我国土壤熏蒸消毒60年回顾

曹坳程[1,2,3*] 方文生[1] 李 园[1] 颜冬冬[1] 王秋霞[1] 郭美霞[1]
黄 斌[1] 宋兆欣[1] 靳 茜[2]

（1. 中国农业科学院植物保护研究所，北京 100193；2. 河北省土传病害绿色防控技术创新中心，保定 071000；
3. 现代农业产业技术体系北京市创新团队，北京 100029）

摘要：熏蒸剂棉隆和氯化苦于20世纪60年代在我国曾用于棉花黄萎病的防治，由于缺乏施药机械、相关施药标准和方法，加之与国外交流甚少，虽然发现熏蒸剂对土传病害有一定的效果，但一直未形成规模化应用。我国大量使用熏蒸剂进行土壤消毒处理始于20世纪90年代，随着溴甲烷的引进与广泛应用，溴甲烷的替代技术及产品研发，开启了我国土壤熏蒸消毒的新纪元。伴随着土壤消毒技术与理论的不断丰富，新型配套机械装备的成功研发，社会化服务模式的广泛运用，土壤熏蒸消毒在我国进入快速发展时期，大批专业化服务组织应运而生，为我国农作物病虫害的绿色防控、实施乡村振兴战略提供了强有力的技术支撑。该文从土壤熏蒸剂的种类、发展历史、基础理论的建立与阐明3方面综述了我国土壤熏蒸发展情况，并对我国土壤熏蒸消毒未来发展方向提出了展望。

关键词：土壤熏蒸消毒；溴甲烷替代技术；土壤熏蒸发展历史；新型土壤熏蒸剂

Review on 60 years of soil fumigation and disinfestation in China

Cao Aocheng[1,2,3*] Fang Wensheng[1] Li Yuan[1] Yan Dongdong[1] Wang Qiuxia[1] Guo Meixia[1]
Huang Bin[1] Song Zhaoxin[1] Jin Xi[2]

（1. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Hebei Technology Innovation Center for Green Management of Soil-borne Diseases, Baoding 071000, Hebei Province, China; 3. Modern Agricultural Industrial Technology System Beijing Fruit Vegetable Innovation Team, Beijing 100029, China）

Abstract: Dazomet and chloropicrin were used in the control of cotton *Verticillium* wilt in China in the 1960s. Although the fumigants have a certain control effect on soil-borne diseases, they had not formed a large-scale application due to the lack of application machinery, relevant standards, application methods and communication with developed countries during this period. The extensive use of fumigants for soil disinfestation in China began in the 1990s. With the import and wide application of methyl bromide, soil fumigation ushered in a new development in China. With the enrichment of soil fumigation technologies and theories, the successful development of machinery, and the wide application of social service models, soil fumigation has entered a rapid development in China. A large number of professional service organizations had been established, providing strong technical support for the green control of crop diseases and pests in China and the implementation of the rural revitalization strategy. This paper reviewed the development of soil fumigation in China from three aspects: the types of soil fumigation agents, the development history, the establishment and clarification of basic theories, and put forward the new prospects for the future development of soil fumigation in China.

基金项目：国家重点研发计划(2017YFD0201600)，国家自然科学基金(31972313)，农业行业甲基溴淘汰项目(农外甲16-07号)，现代农业产业技术体系北京市创新团队(BAIC01-2017)

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

收稿日期：2022-01-27

Key words: soil fumigation; methyl bromide alternatives; development history of soil disinfestation; novel soil fumigants

土壤熏蒸消毒是指将土壤熏蒸剂通过专业施药设备施用于土壤中并覆盖专用塑料薄膜,在人为密闭空间中产生具有杀虫、杀菌或除草等作用的气体,达到防治土传病、虫、草等危害的一种土壤处理技术(王秋霞等,2017)。随着集约化种植和高附加值作物连茬种植,毁灭性土传病害如枯萎病、根腐病、青枯病及根结线虫病等发生严重,病原物在土壤中繁殖扩增,导致土壤生物多样性及生态功能失衡,耕地质量下降,严重影响作物产量和品质。土传病害具有种类多、范围广、传播快以及隐蔽性、暴发性强等特点,难以准确监测预警和精准化防控。传统防治方法包括物理防治如太阳能消毒、蒸汽及热水消毒或生物防治如轮作倒茬、嫁接、无土栽培等,均很难达到理想的防治效果,而使用农药大剂量灌根进行防治,一方面效果不佳,另一方面造成农药残留和环境污染。作物种植前进行土壤熏蒸消毒是当前防治土传病害、解决连作障碍最有效和稳定的方法之一。在国外,采用熏蒸剂进行土壤消毒是综合防治技术体系的一部分,广泛应用在果树再植、草莓、草坪、蔬菜和观赏植物上(Chellemi et al.,1997)。在我国,土壤熏蒸消毒应用于如生姜、草莓及中药材三七等高附加值作物生产中来防治土传病害已有60多年的历史。因此,本文回顾并梳理了我国土壤熏蒸消毒的应用历史及发展现状,对于推动我国土壤熏蒸消毒事业的健康发展具有重要指导意义。

1 土壤熏蒸剂的种类及特点

1.1 土壤熏蒸剂的种类

我国登记的熏蒸剂较少,世界上商业化应用的熏蒸剂也大多是古老的品种。近60年来使用的熏蒸剂品种主要有7种,具体情况介绍如下。

1.1.1 溴甲烷

溴甲烷又叫甲基溴,分子式为CH_3Br,是一种卤代烃类熏蒸剂,在常温下蒸发为比空气重的气体,同时具有强大的扩散性和渗透性,可有效杀灭土壤中的真菌、细菌、土传病毒、昆虫、螨类、线虫、杂草以及啮齿动物等。溴甲烷作为熏蒸剂具有下列显著优点:1)生物活性高、作用迅速,很低的浓度即可快速杀死绝大多数生物;2)沸点低,低温下即可气化,使用不受环境温度限制;3)化学性质稳定,水溶性小,应用范围广,可熏蒸含水量较高的物品;4)穿透能力强,能穿透土壤、农产品和木器等,杀灭位于深层的有害生物;5)使用多年,有害生物对其抗性上升很慢;6)用于土壤消毒,可减少地上部病虫害的发生,并可减少氮肥的用量,能显著提高农产品的产量及品质。因此,溴甲烷自20世纪40年代开始应用以来,一直是世界上应用最广泛的熏蒸剂,主要用于土壤消毒、仓库消毒、建筑物熏蒸、植物检疫和运输工具消毒等。溴甲烷为臭氧消耗物,我国已于2015年禁止其在农业上应用(必要用途豁免除外),目前主要登记为杀虫剂和杀线虫剂,用于检疫熏蒸处理。

1.1.2 氯化苦

氯化苦是一种液态熏蒸剂,对真菌和细菌高效,对线虫和杂草有一定的效果。氯化苦具有强烈的刺激性,需要借助机具将氯化苦均匀施于土壤中。氯化苦也用作警示剂。美国、日本等多个国家已将氯化苦作为土壤熏蒸剂登记使用,我国也将氯化苦作为杀菌剂登记,用于防治青枯病菌、黄萎病菌、枯萎病菌、疫霉菌及根结线虫。

1.1.3 棉隆

棉隆是一种固态熏蒸剂,通常为98%微粒剂。棉隆属低毒农药,在土壤中遇水生成异硫氰酸甲酯(methyl-isorhodanate,MITC),MITC对真菌、细菌、线虫、杂草和地下害虫均有良好的防治效果。棉隆在我国已登记于生姜、草莓、三七、花卉、番茄、白术和杭白菊等作物用来防治线虫、茎腐病和根腐病等。

1.1.4 威百亩

威百亩是一种液态熏蒸剂,通常含量为32.7%~42.0%。威百亩属低毒农药,在土壤中生成MITC。在我国已登记于黄瓜、番茄和烟草等作物用来防治根结线虫、猝倒病及一年生杂草。

1.1.5 硫酰氟

硫酰氟常温下是一种气态熏蒸剂,通常装于压力瓶中。硫酰氟对线虫和地下害虫有优异的防治效果。在我国已登记于原粮、大蒜、烟草、黄瓜、草莓、韭菜和生姜等作物用来防治仓储害虫、蛴螬、烟草甲、粉斑螟、根结线虫、蝼蛄、韭蛆,以及作为卫生杀虫剂用于防治黑皮蠹、蚊、蝇和蜚蠊。

1.1.6 异硫氰酸烯丙酯(allyl isothiocyanate,AITC)

AITC是一种天然产物,具有与MITC相似的特性和生物活性。2013年美国国家环境保护局批准登记AITC为种植前土壤处理剂,是第1款可同时用于传统及有机耕种的生物土壤熏蒸剂(Allan & Leon,2013)。我国也在2018年将其登记于番茄用来

防治根结线虫。

1.1.7 二甲基二硫(dimethyl disulfide，DMDS)

DMDS是我国正在登记的一种高效仿生熏蒸剂，对线虫有优异的防治效果，已在美国和欧盟国家获得登记，用于番茄、辣椒、茄子以及葫芦科作物如黄瓜、南瓜、甜瓜和农田种植的观赏植物、森林苗场。DMDS因其对土传病原菌和线虫表现出优异的活性以及良好的生态环境效应，被联合国溴甲烷技术选择委员会列为最有潜力的溴甲烷替代品(MB-TOC，2018)。

1.2 土壤熏蒸消毒的特点

土壤熏蒸主要在作物种植前使用，施药后需要覆盖专用塑料薄膜，让熏蒸剂在密闭的土壤空间中挥发和移动，能有效杀灭土壤中的病虫草以及地下害虫。熏蒸一定时间后，揭膜敞气，待残留的熏蒸剂散发完成后即可栽种作物。土壤熏蒸消毒具有多种特点，首先是防治谱广，具有多靶标性，对土壤中病原细菌、真菌、根结线虫、地下害虫以及杂草均有很好的防治效果；其次是无残留风险，因熏蒸剂为小分子化合物且在种植前已散发，因而熏蒸剂处理后不会造成作物中农药残留；再次是增产效果显著，由于熏蒸处理后土壤中无有害生物，作物在健康的土壤中通常长势更好，而且土壤熏蒸消毒具有减药减肥的功效，作物在生长期基本不需要频繁喷施农药，可显著减少氮肥的用量，因而减少了作物生长期的处理成本和劳动力，保障了农产品的安全生产。

2 土壤熏蒸剂发展历史

2.1 溴甲烷淘汰前期(1950—1997年)

20世纪90年代以前，我国主要种植大田作物，虽然高附加值作物也有一定的种植面积，但由于规模较小，有足够多的种植设施可以轮作，所以对土壤消毒要求并不迫切。这一时期棉隆和氯化苦也有少量、零星使用。

20世纪90年代初，从以色列引进溴甲烷土壤熏蒸技术，在烟草、草莓和蔬菜等作物上开始了试验和推广，由于包装便利、易于使用和应用效果显著的特性，很快在我国得到大面积的推广和应用。

2.2 溴甲烷替代品筛选及发展时期(1997—2003年)

虽然溴甲烷是一种优良的熏蒸剂，但它对臭氧层有破坏作用，1992年《蒙特利尔议定书》哥本哈根修正案将溴甲烷列为受控物质，并决定发达国家和发展中国家分别于2005年和2015年全部淘汰溴甲烷(检疫用途和必要用途豁免除外)。

为了实现该目标，1997年春天，来自联合国工业发展组织(United Nations Industrial Development Organization，UNIDO)的高级别项目官员Antonio Sabater博士、国别主任苏戈先生，与国家环保局宋小智女士、农业农村部李波先生、中国农业科学院植物保护研究所屠予钦先生和曹坳程先生在UNIDO北京办公室开始商讨中国溴甲烷淘汰事项，经过1周的准备，向联合国多边基金提交了“中国溴甲烷替代技术示范项目”计划书，并很快获批。

为实施该项目，受国家环保部、农业农村部的委托，中国农业科学院植物保护研究所联合北京市农业环境保护监测站、河北省农业环境保护站、山东省农业环境保护监测站、河北省农业生态环境保护站和吉林省农业环境保护监测站承担了“溴甲烷土壤消毒替代技术示范项目”，在Antonio Sabater和Jose A. Gonzalez等国际专家的帮助下，在北京市的番茄、河北省的草莓、山东省的黄瓜、湖北省的烟草和吉林省的人参上开始了溴甲烷替代技术研究和示范。总体思路是优先使用非化学技术。通过2年的项目实施，在烟草上成功筛选的替代技术为漂浮育苗法；在草莓和蔬菜上可用的替代技术为无土栽培、抗性品种种植、太阳能消毒、生物熏蒸、棉隆和阿维菌素(曹坳程等，2000；2003)。

为了帮助中国淘汰溴甲烷，意大利环境与领土部、德国技术合作公司(Gesellschaft Internationale Zusammenarbeit，GIZ)也捐资对口援助中国，不仅提供了资金，并派专家参与中国溴甲烷替代技术筛选工作。意方专家有国际植物病理学会主席Maria Lodovica Gullino、Minuto Giovanni、Quirico Migheli及其团队，德国GIZ专家有Volkmar Hasse和Melanie Miller等。

为了淘汰溴甲烷，在《蒙特利尔议定书》多边基金、联合国工业发展组织、世界银行、意大利环境与领土部、德国GIZ的资助下，中国实施了溴甲烷替代技术筛选以及示范等项目。主要针对使用溴甲烷的作物进行逐一示范，明确替代技术的技术可行性和经济可行性。通过筛选和示范明确了一系列可行的替代技术，如在烟草种苗生产中可使用飘浮育苗法；在草莓生产中可使用威百亩和太阳能消毒；在蔬菜作物(番茄、黄瓜)生产中可使用嫁接、生物熏蒸、太阳能消毒、阿维菌素、棉隆和威百亩。

2000年，在德国GIZ的资助下开展了溴甲烷替代技术培训及示范工作，主要培训种植户使用非化学技术，如无土栽培、嫁接和生物熏蒸等技术。

在中国淘汰溴甲烷的进程中，意大利环境与领土部提供资金进行了替代技术筛选和能力建设。“中

国–意大利溴甲烷土壤消毒替代技术及能力建设项目”是中国国家环保总局与意大利环境与领土部为推动中国早日淘汰溴甲烷而实施的环境领域国际合作项目之一。该项目在我国溴甲烷使用量最大的地区河北省满城县进行草莓上溴甲烷替代技术筛选试验。试验于2001年6月开始,于2003年6月结束。试验设置了5个替代技术处理,包括威百亩常量处理(35 g/m^2)、威百亩减量处理(26.25 g/m^2)+VIF(virtually impermeable film)、太阳能消毒+生物防治制剂处理(10 g/m^2)、种植抗性品种、溴甲烷减量处理(2001年37.5 g/m^2,2002年41 g/m^2)+VIF;用溴甲烷常量处理(2001年50 g/m^2,2002年55 g/m^2)作对照,并设空白对照区。所有处理均重复4次,每个温室大棚为1个重复,共用4个温室。每个小区均种植相同面积的当地草莓品种和抗性草莓品种。为防止田水串流,浇水采用以色列产滴灌系统。经过2年试验得到如下结论:(1)威百亩和威百亩+VIF是最有前景的溴甲烷替代品,两者的草莓长势、产量和品质均与溴甲烷常量处理无显著差异,具有稳定的效果,可以推广使用;(2)溴甲烷+VIF处理下草莓在长势和产量以及品质上与溴甲烷常量处理无显著差异,但溴甲烷+VIF处理能减少溴甲烷25%的用药量,从而减少溴甲烷散发;(3)太阳能消毒+生物防治制剂处理的草莓产量高于空白对照,有一定的防病增产效果,但效果显著低于溴甲烷处理,不能作为溴甲烷替代品。在2002年的试验中发现,太阳能消毒时加入鲜牛粪,能显著降低草莓的死苗率。种植户认为增加鲜牛粪的用量有可能获得更好的效果。该方法不需要额外的设备,并且原料来源容易,易被种植户接受,但其效果有待于进一步验证。

通过召开研讨会,参加试验的种植户和农技人员均认为威百亩、威百亩+VIF、溴甲烷+VIF处理的草莓长势良好,产量与溴甲烷常量处理无显著差异,可以替代溴甲烷或减少溴甲烷的使用量。但有种植户认为威百亩是一种液体,施药时需要通过滴灌系统,与溴甲烷便捷的使用方法相比会增加投入,并且使用时需要水电供应,因此该技术的推广会有一定的难度,同时增加了生产成本。VIF虽然能减少溴甲烷的用量,但需要专门的“热法”施药设备,而该设备操作难度高,需要有专业的服务系统提供专业化服务,推广使用也存在较大困难。

20世纪90年代土壤熏蒸在中国刚刚起步,特别是缺乏施药机械,而且熏蒸剂除溴甲烷使用更便捷外,其他熏蒸剂在国内的生产也只处于起步阶段。当时国内沈阳丰收农药厂刚开始量产威百亩,而且主要用于出口。氯化苦虽然在国内也有生产,但由于氯化苦对眼睛有强刺激性,而且无施药器械,只在河北省满城县草莓上有少量使用。

2.3 溴甲烷淘汰时期(2003—2018年)

2003年4月23日,中国签署《蒙特利尔议定书》哥本哈根修正案,随后开始制定并实施溴甲烷行业淘汰计划。我国在溴甲烷的淘汰上采用了先易后难的策略,有成熟替代品的行业先行淘汰溴甲烷的使用。2004年起,中国开始了粮食行业和烟草行业溴甲烷的淘汰。2007年,中国采用磷化氢+二氧化碳混合熏蒸技术成功淘汰了溴甲烷在粮食熏蒸上的应用,采用非化学技术漂浮育苗法淘汰了溴甲烷在烟草苗床上的应用。

2008年,中国启动了农业行业溴甲烷淘汰行动。淘汰策略也采用了先易后难的做法,有成熟替代技术和登记替代品的作物先行淘汰溴甲烷的使用,替代技术不成熟的作物后淘汰溴甲烷的使用。在草莓上采用的溴甲烷替代品是氯化苦、棉隆和威百亩;在番茄、黄瓜、辣椒、茄子上采用了抗性品种种植、嫁接、阿维菌素、棉隆、威百亩、氰氨化钙、有机肥等一系列替代技术和病虫害综合防治技术;由于这些技术能取得与溴甲烷相同或更好的效果,并且经济有效,很快被种植户接受并投入商业化应用。在这种情形下,中国于2011年撤销了溴甲烷在草莓、番茄和黄瓜等作物上的登记,宣告中国已顺利淘汰了溴甲烷在上述作物上的应用。

自2009年起,中国开始着手生姜上溴甲烷的淘汰。生姜曾是中国溴甲烷用量最大的作物,而且主要集中在山东省安丘市使用。危害生姜的土传病害有姜瘟病、茎基腐病和根结线虫病,但生姜上已登记的姜瘟病、茎基腐病防治药剂只有氯化苦,在根结线虫的防治上缺少合法的替代品。因此在生姜主产区安丘市姜瘟病和茎基腐病发生地区重点推广使用氯化苦,从而淘汰了溴甲烷在绝大部分作物上的使用。

为了实现可持续发展,在溴甲烷的淘汰中优先发展非化学替代技术,如嫁接、抗性品种种植、太阳能生物熏蒸和无土栽培等可靠的替代技术,并借鉴国际上的成功经验,组织了多次出国专题访问和邀请国际专家到中国培训,并委托相关机构进行抗性种苗的生产,这些技术在淘汰溴甲烷在蔬菜上的应用取得了良好成效。

为淘汰溴甲烷,中国政府资助大专院校和企业开发新型替代技术,并加速新农药的登记。目前,已筛选出高效、无残留的多种高效熏蒸剂,包括硫酰氟、DMDS、1,3-二氯丙烯、碘甲烷和AITC等。首次

明确了硫酰氟作为土壤熏蒸剂的效果，明确了DMDS和1，3-二氯丙烯是当前经济、高效的根结线虫防治药剂。

为使这些新型熏蒸剂能方便应用，发明了胶囊施药技术，将高毒、高危险农药氯化苦、1，3-二氯丙烯、碘甲烷及其混剂加工成胶囊，从而可以高效安全地使用。根据中国不同自然条件、作物种植方式和气候条件，在草莓、蔬菜、生姜、山药、果树再植及人参上开发了适合中国的10种土壤消毒技术，即注射施药技术、混土施药技术、化学灌溉技术、分布带施药技术、胶囊施药技术、火焰消毒技术、太阳能消毒技术、生物熏蒸技术、厌氧消毒技术、臭氧消毒技术及减少熏蒸剂散发技术。这些技术可满足中国不同作物和地区无公害农产品的生产和有机食品生产的需要，并且使用方便，能有效保护施药人员及环境安全。

然而，上述技术的使用必须借助机械。为了解决氯化苦和棉隆的施用问题，中国政府和国际组织均资助一些企业和科研单位，开发了系列施药机械，较好地解决了熏蒸剂施用难的问题。这些施药机械具有高效、精确、方便、安全、易于操作、易于维护等特点，受到土壤消毒专业公司的青睐，其中的小型施药机具既可在中国乡村道路上运输，也可在小型温室中灵活使用。

2.4 土壤熏蒸消毒快速发展时期（2018年以后）

随着溴甲烷的淘汰及其替代品的兴起，中国土壤熏蒸消毒进入快速发展时期。经过长期的实践，中国农业科学院植物保护研究所联合相关企业建立了一套土传病害防治体系，取得了一些重要进展。

2.4.1 土传病害防控技术体系的建立

一是研发了高效、稳定、安全的化学、火焰及厌氧土壤消毒技术，制定了关键技术规程，一次应用即可有效控制土壤中目标有害生物。研发了新型土壤熏蒸剂硫酰氟、AITC、DMDS及棉隆的新用途，改善了国内熏蒸剂品种缺乏的局面。针对熏蒸剂高挥发性的特点研发了注射、胶囊、化学灌溉、混土及分布带施药技术，解决了熏蒸剂施用难题。制订了棉隆、氯化苦等多项土壤消毒技术规程，提升了土传病害防控的稳定性。研发了环境友好的火焰消毒技术和生物熏蒸技术，与化学土壤消毒技术轮用可降低50%的熏蒸剂用量。明确了土壤消毒后土壤微生物群落受到的干扰是可恢复的。揭示了土壤消毒对氮磷素循环过程和氮磷素生态服务功能的影响与重建过程，明确了土壤消毒后产生“肥料效应”的机制。

二是研发了适合我国耕作条件的土壤消毒机械，大幅度提升了土壤消毒效率、效果与稳定性。国内首创了电喷式广角土壤消毒机械，以小型动力驱动机械带动，日作业量为2.0~2.7 hm^2，施药效率较进口装备提高了2~4倍，已生产3 600台，累计作业面积2.3万hm^2；研发了包括手动、两条管理机用、六条拖拉机用以及起垄施药一体土壤消毒机械，满足了不同生产规模需求。国内首创了适用于棉隆等固体药剂的精细旋耕施药机，实现施药、旋耕、秸秆还田一体化，作业效率提高了50%，已生产500台，累计作业面积0.15万hm^2。在国际上首创了自走式精旋土壤火焰消毒机，原理是通过液压机械的方式由旋耕滚筒将土壤深度精细旋耕，并且提到土壤高温烘箱中进行瞬间高温灭菌杀虫，现已生产200台，累计作业面积0.1万hm^2。

三是构建了以病原物源头控制为重点、土壤消毒技术为核心、农业生态调控和强化中后期管理为必要补充的土传病害防控体系，破解了三七、生姜以及草莓等高附加值作物连作障碍。通过推广应用，三七轮作间隔年限由原来的15~20年缩短到3~5年，突破了三七连作障碍的生产难题；设施蔬菜、生姜、草莓和山药平均增产在30%以上。成功淘汰了890 t溴甲烷在中国农业生产上的使用，圆满实现了中国政府的国际环境公约履约目标。

四是构建了土壤消毒社会化服务体系，提高了技术推广应用速度与质量。土壤熏蒸剂具有高挥发性，对施用技术的安全性要求高，用专业化服务解决技术推广难题。采用“政府主导、部门联动、市场运作、专业服务”的运作方式，构建了“统一储存、统一管理、统一检测、统一配送、统一服务”的社会化服务模式。已孵化专业土壤消毒公司13家，设立服务网点120个，举办培训班117期，培训持安全培训合格证书的技术人员500名，培训农技人员1.7万余人次，培训种植人员6.6万余人次。

2.4.2 推广应用体系的建立

首先是土壤消毒分会的成立。2015年中国农业生态环境保护协会土壤消毒分会在福建省福州市宣告成立，中国农业科学院植物保护研究所曹坳程研究员当选为首届理事长。

其次是社会化服务组织的建立。由于土壤消毒技术复杂，涉及病原物、土壤条件、覆盖塑料薄膜、揭膜敞气以及药害测试等过程，加之氯化苦属于危险化学品，因此建立了一系列的标准化操作程序，并成立了土壤熏蒸服务公司。

山东省安丘市曾是我国溴甲烷使用量最大的地区，也是我国首个建立土壤消毒专业化服务公司的地区，该公司先后投资5 000多万元，建设了病原菌

分子检测、土壤理化分析、熏蒸剂检测实验室。通过土壤病原物分析实现精准用药。如氯化苦用量由原来的495 kg/hm²降低到375 kg/hm²。建设了中国农业科学院植物保护研究所安丘科研培训基地农民培训中心，年培训10 000多人次。建立试验示范田逾33 hm²，研发了广角电喷式土壤熏蒸施药机，该机械简便高效，适应性强，是目前我国使用最广泛的土壤熏蒸机械。

针对危险化学品，建立了专业储存、专车配送、包装回收、安全监管等严格的管控措施，为高毒农药的安全使用提供了一套可借鉴的经验。制订了12步操作流程：(1)熏蒸作业前，在田间取土采样；(2)化验测试土壤中菌虫的状况；(3)根据测试结果，制订相应的防治方案；(4)由专业车辆配送药剂、熏蒸作业设备和防护设施到田间；(5)由2名以上持证技术人员使用专用机械，组织实施土壤熏蒸作业；(6)熏蒸覆膜作业后，在膜上张贴警示公告；(7)根据气温实情，适时揭膜散气；(8)种植作物前，对土壤进行测试，检验药物余气是否完全散尽；(9)种植前整平土壤，打沟起垄；(10)开沟定植作物，合理使用有益菌有机肥；(11)评估效果；(12)登记，输入电子档案，进行跟踪服务。

最后是土壤消毒机械发展。土壤消毒防治土传病害时需要将药剂均匀施入土壤中，而要达到这一要求，一是要掌握药剂的分布特性，二是要借助机械将药剂按其分布特性均匀施入土壤中。2017年起，在国家重点研发计划的资助下，我国开发了液态、固态以及混合施药机械，同时火焰消毒机械也在不断地发展和完善。火焰消毒是一项新的物理防治技术，在以色列已开始推广应用。中国在多年摸索实践的基础上，开发了更先进和实用的火焰消毒技术，对地下害虫、根结线虫和杂草均有良好的防控效果，并在土壤板结和土壤改良方面表现出良好的应用前景(王晓宁等，2020)。我国开发的机械有液态注射施药机、液态施药覆膜一体机、固态撒药机、秸秆还田一体机、大型固态和液态施药机械(图1)。

a：液态注射施药机，由山东省安丘市供销农资公司研发；b：液态注射施药机，由北京捷西农业科技有限责任公司研发；c：大型固态和液态施药机械，由北京市农林科学院研发；d：精准固态粉剂土壤消毒机，由北京农业智能装备技术研究中心研发；e：液态施药覆膜一体机，由北京捷西农业科技有限责任公司研发；f：秸秆还田一体机，由春晖(上海)农业科技发展股份有限公司研发，是一种原始创新的固态施药机械。a: Liquid injection applicator, developed by Anqiu Agricultural Materials Supply and Marketing Company of Shandong Province; b: liquid injection applicator, developed by Beijing Jiexi Agricultural Science and Technology Co. Ltd.; c: large solid and liquid applicators, developed by Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences; d: precision solid powder soil disinfection machine, developed by Beijing Agricultural Intelligent Equipment Technology Research Center; e: liquid coating all-in-one machine, developed by Beijing Jiexi Agricultural Science and Technology Co. Ltd.; f: straw returning all-in-one machine, developed by Chunhui (Shanghai) Agricultural Science and Technology Development Co., is an original innovative solid-state application machine.

图1 土壤消毒设备

Fig. 1 Soil disinfestation equipments

2.4.3 重大重茬病害关键技术的突破

千百年来，三七、人参、山药和百合都是不能重茬种植的作物。通过土壤消毒，这些作物不仅可重茬种植，而且产量大幅超过新地种植的产量。

2018年11月3日项目组在云南省文山市召开了三七土壤消毒技术现场观摩会，来自全国农业、中药材种植领域的300余名专家学者参加了会议，专家现场测产，产量达到了23 841.15 kg/hm^2。2020年马关县旗镇三七产量为24 202.5 kg/hm^2。在重茬地直接种植的三七几乎绝产，而新地种植的三七产量很难超过15 000 kg/hm^2，重茬地进行土壤熏蒸后种植的三七产量在22 500 kg/hm^{2}以上。同样，在江西省瑞昌市对山药的产量测定结果表明，重茬地直接种植的山药几乎绝产，新地种植的山药商品薯产量约为15 000 kg/hm^2，重茬地进行土壤熏蒸消毒后种植的山药商品薯产量在21 000 kg/hm^{2}以上。在湖南省邵阳县对百合的产量测定结果表明，空白对照区百合产量为25 500 kg/hm^2，重茬地进行土壤熏蒸处理后百合产量达39 585 kg/hm^2。

在增产的同时，土壤熏蒸还显著提高了农产品的品质。如氯化苦熏蒸后降低了马铃薯的瘕疵率，提高了草莓叶片叶绿素含量、叶片氮含量、果实甜度，棉隆熏蒸处理大幅提高了上等烟比例（秦平伟等，2019；王宁堂等，2021）。第三方单位对番茄、黄瓜的检测结果表明，采用氯化苦、棉隆以及威百亩处理土壤后，在番茄和黄瓜的果实中均未检测出熏蒸剂残留。

2.4.4 拓展熏蒸剂的用途

2014年我国首次报道了硫酰氟作为土壤熏蒸剂的应用（Cao et al.，2014），随后在2016年硫酰氟在中国作为土壤熏蒸剂获得登记。2007年，中国农业科学院植物保护研究所首次发现了AITC的杀菌防病活性，2018年AITC作为土壤熏蒸剂在中国获得登记。

2.4.5 相关标准的建立

为了保证土传病害的防治效果并保护生态环境，中国主管部门授权中国农业科学院植物保护研究所组织有关专家制定了氯化苦、棉隆、威百亩及硫酰氟等熏蒸剂的使用标准，并陆续颁布实施。土壤熏蒸消毒自此走上了专业化、标准化的道路，并逐步向精准化、智能化的方向迈进。

3 土壤熏蒸消毒基础理论的建立与阐明

经过几十年的发展，土壤熏蒸理论在熏蒸剂的环境行为、熏蒸对土壤微生态的影响及调控、熏蒸后土壤养分转换机制及作物增产机理等方面均取得了重大进展。

3.1 熏蒸剂土壤迁移、扩散规律及其大气散发阻控技术

熏蒸剂多为小分子化合物，在土壤中降解快，降解半衰期一般在几小时至几天内。如Han et al.（2018）发现DMDS在土壤中降解半衰期在0.75~7.88 d之间，而且在中性偏碱性土壤中的降解速率更快，添加有机质能减缓DMDS的降解。土壤温湿度显著影响熏蒸剂的降解，如棉隆在土壤中的降解速率随着土壤含水量及温度的升高而增加（Fang et al.，2018a）；土壤温度在0~35℃范围内或者土壤含水量在10%以内，DMDS降解速率随着土壤温度以及含水量的升高而加快，但当土壤温度超过35℃或土壤含水量超过10%后，其降解速率降低或增加不明显（Han et al.，2018）。AITC的降解半衰期在12.2~71.8 h之间，降解半衰期与土壤有效氮含量及电导率之间均存在极显著正相关关系，与土壤pH和有机质含量之间呈负相关（Liu et al.，2020）。生物降解是熏蒸剂降解的主要途径，占比高达60%~90%，如AITC在不同土壤中的微生物降解量占总降解量的67.67%~89.73%（Liu et al.，2020）。土壤改良剂显著影响熏蒸剂在土壤中的降解半衰期，如氮肥、沸石粉和生物炭均能促进AITC降解，并且降解速率随着添加量的增加而增加；添加磷肥会抑制AITC降解，降解速率随着添加量的增加而降低，但因土壤类型而异（Liu et al.，2020）。土壤类型显著影响DMDS在土壤中的散发、迁移以及残留，如DMDS在砂壤土以及红壤土中的散发量（15%）显著高于在黑土中的散发量（7%），DMDS在砂壤土中的迁移能力最强，显著大于在黑土和红壤土中的迁移能力（Wang et al.，2018）。DMDS在土壤中的迁移能力与土壤含水量呈显著负相关，其迁移能力随土壤含水量的升高而降低（Wang et al.，2018）。为了减少熏蒸剂的空气散发，土壤表面覆盖塑料薄膜或生物炭等可以显著降低熏蒸剂的散发。如Wang et al.（2019）研究发现土壤表面覆膜可以减少DMDS散发量达90%以上。Wang QX et al.（2014；2015；2016）研究结果表明土壤表面添加生物炭能减少氯化苦、MITC和1，3-二氯丙烯90%以上的散发量，一方面生物炭表面富含的自由基与熏蒸剂发生化学反应而产生降解作用，另一方面生物炭富含的微孔对熏蒸剂产生吸附作用，降解与吸附作用均可减少熏蒸剂向大气逃逸（Fang et al.，2016）。

3.2 熏蒸对土壤微生物群落及关键功能的影响机制

土壤熏蒸剂是一种广谱性农药，同时兼具杀细菌、真菌、杂草、线虫和地下害虫的作用。目前已有许多研究表明熏蒸剂能显著降低土壤中非靶标微生物如细菌和真菌的丰度。如棉隆熏蒸导致土壤细菌总量减少50.0%，真菌总量减少58.8%，放线菌总量减少8.5%（Parthipan & Mahadevan，1995；Wang QJ et al.，2014）。相反，氯化苦熏蒸能显著增加好氧性革兰氏阴性菌数量，如假单胞菌*Pseudomonas*增加量达70%（Ridge，1976）。谢红薇等（2012）研究表明熏蒸显著降低了土壤微生物的多样性，氯化苦或DMDS熏蒸后微生物多样性指数如Shannon指数、Simpson指数和McIntosh指数等短期内受到较大程度抑制。Ibekwe et al.（2001）也发现氯化苦熏蒸对土壤微生物群落的抑制作用超过60 d。而且Li et al.（2017a，b）采用高通量测序技术分析发现熏蒸后土壤的微生物群落组成在属水平和运算分类单位（operational taxonomic unit，OTU）水平上发生了显著改变。尽管土壤熏蒸对土壤微生物群落有短暂的抑制作用，但Liu et al.（2015）研究表明这种抑制效应很快就消失了，细菌丰度在后期可以逐渐恢复至对照水平。可见，不论是基于传统生物学手段还是现代分子生物学技术，均证明熏蒸对土壤微生物群落结构和多样性有不同程度的影响。

土壤中许多过程如碳、氮、磷等元素循环均是由土壤微生物驱动的，而土壤熏蒸对土壤碳、氮、磷循环的影响及其微生物学作用机制的研究将加深人们对土壤熏蒸消毒技术原理的理解。

3.2.1 熏蒸对土壤碳循环的影响及其微生物学机制

研究表明氯化苦熏蒸能显著增加土壤溶解性有机碳含量及CH_4和CO_2排放量，其含量的增加与土壤微生物有关。如黄斌（2020）利用定量PCR检测发现熏蒸显著降低了土壤*pmoA*基因的丰度，但对*mcrA*基因的丰度没有显著影响；通过宏基因组学技术在DNA水平分析发现氯化苦熏蒸能显著降低含*pmoA*基因功能微生物的多样性和丰度，而能极显著增加含*mcrA*基因功能微生物的多样性和丰度，这种差异导致了熏蒸后土壤CH_4的生成量大于氧化量，促进土壤CH_4排放量的增加；通过宏转录组学技术在RNA水平进一步阐明熏蒸增加CH_4排放的机理，表明氯化苦熏蒸后严重抑制了CH_4氧化过程，尤其是抑制了磷酸核酮糖途径和丝氨酸途径中CH_4氧化为甲醇和甲醛过程的关键功能基因*pmoA*/*mmox*（FPKM值10 210→0）和*mdh1*（FPKM值278→0）的表达，同时也抑制了产CH_4过程的甲基裂解途径，但是CO_2还原产CH_4途径只被轻微抑制。这种差异就导致了熏蒸后CH_4氧化与CH_4生成过程的不平衡，导致产生的CH_4比消耗的多，从而相对增加了土壤CH_4的排放。

3.2.2 熏蒸对土壤氮素转换的影响及其微生物学机制

土壤氮循环包括有机氮矿化、固氮、硝化、反硝化过程，土壤熏蒸对氮循环多个过程产生重要影响。如氯化苦、棉隆、1，3-二氯丙烯熏蒸均短期内显著降低了氮循环功能基因的丰度，包括*nifH*、AOB*amoA*、AOA*amoA*、*cnorB*、*nxrB*、*napA*、*qnorB*、*nirS*、*nirK*以及*nosZ*等基因，相反AITC和DMDS对氮循环功能基因产生的抑制作用较弱且很快消失（Fang et al.，2018b，c；2019a）。但当熏蒸胁迫解除后，功能微生物的丰度逐步恢复到对照水平（<59 d），微生物的恢复速度与土壤理化性质关系密切。除1，3-二氯丙烯外的其余几种熏蒸剂均会不同程度刺激N_2O排放。熏蒸后土壤有效性N库（NH_4^+、可溶性氨基酸）的增加是驱动N_2O代谢的重要因素（Fang et al.，2019b）。Fang et al.（2019b）研究发现熏蒸显著抑制氨氧化过程，*amo*家族基因表达量下降了62.5%~94.1%；DMDS同时刺激了N_2O生成和消耗过程中相关基因的表达，而AITC只增加了NO_2^-转换成NO和有机氮分解过程家族基因的表达丰度，从而导致硝化路径对N_2O生成的贡献降低，使反硝化途径成为DMDS熏蒸后土壤中N_2O生成的主要路径，而硝化细菌的反硝化过程成为AITC熏蒸后N_2O生成的主导途径。

3.2.3 熏蒸对土壤磷素转换的影响及其微生物学机制

黄斌（2020）研究表明氯化苦和棉隆熏蒸后在短期内可以显著提高土壤活性较高的磷形态的含量，包括土壤中有效磷、淋溶磷和高活性磷形态，且熏蒸后土壤磷形态、溶淋磷含量与土壤微生物群落显著相关。该研究还表明氯化苦和棉隆熏蒸培养中期刺激了真菌多样性增加和含*phoD*微生物群落丰度和多样性的增加，从而促进了矿物磷和有机磷转变为无机磷的过程。熏蒸后在短期内可以增加土壤有效磷和活性较高的磷形态的原因一方面是因为熏蒸显著降低了土壤细菌和真菌的丰度，这些杀灭的微生物可以释放大量活性磷，同时熏蒸改变了土壤理化性质，如增加离子强度、铵态氮、溶解性有机碳含量，黏粒变小，这就减少了土壤对磷的吸附，更利于磷的释放或提取；另一方面是因为熏蒸后土壤含*phoD*微生物的转化作用，熏蒸土壤中活性较高的磷形态变

化与一些含*phoD*微生物显著相关，熏蒸后培养中期含*phoD*微生物的丰度和多样性显著上升，从而促进了矿物磷和有机磷转变为无机磷的过程。

3.3 土壤熏蒸后微生物群落恢复及调控机制

熏蒸条件下细菌群落较真菌群落具有更高的抵抗力，熏蒸后期均逐步恢复，但细菌恢复速度显著快于真菌，而且细菌及真菌恢复力与土壤养分状况（有效磷、硝态氮、微生物量氮、含水量）呈显著正相关（方文生，2021）。熏蒸后期功能微生物也逐步恢复，但恢复速率不一，如碳循环中含*pomA*微生物的恢复力高于含*fungcbhI*微生物，氮循环中含AOB*amoA*微生物恢复力显著高于含AOA*amoA*或*nirS*微生物；与病原菌相比，碳循环中含*ungcbhI*或*mcrA*微生物的恢复力，以及氮循环中含AOA*amoA*、*nirS*/*nirK*微生物的恢复力均显著低于镰刀菌，而含*nosZ*微生物的恢复力在培养中期（28~42 d）高于镰刀菌，在培养前期（7~14 d）及培养后期（56~70 d）则均显著低于镰刀菌；磷循环中含*phoD*微生物的恢复力与镰刀菌差异不显著（方文生，2021）。群落组装研究发现确定性过程的同质选择在熏蒸后土壤细菌群落装配中占主导地位，相反，随机过程则在熏蒸后土壤真菌群落装配中占支配地位；基于β平均最近分类单元距离（beta mean nearest taxon distance，βMNTD）和β最近分类单元指数（beta nearest taxon index，βNTI）的分析结果同样表明，确定性过程的同质选择在熏蒸后细菌组装中占主导地位，随机过程则在真菌组装中起支配作用（方文生，2021）。

土壤熏蒸后期施用土壤改良剂或微生物菌剂/菌肥可以有效促进根际有益微生物的定殖，降低致病菌密度，增强土壤抑病能力。如1，3-二氯丙烯熏蒸后添加枯草芽胞杆菌*Bacillus subtilis*菌剂和哈茨木霉*Trichoderma harzianum*菌剂或腐殖酸有机肥，提高了土壤中脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶的活性，一方面显著降低了镰刀菌属*Fusarium*和疫霉菌属*Phytophthora*的种群密度，另一方面土壤细菌和真菌多样性和有益微生物如鞘氨醇单胞菌属*Sphingomonas*、芽胞杆菌属*Bacillus*、被孢霉属*Mortierella*和木霉属*Trichoderma*的相对丰度在熏蒸生物活化后短时间内显著升高，增强了土壤对镰刀菌和疫霉菌的抑制能力，从而使番茄增产7.50%~24.5%（Cheng et al.，2020；2021；程鸿燕，2021）。氯化苦或AITC熏蒸后添加生物炭能显著加速土壤微生物群落及功能微生物的恢复速度，如氮循环微生物AOA和AOB提前28~42 d恢复至对照水平（Fang et al.，2020；2021；Zhu et al.，2021）。

3.4 土壤养分转换机制及土壤熏蒸增产潜在机理

土壤熏蒸具有显著的增产效果，如棉隆和氯化苦熏蒸后生姜分别增产25.4%和20.3%，产值分别提高了36.1%和27.2%（周弦等，2021）。20%辣根素处理的百合增产幅度达20.27%~32.05%，增产效果明显（满益龙等，2021）。连续3年的田间试验表明，1，3-二氯丙烯熏蒸使黄瓜增产22.6%~46.2%（Mao et al.，2017）。氯化苦熏蒸后黄瓜增产高达26.9%~37.1%，辣根素熏蒸后黄瓜增产达16.7%~30.4%（Ren et al.，2018）。二甲二硫熏蒸可将黄瓜产量提高81.3%~116.1%（Mao et al.，2014；方文生等，2016）。土壤熏蒸能产生显著的增产效应，一方面是由于熏蒸显著降低了土壤中致病生物数量，减轻或消除土传病原物危害，使作物健康生长；另一方面是由于土壤熏蒸会影响土壤微生物群落结构及多样性，改变了微生物介导的土壤养分转换过程及养分存在的形态与数量，利于作物吸收养分。如熏蒸后导致土壤中可溶性氮磷大量累积，增加作物根际养分供应（颜冬冬，2010；黄斌，2020）。土壤熏蒸通过抑制氨氧化过程使土壤中铵态氮大量累积，促进作物对可吸收态氮素的吸收转运（Fang et al.，2019b）。同时，熏蒸对土壤微量元素也产生一定影响，如氯化苦熏蒸显著增加了可溶性Mn的含量（王前等，2018）。微量元素不仅是作物生长的必需元素，而且可以提高作物免疫力。

4 展望

我国土壤熏蒸事业从最初的熏蒸剂品种单一、施药设备简陋发展到现今的品种多样化、设备精细化、操作标准化，为我国土传病害的治理提供了重要技术保障。未来我国土壤熏蒸消毒事业的发展应重点围绕下面几个方向。首先，土壤熏蒸剂施药设备的稳定性更高，并向智能化、精准化发展。针对不同作物、不同土壤类型、以及不同应用场景（如露地、保护地、山地、林地）研发高效、可靠、便捷的器械，提高熏蒸效率和效果。其次，通过与非化学技术配合，提高土壤熏蒸消毒效果，减少熏蒸剂用量，降低应用成本和减少对环境的影响。最后，土壤熏蒸消毒需要掌握多学科的知识，未来需要更多专业化公司为农户提供社会化的服务。由有资质的公司进行专业化病虫害检测和诊断、针对性用药、取土效果评价、种植前药害检测、数据库记录。推进长久有效的土壤耕地保护机制，将土壤熏蒸与有机肥补充、有计划地

轮作配合,遏制我国土传病害重发、频发态势。

参 考 文 献（References）

Allan M, Leon C. 2013. IRF135, allyl isothiocyanate (AITC) regulatory and development update.//Processing of the annual international research conference on methyl bromide alternatives and emissions reductions. San Diego, California, November 4−6, 1

Cao AC, Duan XY, Yuan HZ. 2003. Screening of alternative technologies for soil disinfection with methyl bromide in China. Beijing: China Agricultural University Press (in Chinese) [曹坳程, 段霞瑜, 袁会珠. 2003. 中国甲基溴土壤消毒替代技术筛选. 北京: 中国农业大学出版社]

Cao AC, Guo MX, Yan DD, Mao LG, Wang QX, Li Y, Duan XY, Wang PS. 2014. Evaluation of sulfuryl fluoride as a soil fumigant in China. Pest Management Science, 70(2): 219−227

Cao AC, Yuan HZ, Duan XY. 2000. Alternative technologies for soil disinfection with methyl bromide in China. Beijing: China Agricultural University Press (in Chinese) [曹坳程, 袁会珠, 段霞瑜. 2000. 中国甲基溴土壤消毒替代技术. 北京: 中国农业大学出版社]

Chellemi DO, Olson SM, Mitchell DJ, Secker I, McSorley R. 1997. Adaptation of soil solarization to the integrated management of soilborne pests of tomato under humid conditions. Phytopathology, 87(3): 250−258

Cheng HY. 2021. Effects of soil activation after 1,3-dichloropropene fumigation on soil microbial community structure and tomato growth. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science (in Chinese) [程鸿燕. 2021. 1,3-二氯丙烯熏蒸后土壤活化对土壤微生物群落结构及番茄生长的影响. 北京: 中国农业科学院]

Cheng HY, Zhang DQ, Huang B, Song ZX, Ren LR, Hao BQ, Liu J, Zhu JH, Fang WS, Yan DD, 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

Cheng HY, Zhang DQ, Ren LR, Song ZX, Li QJ, Wu JJ, Fang WS, Huang B, Yan DD, Li Y, et al. 2021. Bio-activation of soil with beneficial microbes after soil fumigation reduces soil-borne pathogens and increases tomato yield. Environmental Pollution, 283: 117160

Fang WS. 2021. Succession of soil microbial community and soil key function after fumigation. Postdoctoral station thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science (in Chinese) [方文生. 2021. 土壤熏蒸后微生物群落及土壤关键功能演替规律. 博士后出站论文. 北京: 中国农业科学院]

Fang WS, Cao AC, Han DW, Liu PF, Yan DD, Wang QX. 2016. Studies on effect of two fumigants on cucumber main soil borne diseases and cucumber yield. China Vegetables, (7): 44−48 (in Chinese) [方文生, 曹坳程, 韩大伟, 刘鹏飞, 颜冬冬, 王秋霞. 2016. 两种熏蒸剂对土传病害的防控效果及黄瓜产量的影响. 中国蔬菜, (7): 44−48]

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, Li Y, Hua JL, Jin X, Yan DD, Cao AC. 2021. Microbial regulation of nitrous oxide emissions from chloropicrin-fumigated soil amended with biochar. Journal of Hazardous Materials, 429: 128060

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 Environmental Quality, 47(5): 1223−1231

Fang WS, Yan DD, Huang B, Ren ZJ, Wang XL, Liu XM, Li Y, Ouyang CB, Migheli Q, Cao AC, et al. 2019b. Biochemical pathways used by microorganisms to produce nitrous oxide emissions from soils fumigated with dimethyl disulfide or allyl isothiocyanate. Soil Biology and Biochemistry, 132: 1−13

Fang WS, Yan DD, Wang QX, Huang B, Ren ZJ, Wang XL, Wang XN, Li Y, Ouyang CB, Migheli Q, et al. 2019a. Changes in the abundance and community composition of different nitrogen cycling groups in response to fumigation with 1,3-dichloropropene. Science of the Total Environment, 650: 44−55

Fang WS, Yan DD, Wang XL, Huang B, Song ZX, Liu J, Liu XM, Wang QX, Li Y, Ouyang CB, et al. 2018b. Evidences of N_2O emissions in chloropicrin-fumigated soil. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66(44): 11580−11591

Fang WS, Yan DD, Wang XL, Huang B, Wang XN, Liu J, Liu XM, Li Y, Ouyang CB, Wang QX, et al. 2018c. Responses of nitrogen-cycling microorganisms to dazomet fumigation. Frontiers in Microbiology, 9: 2529

Han DW, Yan DD, Wang QX, Fang WS, Wang XL, Li J, Wang D, Li Y, Ouyang CB, Cao AC. 2018. Effects of soil type, temperature, moisture, application dose, fertilizer, and organic amendments on chemical properties and biodegradation of dimethyl disulfide in soil. Land Degradation & Development, 29(12): 4282−4290

Huang B. 2020. Effect of fumigation on soil carbon and phosphorus and its microbiological mechanism. PhD thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science (in Chinese) [黄斌. 2020. 熏蒸对土壤碳磷的影响及其微生物学作用机制. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院]

Ibekwe AM, Papiernik SK, Gan J, Yates SR, Yang CH, Crowley DE. 2001. Impact of fumigants on soil microbial communities. Applied and Environmental Microbiology, 67(7): 3245−3257

Li J, Huang B, Wang QX, Li Y, Fang WS, Han DW, Yan DD, Guo MX, Cao AC. 2017a. 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. Science of the Total Environment, 598: 1027−1036

Li J, Huang B, Wang QX, Li Y, Fang WS, Yan DD, Guo MX, Cao AC. 2017b. Effect of fumigation with chloropicrin on soil bacterial communities and genes encoding key enzymes involved in nitrogen cycling. Environmental Pollution, 227: 534−542

Liu J, Wang XL, Fang WS, Yan DD, Han DW, Huang B, Zhang Y, Li

Y, Ouyang CB, Cao AC, et al. 2020. Soil properties, presence of microorganisms, application dose, soil moisture and temperature influence the degradation rate of allyl isothiocyanate in soil. Chemosphere, 244: 125540

Liu XM, Cheng XK, Wang HY, Wang KY, Qiao K. 2015. Effect of fumigation with 1, 3-dichloropropene on soil bacterial communities. Chemosphere, 139: 379−385

Man YL, Liu J, Zhou Y, Zhu H, Ma HH, Zhang CJ, Liu ZM, Zhou XM. 2021. Evaluation of control effect of 20% isothiocyanate EW on root rot of *Lilium lancifolium* Thunb. Hunan Agricultural Sciences, (2): 79−81 (in Chinese) [满益龙, 刘佳, 周勇, 朱航, 马海昊, 张城嘉, 刘哲铭, 周小毛. 2021. 20%辣根素水乳剂对百合根腐病的防治效果评价. 湖南农业科学, (2): 79−81]

Mao LG, Jiang HY, Zhang L, Zhang YN, Sial MU, Yu HT, Cao AC. 2017. Replacing methyl bromide with a combination of 1, 3-dichloropropene and metam sodium for cucumber production in China. PLoS ONE, 12(11): e0188137

Mao LG, Yan DD, Wang QX, Li Y, Ouyang CB, Liu PF, Shen J, Guo MX, Cao AC. 2014. Evaluation of the combination of dimethyl disulfide and dazomet as an efficient methyl bromide alternative for cucumber production in China. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 62(21): 4864−4869

MBTOC. 2018. Report of methyl bromide technical options committee.// Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme

Parthipan B, Mahadevan A. 1995. Effects of methylisocyanate on soil microflora and the biochemical activity of soils. Environmental Pollution, 87(3): 283−287

Qin PW, Chen DM, Chen YX, Chen QM, Ren JB, Fu JJ, Liao BH, Jiang QP. 2019. Effect of 98% mianlong micro-granule on tobacco growth and bacterial wilt. Plant Doctor, 32(6): 34−38 (in Chinese) [秦平伟, 陈代明, 陈瑜欣, 陈庆明, 任江波, 付建军, 廖帮红, 江其朋. 2019. 98%棉隆微粒剂对烟草生长和青枯病发生的影响. 植物医生, 32(6): 34−38]

Ren Z, Li Y, Fang W, Yan D, Huang B, Zhu J, Wang X, Wang X, Wang Q, Guo M, et al. 2018. Evaluation of allyl isothiocyanate as a soil fumigant against soil-borne diseases in commercial tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) production in China. Pest Management Science, 74(9): 2146−2155

Ridge EH. 1976. Studies on soil fumigation II: effects on bacteria. Soil Biology and Biochemistry, 8(4): 249−253

Wang NT, Zhang N, Zhang AN, Ren XX, Wang JL. 2021. Effects of adding waste of edible fungi cultivation and chloropicrin fumigation on physical and chemical properties of continuous cropping soil and growth of strawberry. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 67(6): 1−5, 12 (in Chinese) [王宁堂, 张宁, 张阿宁, 任小西, 王军利. 2021. 食用菌栽培废料及氯化苦熏蒸对草莓连作土壤理化性质及生长的影响. 陕西农业科学, 67(6): 1−5, 12]

Wang Q, Huang B, Yan DD, Fang WS, Wang XN, Wang XL, Guo MX, Cao AC. 2018. Effects of chloropicrin treatment on the transformation of soil nitrogen and trace elements. Plant Protection, 44(6): 73−77, 98 (in Chinese) [王前, 黄斌, 颜冬冬, 方文生, 王晓宁, 王献礼, 郭美霞, 曹坳程. 2018. 氯化苦熏蒸处理对土壤氮素和微量元素转化的影响. 植物保护, 44(6): 73−77, 98]

Wang QJ, Ma Y, Yang H, Chang ZZ. 2014. Effect of biofumigation and chemical fumigation on soil microbial community structure and control of pepper *Phytophthora* blight. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 30(2): 507−518

Wang QX, Gao SD, Wang D, Spokas K, Cao AC, Yan DD. 2016. Mechanisms for 1,3-dichloropropene dissipation in biochar-amended soils. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 64(12): 2531−2540

Wang QX, Mao LG, Wang D, Yan DD, Ma TT, Liu PF, Zhang CL, Wang RQ, Guo MX, Cao AC. 2014. Emission reduction of 1,3-dichloropropene by soil amendment with biochar. Journal of Environmental Quality, 43(5): 1656−1662

Wang QX, Yan DD, Liu PF, Mao LG, Wang D, Fang WS, Li Y, Ouyang CB, Guo MX, Cao AC. 2015. Chloropicrin emission reduction by soil amendment with biochar. PLoS ONE, 10(6): e0129448

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, 曹坳程. 2017. 土壤熏蒸剂研究进展. 植物保护学报, 44(4): 529−543]

Wang XL, Fang WS, Yan DD, Han DW, Huang B, Ren ZJ, Liu J, Cao AC, Wang QX. 2018. Effect of films on dimethyl disulfide emissions, vertical distribution in soil and residues remaining after fumigation. Ecotoxicology and Environmental Safety, 163: 76−83

Wang XL, Fang WS, Yan DD, Han DW, Liu J, Ren ZJ, Ouyang CB, Li Y, Wang QX, Cao AC. 2019. Evaluation of the influence of temperature and relative humidity on the permeability of four films to the fumigant dimethyl disulfide. Journal of Environmental Management, 236: 687−694

Wang XN, Cao AC, Yan DD, Wang Q, Huang B, Zhu JH, Wang QX, Li Y, Ouyang CB, Guo MX, et al. 2020. Evaluation of soil flame disinfestation (SFD) for controlling weeds, nematodes and fungi. Journal of Integrative Agriculture, 19(1): 164−172

Xie HW, Yan DD, Mao LG, Wu ZF, Guo MX, Wang QX, Li Y, Cao AC. 2012. Efficacies of fumigants against soil-borne pathogens and their influences on soil microbial community. Chinese Agricultural Science Bulletin, 28(12): 223−229 (in Chinese) [谢红薇, 颜冬冬, 毛连纲, 吴篆芳, 郭美霞, 王秋霞, 李园, 曹坳程. 2012. 熏蒸剂对土传病原菌的防效和对土壤微生物群落的影响. 中国农学通报, 28(12): 223−229]

Yan DD. 2010. Effects of fumigants on soil nitrogen transformation. Master thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science (in Chinese) [颜冬冬. 2010. 熏蒸剂对土壤氮素转化的影响. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院]

Zhou X, Zhang TX, Jia Q, Li HL, Liu YQ, Liu R. 2021. Effects of soil fumigants on the soil-borne disease control and yield of ginger. Plant Doctor, 34(3): 40−44 (in Chinese) [周弦, 张天晓, 贾切, 李洪雷, 刘奕清, 刘燃. 2021. 土壤熏蒸剂对生姜土传病害的防治效果和产量的影响. 植物医生, 34(3): 40−44]

Zhu JH, Cao AC, Wu JJ, Fang WS, Huang B, Yan DD, Wang QX, Li Y. 2021. Effects of chloropicrin fumigation combined with biochar on soil bacterial and fungal communities and *Fusarium oxysporum*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 220: 112414

(责任编辑:李美娟)