ -N) 和溶解有机氮的含量却有所降低, 对土壤 pH 值则无显著影响。Cai 等^[54] 发现, 猪的粪便能够显著提高酸性红土的 pH 值以及 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的含量。Agbede 等^[55] 在同一试验地进行了 3 年施用家禽粪便的研究, 结果表明, 采用家禽粪便熏蒸降低了土壤容重, 提高了土壤空隙度和水分含量, 同时还显著提高了土壤中有有机质以及 N、P、K、Ca 和 Mg 的含量。

在农业生态系统中, 土壤肥力和作物生长密切相关, 土壤理化性质、养分含量等因素的变化直接关系到作物的生长及产量。经生物熏蒸处理后, 土壤肥力以及有机质含量均得到提高, 对作物的生长、产量和品质均有着极大的促进作用。Obi 等^[52] 研究了鸡粪对蔬菜和玉米生产性能的影响, 结果表明, 随着鸡粪用量的增加, 蔬菜和玉米的生长和产量参数显著提高。王德江等^[40] 的研究表明, 经小花叶芥菜 *Brassica juncea* 和红圆茼蒿 *Brassica rapa* 熏蒸处理后, 黄瓜果实中的维生素 C、可溶性糖及可溶性固形物的含量均显著增加, 并且黄瓜产量分别提高至对照处理的 1.81 和 1.56 倍。Ghonomie 等^[26] 在生菜生长期使用新鲜牛粪、鸡粪和芸薹属植物作为生物熏蒸材料, 发现生物熏蒸后生菜幼苗存活率均可达到 85% 以上, 显著高于对照组, 并且生菜的茎长、茎粗、干重、鲜重以及总产量都显著高于对照处理, 除此之外, 生菜中的叶绿素和可溶性固形物含量也均有提高。王晓芳等^[56] 使用万寿菊作为熏蒸材料, 发现其对平邑甜茶 *Malus hupehensis* Rehd. 幼苗生物量和根系生长均具有促进作用。Agbede 等^[55] 发现, 施用家禽粪便增加了高粱叶片中 N、P、K、Ca 和 Mg 的含量, 且株高、叶面积、茎围、根重以及地上部和籽粒产量均显著提高, 平均籽粒产量比对照提高了 39%。

5 影响生物熏蒸效果的因素

5.1 熏蒸材料的选择

植物源生物熏蒸材料中, 芸薹属植物的熏蒸效果优于非芸薹属植物。范成明等^[57] 发现, 非芸薹属植物芹菜、大葱对黄瓜腐霉菌 *Pythium aphanidermatum* 和棉花枯萎病菌 *Fusarium*

oxysporum 的防治效果显著低于芸薹属植物甘蓝和花椰菜。在芸薹属植物中, 起熏蒸作用的物质为硫代葡萄糖苷 (GSLs) 水解后产生的异硫氰酸酯 (ITCs), 而不同芸薹属植物中 GSLs 的类型与含量决定了其所释放的 ITCs 的类型与含量, 并因而决定着生物熏蒸的整体效果^[58]。例如, 甘蓝型油菜 *Brassica napus* 主要含有不产生 ITCs 的吲哚硫代葡萄糖苷 (indolyl-3-carbinol), 而芥菜型油菜 *Brassica juncea* 和芥子 *Sinapis alba* 则分别产生脂肪族和芳香族硫代葡萄糖苷^[59]。李淑敏等^[41] 也发现, “小花英”芥菜、“二道眉”芥菜、“九头鸟”雪里红及“沃冠二号”油菜 4 种芸薹属植物中, “沃冠二号”油菜处理区大丽轮枝菌的数量显著高于其他处理, 其原因可能是因为油菜植物组织内 GSLs 的含量较低, 因而对大丽轮枝菌无明显抑制效果。另外, 在选择植物熏蒸材料时还要考虑其种植时期、生长阶段及部位。据报道, 春季生长的熏蒸植物中 GSLs 的含量高于秋季生长的熏蒸植物^[58]。而 Bellostas 等^[60] 的研究表明, 与其他生长阶段相比, 植物幼苗中 GSLs 的浓度较低。Doheny-Adams 等^[61] 发现, 植物熏蒸材料在 50% 开花期时具有最高的 ITCs 释放潜力, 因而具有较好的熏蒸效果。Kirkegaard 等^[59] 的研究表明, 植物根部具有较高的 GSLs 含量, 平均可占植物中全部 GSLs 含量的 23.6%。

同样, 施用不同的家畜粪便所产生的熏蒸效果也有差异。Ghonomie 等^[33] 研究发现, 采用新鲜鸡粪熏蒸处理后, 甜瓜的肉厚、可溶性固形物含量、pH 值和可滴定酸含量均高于新鲜牛粪处理区。Ghonomie 等^[26] 的研究表明, 新鲜鸡粪在增加莴苣茎粗、长度和产量方面均显著优于新鲜牛粪处理, 但对于莴苣叶片中叶绿素含量和果实中可溶性固形物含量的增加, 两者却未表现出显著差异。

5.2 熏蒸材料所处的环境条件

环境条件对生物熏蒸效果影响也很大, 特别是土壤含水量、有机质含量以及环境温度。已有研究报道, 在含水量较高且温度达到 30 °C 以上的土壤中, ITCs 的降解速率会加快。同时, 由于土壤中的有机质会吸附 ITCs, 使其失去活性, 因此在有机质含量较高的土壤中, ITCs 的熏蒸活性显著低于有机质较少的贫瘠土壤^[62]。此外, GSLs 的含量也会受到栽培季节和温度的影响。Sarwar 等^[63] 分别进行了春、秋两季的田间试验以及不同温度

下的盆栽试验,结果表明,春季/室温(20℃)条件下栽种的甘蓝,其根和茎中的GSLs浓度均高于秋季/温室(12℃)栽种的甘蓝。除此之外,土壤pH值也是影响熏蒸效果的主要因素之一。Zurera等^[64]的研究表明,土壤pH值为4时,芥菜对仙人掌疫霉病菌 *Phytophthora cactorum* 和大丽叶黄萎病菌 *Verticillium dahlia* 的抑制作用较强,而pH值为10时,甘蓝 *Brassica carinata* 对这两种病原菌则表现出较好的熏蒸效果。由于温度是影响家畜粪便中微生物活性与发酵的重要因素,因此,家畜粪便的熏蒸效果对环境条件如温度的变化也较为敏感,环境温度升高可使发酵体系温度快速达到50℃以上,从而有效杀灭土壤中的病原菌^[65]。

6 研究展望

生物熏蒸作为最具潜力的溴甲烷非化学替代技术,已于2010年被写入“溴甲烷技术选择委员会”(MBTOC)报告中^[66]。生物熏蒸措施在有效防治土传病害、改善化学熏蒸剂对土壤环境不利影响的同时,还能降低种植成本,增加农民收入,因此颇受研究者的关注。但笔者等在中国河北省满城县段旺村草莓试验田开展的生物熏蒸试验却发现:同一试验田进行3年以上的鲜鸡粪生物熏蒸处理后,草莓产量反而显著下降,同时开花时间出现延迟,具体原因尚不清楚。此外,由于植物类生物熏蒸材料从播种到收获应用通常需要较长的一段时间,而中国耕地面积少且作物普遍实行连作,因此,生物熏蒸技术目前尚难以得到普及应用。

由此,笔者认为,在寻找既能减少化学熏蒸剂用量,又能保证熏蒸效果的生物熏蒸材料时,应考虑选择种植期短且富含高浓度GSLs的植物或熏蒸效果较好的家畜粪便,或将生物熏蒸材料与其他病害防治措施相结合,以便充分利用生物熏蒸的抑制作用杀灭土传病虫害,减少化学农药的使用。此外,还可尝试将化学熏蒸与生物熏蒸措施轮用,并深入探明这种新的熏蒸模式在减少化学熏蒸剂用量、防控土传病虫害及保证农业可持续发展方面的作用。

参考文献 (References):

[1] 曹塄程, 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.

- CAO A C, LIU X M, GUO M X, et al. Incidences of soil-borne diseases and control measures[J]. *Plant Prot*, 2017, 43(2): 6-16.
- [2] MAO L G, WANG Q X, YAN D D, et al. Evaluation of chloropicrin as a soil fumigant against *Ralstonia solanacearum* in ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) production in China[J]. *PLoS One*, 2014, 9(3): e91767.
- [3] REDDY P P. Recent advances in crop protection[J]. Springer Berlin, 2013, 116(4): 1-268.
- [4] 王玉涛, 王文博, 郭栋梁, 等. 氯化苦在土壤中的消解动态和残留量检测研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(18): 8651-8652.
- WANG Y T, WANG W B, GUO D L, et al. Study on degradation dynamics and residues detection of chloropicrin in soil[J]. *J Anhui Agric Sci*, 2009, 37(18): 8651-8652.
- [5] HAN D W, YAN D D, WANG Q X, et al. Effects of soil type, temperature, moisture, application dose, fertilizer, and organic amendments on chemical properties and biodegradation of dimethyl disulfide in soil[J]. *Land Degrad Dev*, 2018, 29(12): 4282-4290.
- [6] 曹塄程, 王久臣. 土壤消毒原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- CAO A C, WANG J C. Principle and application of soil disinfection[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [7] PRATHER M J, WATSON R T. Stratospheric ozone depletion and future levels of atmospheric chlorine and bromine[J]. *Nature*, 1990, 344(6268): 729-734.
- [8] RISTAINO J B, THOMAS W. Agriculture, methyl bromide, and the ozone hole: can we fill the gaps[J]. *Plant Dis*, 1997, 81(9): 964-977.
- [9] 曹塄程. 用于土壤消毒的甲基溴化学替代品[J]. *世界农业*, 2000(7): 26-27.
- CAO A C. Chemical alternatives to methyl bromide for soil disinfection[J]. *World Agric*, 2000(7): 26-27.
- [10] 王秋霞, 颜冬冬, 王献礼, 等. 土壤熏蒸剂研究进展[J]. *植物保护学报*, 2017, 44(4): 529-543.
- WANG Q X, YAN D D, WANG X L, et al. Research advances in soil fumigants[J]. *J Plant Prot*, 2017, 44(4): 529-543.
- [11] 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]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(20): 5023-5027.
- [12] 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 Manag Sci*, 2012, 68(4): 602-609.
- [13] GIANNAKOU I O, ANASTASIADIS I. Evaluation of chemical strategies as alternatives to methyl bromide for the control of root-knot nematodes in greenhouse cultivated crops[J]. *Crop Prot*, 2005, 24(6): 499-506.
- [14] LÓPEZ-ARANDA J M, MIRANDA L, MEDINA J J, et al. Methyl bromide alternatives for high tunnel strawberry production in southern Spain[J]. *HortTechnology*, 2009, 19(1): 187-192.
- [15] UNEP. Report of the methyl bromide technical options committee, in 2010 assessment[R]. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 2010: 101-158.
- [16] DESAEGER J A, SEEBOLD K W, CSINOS A S. Effect of application timing and method on efficacy and phytotoxicity of 1, 3-D, chloropicrin and metam-sodium combinations in squash plasticulture[J]. *Pest Manag Sci*, 2008, 64(3): 230-238.
- [17] REDDY P P. Biofumigation[M]//Recent advances in crop protection. New Delhi: Springer India, 2012: 37-60. DOI: 10.1007/978-81-322-

- 0723-8_4.
- [18] 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]. *Sci Total Environ*, 2019, 675: 615-622.
- [19] COLLINS H P, ALVA A, BOYDSTON R A, et al. Soil microbial, fungal, and nematode responses to soil fumigation and cover crops under potato production[J]. *Biol Fertil Soils*, 2006, 42(3): 247-257.
- [20] FANG W S, YAN D D, WANG X L, et al. Evidences of N₂O emissions in chloropicrin-fumigated soil[J]. *J Agric Food Chem*, 2018a, 66(44): 11580-11591.
- [21] FANG W S, YAN D D, WANG X L, et al. Responses of nitrogen-cycling microorganisms to Dazomet fumigation[J]. *Front Microbiol*, 2018b, 9: 2529.
- [22] LARKIN R P, GRIFFIN T S. Control of soilborne potato diseases using Brassica green manures[J]. *Crop Prot*, 2007, 26(7): 1067-1077.
- [23] SUBBARAO K V, KABIR Z, MARTIN F N, et al. Management of soilborne diseases in strawberry using vegetable rotations[J]. *Plant Dis*, 2007, 91(8): 964-972.
- [24] MOITAHEDI H. Managing *Meloidogyne chitwoodi* on potato with rapeseed as green manure[J]. *Plant Dis*, 1993, 77(1): 42.
- [25] MAZZOLA M, GRANATSTEIN D M, ELFVING D C, et al. Suppression of specific apple root pathogens by *Brassica napus* seed meal amendment regardless of glucosinolate content[J]. *Phytopathology*, 2001, 91(7): 673-679.
- [26] GHONAME A A, RIAD G S, EL-BASSIONYA M M, et al. Biofumigation with fresh manure or Brassicaceae residuals could be a promising methyl bromide alternative in head lettuce production[J]. *Gesunde Pflanzen*, 2017, 69(1): 29-37.
- [27] NEUBAUER C, HEITRMANN B, MÜLLER C. Biofumigation potential of Brassicaceae cultivars to *Verticillium dahliae*[J]. *Eur J Plant Pathol*, 2014, 140(2): 341-352.
- [28] 王庆仁. 油菜硫磺的农业生态学意义与研究进展[J]. *生态农业研究*, 1998, 6(3): 17-20.
- WANG Q R. Agro-ecological importance and research progresses of rape seed glucosinolates[J]. *Eco-Agriculture Research*, 1998, 6(3): 17-20.
- [29] ROSA E A S, HEANEY R K, FENWICK G R, et al. Glucosinolates in crop plants[J]. *Horticultural Review*, 2010: 99-215.
- [30] RIGA E, MOJTAHEDI H, INGHAM R E, et al. Green manure amendments and management of root-knot nematodes on potato in the Pacific Northwest of USA[J]. *Nematology Monographs and Perspectives*, 2004(2): 151-158.
- [31] REES H W, CHOW T L, ZEBARTH B, et al. Impact of supplemental poultry manure application on potato yield and soil properties on a loam soil in North-Western New Brunswick[J]. *Can J Soil Sci*, 2014, 94(1): 49-65.
- [32] ABDET-SATTAR M, EL-MARZOKY H, MOHAMED A. Occurrence of soilborne diseases and root knot *Nematodes* in strawberry plants grown on compacted rice straw bales compared with naturally infested soils[J]. *J Plant Prot Res*, 2008, 48(2): 223-234.
- [33] GHONAME A A, RIAD G S, EL-BASSIONYA M M, et al. Finding natural alternatives to methyl bromide in green house cantaloupe for yield, quality and disease control[J]. *Int J Chem Tech Res*, 2015, 8(9): 84-92.
- [34] RIAD G S, GHONAME A A, HEGAZI A M, et al. Cultivation in rice straw and other natural treatments as an eco-friendly methyl bromide alternative in head lettuce production[J]. *Gesunde Pflanzen*, 2017, 69(1): 21-28.
- [35] ANGUS J F, GARDNER P A, KIRKEGAARD J A, et al. Biofumigation: isothiocyanates released from *Brassica* roots inhibit growth of the take-all fungus[J]. *Plant Soil*, 1994, 162(1): 107-112.
- [36] WEERAKOON D M N, REARDON C L, PAULITZ T C, et al. Long-term suppression of *Pythium abappressorium* induced by *Brassica juncea* seed meal amendment is biologically mediated[J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, 51: 44-52.
- [37] WANG Q J, 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 J Microbiol Biotechnol*, 2014, 30(2): 507-518.
- [38] PRASAD P, KUMAR J. Management of *Fusarium* wilt of chickpea using brassicas as biofumigants[J]. *Legum Res-Int J*, 2017(40): 178-182.
- [39] HANDISENI M, ZHOU X G, JO Y K. Soil amended with *Brassica juncea* plant tissue reduces sclerotia formation, viability and aggressiveness of *Rhizoctonia solani* AG1-1A towards rice[J]. *Crop Prot*, 2017, 100: 77-80.
- [40] 王德江, 杨自超, 乔世佳, 等. 生物熏蒸对黄瓜枯萎病抑制及品质和产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(28): 125-130.
- WANG D J, YANG Z C, QIAO S J, et al. Effects of bio fumigation on inhibition of cucumber *Fusarium* wilt, quality and yield of cucumber[J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2016, 32(28): 125-130.
- [41] 李淑敏, 郑成或, 张润芝, 等. 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.
- LI S M, ZHENG C Y, ZHANG R Z, et al. Effect of biofumigation on yield and *Verticillium* wilt incidence of continuous eggplant in greenhouse[J]. *J Northeast Agric Univ*, 2017, 48(5): 35-41.
- [42] CURTO G, DALLAVALLE E, MATTEO R, et al. Biofumigant effect of new defatted seed meals against the southern root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*[J]. *Ann Appl Biol*, 2016, 169(1): 17-26.
- [43] SALEM M F, MAHDY M E. Suppression of root-knot nematode through innovative mustard biofumigation[J]. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 2015, 3(2): 41-50.
- [44] HENDERSON D R, RIGA E, RAMIREZ R A, et al. Mustard biofumigation disrupts biological control by *Steinernema* spp. *Nematodes* in the soil[J]. *Biol Control*, 2009, 48(3): 316-322.
- [45] 李鑫, 张秀丽, 孙冰玉, 等. 烤烟连作对耕层土壤酶活性及微生物区系的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(3): 456-460.
- LI X, ZHANG X L, SUN B Y, et al. Effects of continuous cropping in flue-cured tobacco on soil enzyme activities and microbial flora in arable layers of soils[J]. *Soils*, 2012, 44(3): 456-460.
- [46] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- LIN X G. Principles and methods of soil microbiology research[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [47] HU P, HOLLISTER E B, SOMENAHALLY A C, et al. Soil bacterial and fungal communities respond differently to various isothiocyanates added for biofumigation[J]. *Front Microbiol*, 2015, 5: 729.
- [48] YIM B, HANSCHEN F S, WREDE A, et al. Effects of biofumigation using *Brassica juncea*, and *Raphanus sativus*, in comparison to disinfection using Basamid on apple plant growth and soil microbial communities at three field sites with replant disease[J]. *Plant Soil*,

- 2016, 406(1-2): 389-408.
- [49] 刘昕昕. 不同芥菜生物熏蒸对设施连作黄瓜土壤微生物多样性影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
LIU X X. Effect of different mustard biofumigation treatments on microbial diversity of greenhouse successive cucumber soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013.
- [50] OMIROU M, ROUSIDOU C, BEKRIS F, et al. The impact of biofumigation and chemical fumigation methods on the structure and function of the soil microbial community[J]. *Microb Ecol*, 2011, 61(1): 201-213.
- [51] MBAGWU J S C. Improving the productivity of a degraded ultisol in Nigeria using organic and inorganic amendments. Part 2: changes in physical properties[J]. *Bioresour Technol*, 1992, 42(3): 167-175.
- [52] AMOS H O, IZUNDU C, AUDU I. Effect of chicken manure on the performance of vegetable maize (*Zea mays saccharata*) varieties under irrigation[J]. *Discourse Journal of Agriculture & Food Sciences*, 2013, 1(12): 190-195.
- [53] SIDDIQUEE S, SHAFAWATI S N, NAHER L. Effective composting of empty fruit bunches using potential *Trichoderma* strains[J]. *Biotechnol Rep*, 2017, 13: 1-7.
- [54] CAI Z J, XU M G, WANG B R, et al. Effectiveness of crop straws, and swine manure in ameliorating acidic red soils: a laboratory study[J]. *J Soils Sediments*, 2018, 18(9): 2893-2903.
- [55] AGBEDE T M, OJENIYI S O, ADEYEMO A J, et al. Effect of poultry manure on soil physical and chemical properties, growth and grain yield of sorghum in Southwest, Nigeria[J]. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 2008, 2(2): 72-77.
- [56] 王晓芳, 徐少卓, 王玫, 等. 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.
WANG X F, XU S Z, WANG M, et al. Effects of soil biofumigation using *Tageetes erecta* powder on growth of *malus hupehensis* rehd. Seedlings and soil microorganisms in old apple orchard soil[J]. *Acta Pedol Sin*, 2018, 55(1): 213-224.
- [57] 范成明, 刘建英, 吴毅歆, 等. 具有生物熏蒸能力的几种植物材料的筛选[J]. *云南农业大学学报*, 2007, 22(5): 654-658.
FAN C M, LIU J Y, WU Y X, et al. Screening of several plants suppressing soil borne plant fungi by biofumigation[J]. *J Yunnan Agric Univ*, 2007, 22(5): 654-658.
- [58] MATTHIESSEN J N, KIRKEGAARD J A. Biofumigation and enhanced biodegradation: opportunity and challenge in soilborne pest and disease management[J]. *Crit Rev Plant Sci*, 2006, 25(3): 235-265.
- [59] KIRKEGAARD J A, SARWAR M. Biofumigation potential of brassicas[J]. *Plant and Soil*, 1998, 201(1): 71-89.
- [60] BELLOSTAS N, SØRENSEN J C, SØRENSEN H. Profiling glucosinolates in vegetative and reproductive tissues of four *Brassica* species of the U-triangle for their biofumigation potential[J]. *J Sci Food Agric*, 2007, 87(8): 1586-1594.
- [61] DOHENY-ADAMS T, LILLEY C J, BARKER A, et al. Constant isothiocyanate-release potentials across biofumigant seeding rates[J]. *J Agr Food Chem*, 2018, 66(20): 5108-5116.
- [62] PETERSEN J, BELZ R, WALKER F, et al. Weed suppression by release of isothiocyanates from turnip-rape mulch[J]. *Agron J*, 2001, 93(1): 37.
- [63] SARWAR M, KIRKEGAARD J A. Biofumigation potential of brassicas II. Effect of environment and ontogeny on glucosinolate production and implications for screening[J]. *Plant and Soil*, 1998, 201(1): 91-101.
- [64] ZURERA C, ROMERO E, PORRAS M, et al. *In vitro* suppression of *Phytophthora cactorum* and *Verticillium dahlia* potential strawberry pathogens by brassica tissues[J]. *Acta Hort*, 2009, 842(1): 267-270.
- [65] 林清, 替林森, 辛亚平, 等. 利用家畜粪便可氧发酵生产有机肥的研究[J]. *家畜生态学报*, 2008, 29(1): 70-73.
LIN Q, ZAN L S, XIN Y P, et al. Study on applying aerobic fermentation of livestock excreta to produce organic fertilizer[J]. *Acta Ecol Animalis Domastici*, 2008, 29(1): 70-73.
- [66] UNEP MBTOC. Report of the methyl bromide technical options committee[R]. Nairobi: UNEP, 2010.

(责任编辑: 唐 静)