

◆ 专论:熏蒸剂 (特约稿) ◆

熏蒸剂作用机制研究进展

刘静怡,王鑫,李园,方文生,曹坳程,颜冬冬*,王秋霞*

(中国农业科学院植物保护研究所,北京 100193)

摘要:对溴甲烷、氯化苦、棉隆、1,3-二氯丙烯、威百亩、二甲基二硫、异硫氰酸烯丙酯、异硫氰酸甲酯、碘甲烷、硫酰氟、磷化铝等常见熏蒸剂的作用机制从不同方面进行具体阐述与分类,以期为熏蒸剂的研发和使用提供理论基础。

关键词:熏蒸剂;土壤熏蒸;仓储熏蒸;作用机制

中图分类号:S 482.6 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2024.01.001

Research advances in the mechanism of fumigant

LIU Jingyi, WANG Xin, LI Yuan, FANG Wensheng, CAO Aocheng, YAN Dongdong*, WANG Qiuxia*

(Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: Fumigants are highly efficient class of pesticides due to their unique physicochemical properties, strong diffusion, distribution and penetration capabilities, and have a unique fumigation mode to exert pesticide activity. In this paper, the mode of action of several common fumigants: methyl bromide, chloropicrin, dazomet, 1,3-dichloropropene, metam-sodium, dimethyl disulfide, allyl isothiocyanate, methyl isothiocyanate, methyl iodide, sulfuryl fluoride, and aluminium phosphide were elaborated and classified in different aspects, with a view to providing theoretical bases for the research and development of fumigant and its application.

Key words: fumigant; soil fumigation; storage fumigation; mode of action

在全球范围内,熏蒸技术作为一种重要且高效的快速消除病害及虫害的手段,广泛应用于土壤消毒^[1]、仓储熏蒸^[2-3]、原木上的蛀干害虫^[4-5]及商品保护^[6]。近年来,由于高附加值作物的连年种植,大量的病原菌和虫卵在土壤中积累,严重破坏了土壤的生态环境,引发了土传病害^[7]。土传病害可使作物减产60%以上甚至造成绝收,给农民带来了巨大的经济损失^[8]。目前,在作物种植前进行土壤消毒是控制土传病害最有效且稳定的方法^[9]。在仓储方面,针对粮食收获后收购、集中存储、跨区域调运等储粮的各个环节中难以避免的虫害问题,粮仓熏蒸中的化学药剂熏蒸是我国当前快速有效杀灭害虫的主要手段之一^[2]。因此,遵从IPM战略,开发研制出高效低毒的粮食熏蒸剂尤为重要^[10]。

1 熏蒸剂概述

熏蒸剂本身或其活性成分易气化成气态分子分散在空气中,高效抵达土壤、粮仓、耐用品、易腐蚀品等环境,实现对害虫、病原体、植物病原线虫、鼠害及其他有害生物的有效治理^[11]。与其他方法相比,熏蒸剂具有独特的优势:①穿透能力强且覆盖范围广。能穿透土壤、农产品、木材等,杀灭位于深层的有害生物,接触到隐蔽性病虫害或其他方法难以接触的分布区域^[12]。②防治谱广。许多熏蒸剂属于多作用位点的农药,具有多靶标性,对多种有害生物均有防治效果。③具有增产效果。研究表明^[13-16],土壤熏蒸剂可以提高对作物生长起着关键作用的土壤中的铵态氮、硝态氮、有效磷、速效钾等微量元素

收稿日期:2024-02-02

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3501502, 2023YFD1701205)

作者简介:刘静怡(2001—),女,哈尔滨人,硕士研究生,主要从事新型熏蒸剂作用机制研究。E-mail: ljiy27272022@163.com

通信作者:颜冬冬(1986—),男,湖北仙桃人,博士,研究员,主要从事新型熏蒸剂作用机制研究。E-mail: yandongdong@caas.cn

共同通信作者:王秋霞(1977—),女,黑龙江牡丹江人,博士,研究员,从事土壤熏蒸剂应用技术研究。E-mail: wangqiuxia@caas.cn

的含量以及土壤酶的活性,减少土传病原菌及线虫的数量,从而起到对作物增产的效果。④效率高。熏蒸消毒省时且用药量较少,一次可处理大量样本,远比传统施药方法(喷雾、喷粉、撒施等)速度快。

传统广泛使用的熏蒸剂种类主要有:①熏蒸剂溴甲烷。虽然溴甲烷是最有效的熏蒸剂之一,但在《蒙特利尔议定书》中被列为消耗臭氧层物质,2015年起在发展中国家被逐步淘汰。因此,相关学者开展了大量研究,以期找到在生态上可接受、经济上可行的替代品^[7]。目前,已筛选出高效、无残留的多种高效土壤熏蒸剂,包括氯化苦、棉隆(dazomet, DZ)、

威百亩(metam-sodium)、二甲基二硫(DMDS)、异硫氰酸烯丙酯(AITC)等^[1]。②仓储熏蒸剂磷化铝。磷化铝极易分解,分解后产生的磷化氢气体作用于储粮害虫,被行业称为储粮熏蒸杀虫剂^[9]。③以硫酰氟为代表的建筑熏蒸处理用熏蒸剂^[18],可广泛用于家居^[19]、库房^[20]、集装箱^[21]、加工车间^[22]等场所杀菌及消灭害虫。硫酰氟的物理特性使其能够快速扩散并渗透到完整的木材或商品中,且无气味残留问题^[19]。1961年以来,硫酰氟一直用作防治木材白蚁的熏蒸处理剂^[23]。

表1为常见熏蒸剂的理化性质^[24-25]。

表1 常见熏蒸剂的理化性质

熏蒸剂	分子式	熔点/℃	沸点/℃	水溶性/(g/L)	特定温度下饱和蒸气压	
					饱和蒸气压/kPa	温度/℃
溴甲烷(methyl bromide)	CH ₃ Br	-94.6	3.6	13.4(25℃)	213.3	20
碘甲烷(methyl iodide)	CH ₃ I	-66.4	42.6	14.0(25℃)	53.1	20
磷化氢(phosphine)	PH ₃	-133.8	-87.5	3.0(20℃)	3 488.0	20
氯化苦(chloropicrin)	CCl ₃ NO ₂	-64.0	112.4	1.62(25℃)	3.5	25
顺式1,3-二氯丙烯((Z)-1,3-dichloropropene)	C ₃ H ₄ Cl ₂	-50.0	104.3	2.32(25℃)	4.6	25
反式1,3-二氯丙烯((E)-1,3-dichloropropene)	C ₃ H ₄ Cl ₂	-95.0	112.0	2.18(25℃)	3.1	25
二甲基二硫(dimethyl disulfide)	C ₂ H ₆ S ₂	-84.72	117.0	4.2(20℃)	2.9	20
异硫氰酸烯丙酯(allyl isothiocyanate)	C ₄ H ₇ NS	-80.0	152.0	2.0(20℃)	1.33	38
异硫氰酸甲酯(methyl isothiocyanate)	C ₂ H ₅ NS	36.0	119.0	8.2(25℃)	2.5	20
硫酰氟(sulfuryl fluoride)	SO ₂ F ₂	-137.7	-55.4	0.75(25℃)	1 700.0	25

农业方面,熏蒸剂主要用于土壤熏蒸处理及粮仓熏蒸处理。土壤熏蒸处理分为:①化学熏蒸,如使用氯化苦、棉隆等;②生物熏蒸,如利用新鲜鸡粪或新鲜牛粪等动植物废弃物,与土壤混合后覆膜^[26]。目前,国际上已经登记使用的土壤熏蒸剂有:氯化苦、棉隆、威百亩、硫酰氟、1,3-二氯丙烯(1,3-D)、二甲基二硫、碘甲烷、异硫氰酸烯丙酯、乙二腈(ethanedinitrile, EDN)。尚未登记的潜在熏蒸剂品种有:甲酸乙酯(ethyl formate)、糠醛(furfural)、丙烯醛(2-propenal)^[9]。磷化铝(aluminium phosphide)及硫酰氟作为储粮熏蒸剂目前已在国内外广泛登记使用,硫酰氟也作为土壤熏蒸剂在我国登记用于防治根结线虫病的发生。此外,叠氮化物、乙蒜素等熏蒸剂也在陆续研发中。

目前,熏蒸剂对靶标生物作用机制方面的研究相对较少,大多围绕熏蒸剂对土壤微生物、土壤养分、农药残留、环境行为等方面进行研究。随着熏蒸剂的频繁使用,害虫和病原菌可能会对其产生抗药性^[27]。深入研究其作用机制有利于为新型熏蒸剂的设计和合成提供理论依据,推动农药科技创新,延

缓或避免抗药性的出现。在探究熏蒸剂作用机制方面,对AITC、DMDS等新型熏蒸剂的研究相对其他熏蒸剂较多。

2 熏蒸剂分子结构与毒性效应的关系

熏蒸剂是以气体分子形式进行作用的药剂,熏蒸剂的分子结构与其毒性效应之间存在直接关系。不同的熏蒸剂,其分子结构决定了它们的物理化学性质(如挥发性、溶解度、稳定性等),进而影响其在环境中的分布和作用方式,以及对目标生物体的毒害效果。

2.1 官能团活性

熏蒸剂分子上的特定官能团,如卤素、二硫键、氨基甲酸酯基团等,可能与生物体内的酶或蛋白质发生反应,干扰正常的生理功能。如异硫氰酸甲酯(MITC)及AITC中的-N=C=S官能团可与某些具有亲核位点的蛋白和酶等发生反应,使蛋白质失活^[28];磷化铝同时含有共价键、离子键、金属键,其化学性质较为活泼,遇水可迅速反应生成有毒的磷化氢气体,从而起到杀虫的作用^[29]。

2.2 相对分子质量与挥发性

相对分子质量大小与扩散及渗透能力相关,而挥发性则与药剂的饱和蒸气压有关。较小的相对分子质量通常意味着较高的扩散和渗透能力,有助于熏蒸剂快速分散到环境中,并渗透到靶标生物的细微部位,直接影响药效。如DMDS是一种以硫化物为基础的挥发性化合物^[30],其相对分子质量较小,但扩散及渗透能力很强,对土传病原菌及根结线虫防治效果极佳。GÓMEZ等^[31]在一个有12年根结线虫侵染史的温室大棚中进行DMDS的熏蒸试验。施药前根结线虫J2每100 cm³土壤364~4 044条,经过处理后,土壤中未发现幼虫,且消毒区的尖孢镰刀菌种群密度显著低于未处理的对照区,从第一茬到第二茬,种群减少了66.18%~77.55%。

2.3 稳定性和持久性

不同熏蒸剂由于其分子结构、官能团及所处环境的不同,其在土壤中降解机制及半衰期也不尽相同。如土壤中的微生物主要降解MITC中的异硫氰酸酯官能团,而1,3-D具有许多能将其降解并将其作为唯一的碳和能量来源的细菌,且反式异构体在土壤中的降解速率大于顺式^[32]。此外,温度及湿度对土壤微生物的降解影响较大,GAN等^[33]发现随着温度的升高,熏蒸剂的降解速率增加,但当温度高于30℃时,微生物对1,3-D的降解受到显著抑制,而对MITC的微生物降解有很大的刺激作用。随着土壤含水率的增加,1,3-D的降解速度加快,但MITC的降解速度减小。

3 熏蒸剂对生物膜的影响及穿透机理

熏蒸剂对生物膜的影响及穿透机理是其杀虫、杀菌或杀线虫活性的重要影响因素。生物膜,如昆虫的表皮、微生物的细胞膜、细胞壁等,通常是阻止外界物质入侵的第一道防线^[34]。熏蒸剂必须克服这一障碍才能有效发挥作用。

3.1 溶解及扩散作用

多数熏蒸剂都具有较强的极性,难溶于水,易溶于有机溶剂,如1,3-D难溶于水,可溶于丙酮、苯及四氯化碳。碘甲烷具有较低的蒸气压及较高的沸点,且其在土壤中的吸附系数 K_d 较大,亨利常数 K_H 较小,在土壤中较易吸附,扩散性良好^[35];硫酰氟的渗透扩散能力较强,是溴甲烷的5~9倍^[36]。由于熏蒸剂的气体分子优势,某些熏蒸剂还可以通过扩散的方式进入生物体中,如昆虫对磷化氢的吸收是通过体壁或气门的扩散作用实现^[37]。

3.2 直接破坏生物膜结构

Lin等^[38]研究发现,AITC可以破坏细胞膜,当AITC质量浓度为25 mg/mL时,可使活的大肠杆菌数量降至1/1 000,且AITC对革兰氏阴性菌比革兰氏阳性菌更有效。Zhang等^[39]施用6 mg/L MITC后12 h,其对尖孢镰刀菌的抑制率为80%,观察发现,尖孢镰刀菌细胞壁和细胞膜皱缩、液泡增多,且与尖孢镰刀菌细胞壁相关的几丁质合成酶的一些关键基因的表达受到影响,膜转运蛋白活性下调,过氧化氢酶、超氧化物歧化酶活性降低。小核盘菌是一种寄生范围较广的病原菌,Tyagi等^[40]采用双培养皿试验法,测定了DMDS对其菌丝、菌核形成及萌发的抑制作用。结果表明,在浓度为75~100 μmol/L时,DMDS完全抑制了菌丝的生长,染色后用荧光显微镜、扫描电镜和透射电镜观察细胞壁和细胞膜的完整性,发现细胞壁破坏,细胞质泄露,细胞器退化,液泡变大,细胞质积累。再利用高效液相色谱法研究麦角甾醇含量与去甲基酶基因表达,经DMDS处理后,麦角甾醇含量比对照组降低了80%,此外,DMDS处理显著下调了CYP51的转录水平。试验结果表明,抑制麦角甾醇的生物合成是DMDS影响小核盘菌生长的主要作用方式。

一些植物源或生物基的熏蒸剂如某些精油成分,在一定条件下也可能影响细胞膜上的载体蛋白,造成离子通道受损。于泓鹏等^[41]采用肉桂精油水浴加热的气相熏蒸方式对白色葡萄球菌进行抗菌试验,通过测定溶液的电导率来确定细胞膜的通透性。随着精油浓度的增加,电导率迅速降低,推测细胞膜载体蛋白发生变性,从而造成细菌体内离子外流,降低了细胞膜的通透性。尽管它们通常不是传统意义上的熏蒸剂,但在低浓度下用于熏蒸或处理时,也表现出对膜结构和功能的调节作用,为熏蒸剂的研发及作用机制的研究提供了一定的参考。

4 熏蒸剂干扰生物体新陈代谢过程的途径

4.1 细胞中毒引起的直接损伤

当熏蒸剂作用于病原物时,可能会导致细胞中毒概率的增大。如氯化苦为中等毒性农药,所产生的气体比空气重5倍,其蒸气进入生物体组织后,会生成强酸性物质,使细胞肿胀腐烂,还可使细胞脱水,细胞内蛋白质沉淀,造成生理机能破坏,使细胞中毒死亡^[36]。Fang等^[42]研究表明:在质量浓度为1.2 μg/L时,氯化苦几乎完全抑制了尖孢镰刀菌菌丝的生长,且对镰刀菌的呼吸有轻微的抑制作用。

通过监测真菌释放的二氧化碳量,将其作为评估真菌呼吸强度的一个指标,发现抑制程度随浓度的增加而增加。且超微结构研究表明,氯化苦质量浓度从1.2 $\mu\text{g/L}$ 增加到2.4 $\mu\text{g/L}$ 时,细胞壁的分层越来越明显,导致细胞膜破裂和细胞质渗漏,细胞器细胞质外流。Wang等^[43]根据高通量测序结果判定,经氯化苦熏蒸1个月后,三七田间土壤中镰刀菌种群量明显减少,且熏蒸改变了土壤中木霉属、毛壳属、变形菌和绿弯菌门的相对丰度,同时抑制了大量的镰刀菌和疫霉菌。

4.2 呼吸链抑制

许多熏蒸剂能够直接或间接地作用于细胞内的氧化磷酸化过程,特别是线粒体的电子传递链。Calmes等^[44]研究了AITC对油菜链格孢菌的作用机制,发现真菌的耗氧率降低。使用JC-1染料的绿色/红色荧光比率作为线粒体膜电位的指示器,也是线粒体功能的指标,观察结果表明,AITC可以迅速诱导线粒体功能和细胞能量代谢的改变。用水溶性荧光探针测定AITC作用60 min后菌丝的耗氧量,发现AITC明显抑制了芸苔菌野生型(WT)菌株Abra43细胞的呼吸,在10 mmol/L时抑制率达40%。此外,Zhang等^[45]提出了细胞骨架坍塌和线粒体功能障碍是AITC对玉米象的致死机制。张超^[46]研究表明,用辣根素处理玉米象后中毒试虫线粒体结构受到显著破损,辣根素熏蒸对线粒体呼吸链的抑制效果会引起试虫体内活性氧(ROS)的产生和累积,并对ROS相关酶系有不同的影响。硫酰氟是一种良好的土壤及仓储熏蒸剂,早期对于杀灭害虫白蚁的作用机制被解释为阻断了糖酵解和脂肪酸循环,氧化磷酸化过程受到了一定的影响^[47]。即通过抑制昆虫对氧的吸收,破坏昆虫正常的磷酸盐平衡,阻止昆虫体内的脂肪酸水解,从而导致昆虫的死亡^[48]。磷化氢杀虫机理是通过呼吸或表皮进入虫体后,与细胞色素氧化酶结合使该酶失去活性,造成生物氧化过程中断,害虫因窒息而死亡^[49]。Wang等^[50]采用DMDS对南方根结线虫进行触杀及熏蒸试验。结果表明,药剂干扰了钙离子通道,影响了呼吸作用氧化磷酸化的不同复合体。熏蒸和触杀模式的作用机制不同:在触杀方式下DMDS破坏了线虫的体表结构,作为解偶联剂干扰了ATP合酶,刺激了线虫的呼吸;在熏蒸方式下DMDS通过嗅觉感知-氧交换过程进入线虫体内,最终作用于呼吸作用电子传递链复合体IV或复合体I,与氧化损伤叠加,使线虫死亡。

4.3 抑制酶活性

熏蒸剂可通过与细胞内各种酶的活性部位结合,改变其构象或直接抑制其功能,进而影响一系列生化反应的进行;还可以作为竞争性抑制剂与底物竞争酶的活性位点,阻止正常的代谢中间产物的转化。

1,3-D在生物体内发生烷基化反应使酶失去活性,从而导致害虫死亡^[51]。溴甲烷能够与巯基(-SH)结合,对害虫和病原微生物体内的多种酶产生不可逆的抑制作用,从而破坏其正常的生理功能^[6]。Isshiki等^[52]采用AITC作用于酵母菌进行的研究表明,通过裂解二硫键和干扰电子传递链中的特定酶而使非特异性酶失活是其抑制酵母菌生长的可能机制。DZ可通过MITC的巯基化反应来破坏生物体内酶结构,达到杀虫灭菌的效果^[26]。作为一种有潜力的防治土壤线虫的绿色熏蒸剂,经乙蒜素处理后,半胱氨酸、天冬氨酸氨基转移酶被激活,通过其氧化特性触发酵母细胞的凋亡,可以引起关键酶的特异性氧化失活^[53-54]。磷化氢还可抑制虫体的过氧化氢酶,使其失去催化分解过氧化氢的能力,导致虫体内过氧化氢的积累,引起害虫生理中毒,致使害虫病变或死亡^[49]。

4.4 核酸损伤与蛋白质合成干扰

化学熏蒸剂对有害生物体内蛋白质具有不可逆的化学作用,可与蛋白质发生反应,导致蛋白质变性和失活,从而破坏依赖这些蛋白质的生理代谢途径。棉隆和威百亩能在土壤中水解,分解成有毒的MITC,可以通过氨基甲酰化反应使蛋白失活^[51]。有研究表明,AITC可以在抑制微生物生长的浓度下改变蛋白质的结构,氧化的谷胱甘肽被AITC在二硫键上切割,并在这些蛋白质的赖氨酸和精氨酸残基上形成硫代类似物^[38]。AITC在水溶液中不稳定且容易分解。Kawakishi^[55-56]等发现,AITC还攻击蛋白质中赖氨酸和精氨酸残基的游离氨基,通过氨基酸分析和游离氨基的测定检测到该游离氨基形成了类似硫脲的衍生物。此外,异硫氰酸酯对硫原子的亲电攻击还可将胱氨酸残基中的二硫键氧化断裂为二硫代氨基甲酸酯和硫酸盐^[57]。AITC具有引起位点特异性DNA损伤的能力,具有较短亚甲基链的ITC可以产生更大量的-SH基团,导致更强的DNA损伤,而DNA的氧化损伤可能在异硫氰酸烯丙酯致癌过程中起重要作用^[58]。

4.5 神经元膜电位干扰

DMDS的作用机制可以理解为引起线粒体功能

障碍及激活K-ATP通道^[59]。Dugravot等^[60]发现,二甲基二硫杀虫效果良好,其通过对线粒体呼吸链复合体IV(细胞色素氧化酶)的抑制,降低细胞内的ATP浓度,从而激活神经元K-ATP通道,引起膜超极化并导致神经元活动的降低。Gautier等^[61]采用全细胞膜片钳技术、钙离子成像和反义寡核苷酸设计策略,研究了DMDS对蟑螂神经分泌细胞DUM神经元的影响,证实了钙激活的钾电流K-Ca是DMDS的作用靶点。

总之,熏蒸剂通过以上方式或其他方式干扰生

物体内的新陈代谢途径,导致生物体生理机能受损甚至死亡。不同种类的熏蒸剂因其独特的化学结构和毒性机制,对生物体新陈代谢的具体影响也有所不同,可以看出,熏蒸剂的作用位点较多^[62]。多数熏蒸剂可以通过破坏生物体内酶的合成以及干扰呼吸链而对靶标生物起作用。异硫氰酸烯丙酯对靶标生物的作用方式较为多样,且其为来源于十字花科植物的次生代谢物,对环境影响较小,是一种很有潜力的熏蒸剂。

常见熏蒸剂作用机制分类见表2。

表2 熏蒸剂作用机制分类

代表熏蒸剂品种	引起细胞中毒	呼吸抑制	酶活性抑制	直接破坏生物膜	蛋白质合成干扰	神经元膜电位干扰
硫酰氟		√				√
氯化苦	√		√			
磷化铝/磷化氢		√	√			
AITC		√	√		√	
MITC		√	√	√	√	
DMDS		√	√	√		√
1,3-D			√			
溴甲烷	√	√	√			
乙蒜素			√	√		
碘甲烷	√	√	√			

5 结语

5.1 针对特定靶标生物优化熏蒸剂配方设计

熏蒸剂具有广谱性,可一次杀灭土壤中多数有害微生物,但也会同时影响土壤中其他微生物的种群数量^[63-64]。因此,应提高熏蒸剂的选择性,降低影响非靶标生物的风险。针对靶标生物的特性研发其适用的药剂,探索熏蒸剂对靶标生物的作用机制,在降低有害生物的同时减少对其他菌落的影响。

5.2 环境友好型熏蒸剂的研发趋势与挑战

目前,国家推进化肥、农药减量化,生物熏蒸、化学熏蒸与生物熏蒸相结合可能会成为新的研究方向^[65]。生物源制剂在维持环境友好方面起着重要的作用,但由于其结构的不稳定性,目前难以大规模进行土壤熏蒸使用。如植物根结线虫病较难防治,是一种在世界范围内具有重要经济意义的专性内寄生植物线虫^[66];淡紫拟青霉是一种线虫寄生菌,将熏蒸剂与生防制剂结合进行熏蒸则对环境友好^[67]。

5.3 展望

熏蒸剂的重复使用,可能会导致土壤中熏蒸剂消耗速率加快,有效时间缩短^[68]。目前,对熏蒸剂机制的研究还有待加强,生物熏蒸剂的大面积推广也

需要时间去实现。对于熏蒸剂作用机制的研发可以为新型土壤熏蒸剂的安全、高效应用提供理论依据。

参考文献

- [1] 曹堃程,方文生,李园,等.我国土壤熏蒸消毒60年回顾[J].植物保护学报,2022,49(1):325-335.
- [2] 万拯群.论十大熏蒸技术[J].黑龙江粮食,2008(3):40-44.
- [3] 徐永安.储粮害虫防治技术进展与展望(上):熏蒸杀虫剂篇[J].粮油食品科技,2022,30(4):95-104.
- [4] 辛国.果树蛀干害虫的防治[J].果树实用技术与信息,2000(2):38-39.
- [5] 徐国淦.熏蒸剂硫酰氟及熏蒸处理设备在我国的研究[J].植物检疫,1998,12(1):38-46.
- [6] 王跃进.溴甲烷空间熏蒸及其替代[J].精细与专用化学品,1999,7(22):13-15.
- [7] 曹堃程,张大琪,方文生,等.土传病害防治技术进展及面临的挑战[J].植物保护,2023,49(5):260-269.
- [8] 国家环境保护总局.中国甲基溴土壤消毒替代技术筛选[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [9] 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.
- [10] 徐永安.储粮害虫防治技术进展与展望(下):综合防治技术篇[J].粮油食品科技,2022,30(4):105-110.
- [11] 陈翠琴,梁艳辉,祝杰.土壤熏蒸剂专利技术分析[J].现代农药,

- 2022, 21(4): 26-30.
- [12] 曹堃程, 郭美霞, 王秋霞, 等. 世界土壤消毒技术进展[J]. 中国蔬菜, 2010 (21): 17-22.
- [13] 李青杰, 方文生, 张大琪, 等. 棉隆熏蒸联合生物炭和沸石对土壤微生物生态及土传病原菌的影响[J]. 植物保护, 2022, 48(4): 150-157.
- [14] LI Q, ANDOM O, FANG W, et al. Effects of soil amendments on soil properties, soil-borne pathogens, and strawberry growth after dazomet fumigation[J]. Agriculture, 2023, 14(1): 9.
- [15] 任立瑞, 李文静, 李青杰, 等. 不同熏蒸剂复配对生姜田土传病害的防控及产量的影响[J]. 农药, 2022, 61(9): 674-678.
- [16] LI Q, ZHANG D, CHENG H, et al. Organic fertilizers activate soil enzyme activities and promote the recovery of soil beneficial microorganisms after dazomet fumigation[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 309: 114666.
- [17] LIU X, CHENG X, WANG H, et al. Effect of fumigation with 1,3-dichloropropene on soil bacterial communities[J]. Chemosphere, 2015, 139: 379-385.
- [18] BELL C. Fumigation in the 21st century[J]. Crop Protection, 2000, 19(8-10): 563-569.
- [19] MEIKLE R W, STEWART D. Structural fumigants, the residue potential of sulfuryl fluoride, methyl bromide, and methanesulfonyl fluoride in structural fumigations [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1962, 10(5): 393-397.
- [20] 王殿轩, 皇欣, 陆群, 等. 大型库存档案硫酰氟熏蒸与杀虫效果试验[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 71-75.
- [21] 李金有, 孙薇, 李西标, 等. 硫酰氟熏蒸处理集装箱扩散规律初步研究[J]. 检验检疫学刊, 2014, 24(2): 62-64.
- [22] 王智颖, 王殿轩, 郭超, 等. 大型面粉加工车间硫酰氟整体熏蒸杀虫效果评估 [J/OL]. 中国粮油学报: 1-10 [2024-03-05]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000621>.
- [23] BALTACI D, KLEMENTZ D, GEROWITT B, et al. Lethal effects of sulfuryl fluoride on eggs of different ages and other life stages of the warehouse moth *Ephesia elutella* (Hübner)[J]. Journal of Stored Products Research, 2009, 45(1): 19-23.
- [24] RUZO L O. Physical, chemical and environmental properties of selected chemical alternatives for the pre-plant use of methyl bromide as soil fumigant[J]. Pest Management Science: Formerly Pesticide Science, 2006, 62(2): 99-113.
- [25] 杨华铮, 邹小毛, 朱有全, 等. 现代农药化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [26] ZHANG D, CHENG H, HAO B, et al. Fresh chicken manure fumigation reduces the inhibition time of chloropicrin on soil bacteria and fungi and increases beneficial microorganisms [J]. Environmental Pollution, 2021, 286: 117460.
- [27] 郭国勇. 关于克服储粮害虫抗药性的探讨: 多级混合缓释熏蒸 [J]. 粮油仓储科技通讯, 2003 (6): 51-52.
- [28] 方文生, 王秋霞, 颜冬冬, 等. 土壤熏蒸剂棉隆防治土传病害研究进展及未来发展趋势[J]. 植物保护学报, 2023, 50(1): 40-49.
- [29] QIAO K, ZHANG H, WANG H, et al. Efficacy of aluminium phosphide as a soil fumigant against nematode and weed in tomato crop[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(3): 570-574.
- [30] YAN D, CAO A, WANG Q, et al. Dimethyl disulfide (DMDS) as an effective soil fumigant against nematodes in China[J]. PLoS One, 2019, 14(10): e0224456.
- [31] GÓMEZ-TENORIO M A, TELLO J C, ZANÓ N M J, et al. Soil disinfestation with dimethyl disulfide (DMDS) to control *Meloidogyne* and *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* in a tomato greenhouse[J]. Crop Protection, 2018, 112: 133-140.
- [32] DUNGAN R S, YATES S R. Degradation of fumigant pesticides: 1,3-dichloropropene, methyl isothiocyanate, chloropicrin, and methyl bromide[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(3): 279-286.
- [33] GAN J, PAPIERNIK S, YATES S, et al. Temperature and moisture effects on fumigant degradation in soil[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(5): 1436-1441.
- [34] 蒲宇辰, 侯有明, 石章红, 等. 昆虫防御分泌物及体内体外免疫权衡[J]. 昆虫学报, 2017, 60(8): 962-974.
- [35] GAN J, YATES S R. Degradation and phase partition of methyl iodide in soil [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1996, 44(12): 4001-4008.
- [36] 张玉聚, 李洪连, 张振臣, 等. 世界农药新品种技术大全 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010.
- [37] NAKAKITA H, KURODA J. Differences in phosphine uptake between susceptible and resistant strains of insects[J]. Journal of Pesticide Science, 1986, 11(1): 21-26.
- [38] LIN C M, PRESTON III J F, WEI C I. Antibacterial mechanism of allyl isothiocyanate[J]. Journal of Food Protection, 2000, 63(6): 727-734.
- [39] ZHANG D, REN L, WANG Q, et al. Systematic assessment of the antifungal mechanism of soil fumigant methyl isothiocyanate against *Fusarium oxysporum*[J]. Environmental Pollution, 2024, 341: 122791.
- [40] TYAGI S, LEE K-J, SHUKLA P, et al. Dimethyl disulfide exerts antifungal activity against *Sclerotinia minor* by damaging its membrane and induces systemic resistance in host plants [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 6547.
- [41] 于泓鹏, 罗敬朋, 邹金池, 等. 肉桂精油气相熏蒸对白色葡萄球菌的抗菌机制[J]. 食品科技, 2023, 48(9): 52-56.
- [42] FANG W, LIU X, SONG Z, et al. Mechanism of the antifungal action of chloropicrin fumigation against *Panax notoginseng* root rot caused by *Fusarium solani*[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2022, 121: 101859.
- [43] WANG X, WANG Q, LI W, et al. Long-term effects of chloropicrin fumigation on soil microbe recovery and growth promotion of *Panax notoginseng*[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1225944.
- [44] CALMES B, N'GUYEN G, DUMUR J, et al. Glucosinolate-derived isothiocyanates impact mitochondrial function in fungal cells and elicit an oxidative stress response necessary for growth recovery[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 414.
- [45] ZHANG C, MA Z, ZHANG X, et al. Transcriptomic alterations in

- Strophilus zeamais* in response to allyl isothiocyanate fumigation [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2017, 137: 62-70.
- [46] 张超. 辣根素熏蒸对玉米象线粒体作用机理研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [47] MEIKLE R, STEWART D, GLOBUS O. Fumigant mode of action, drywood termite metabolism of *Vikane fumigant* as shown by labeled pool technique[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1963, 11(3): 226-230.
- [48] 裴增辉. 硫酰氟与防护剂综合防治储粮害虫应用效果分析[J]. *食品安全导刊*, 2022 (23): 74-76.
- [49] 翟燕萍, 沈美庆, 王军, 等. 磷化氢熏蒸剂的研究进展[J]. *化学工业与工程*, 2003, 20(4): 248-250.
- [50] WANG Q, WANG X, ZHANG D, et al. Transcriptome reveals the toxicity difference of dimethyl disulfide by contact and fumigation on *Meloidogyne incognita* through calcium channel-mediated oxidative phosphorylation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 460: 132268.
- [51] 张典利. 1, 3-D消毒连作土壤对细菌群落及氮素转化的影响[D]. 济南: 山东农业大学, 2021.
- [52] ISSHIKI K, TOKUOKA K, MORI R, et al. Preliminary examination of allyl isothiocyanate vapor for food preservation[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 1992, 56(9): 1476-1477.
- [53] LI W, REN L, LI Q, et al. Evaluation of ethylcin as a potential soil fumigant in commercial tomato production in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 854: 158520.
- [54] GRUHLKE M C, PORTZ D, STITZ M, et al. Allicin disrupts the cell's electrochemical potential and induces apoptosis in yeast[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2010, 49(12): 1916-1924.
- [55] KAWAKISHI S, KANEKO T. Interaction of proteins with allyl isothiocyanate[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1987, 35(1): 85-88.
- [56] KAWAKISHI S, KANEKO T. Interaction of oxidized glutathione with allyl isothiocyanate[J]. *Phytochemistry*, 1985, 24(4): 715-718.
- [57] KAWAKISHI S, NAMIKI M. Oxidative cleavage of the disulfide bond of cystine by allyl isothiocyanate[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1982, 30(3): 618-620.
- [58] MURATA M, YAMASHITA N, INOUE S, et al. Mechanism of oxidative DNA damage induced by carcinogenic allyl isothiocyanate [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2000, 28(5): 797-805.
- [59] 王献礼. 二甲基二硫土壤中迁移及大气散发规律与调控研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [60] DUGRAVOT S, GROLLEAU F, MACHEREL D, et al. Dimethyl disulfide exerts insecticidal neurotoxicity through mitochondrial dysfunction and activation of insect KATP channels[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2003, 90(1): 259-270.
- [61] GAUTIER H, AUGER J, LEGROS C, et al. Calcium-activated potassium channels in insect pacemaker neurons as unexpected target site for the novel fumigant dimethyl disulfide [J]. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 2008, 324 (1): 149-159.
- [62] 王晴, 方文生, 李园, 等. 杀线虫剂新品种及作用机制研究进展[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(30): 100-107.
- [63] DANGI S R, TIRADO-CORBAL R, GERIK J, et al. Effect of long-term continuous fumigation on soil microbial communities[J]. *Agronomy*, 2017, 7(2): 37.
- [64] IBEKWE A M, PAPIERNIK S K, GAN J, et al. Impact of fumigants on soil microbial communities[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(7): 3245-3257.
- [65] 李青杰, 方文生, 颜冬冬, 等. 熏蒸剂对土壤微生物的影响研究进展[J]. *农药学报*, 2019, 21(增刊1): 780-786.
- [66] CASTAGNONE-SERENO P, DANCHIN E G, PERFUS-BARBEOCH L, et al. Diversity and evolution of root-knot nematodes, genus *Meloidogyne*: new insights from the genomic era [J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2013, 51: 203-220.
- [67] 聂海珍, 孙漫红, 李世东, 等. 棉隆与淡紫拟青霉联合防治番茄根结线虫病的效果评价[J]. *植物保护学报*, 2016, 43(4): 689-696.
- [68] DI PRIMO P, GAMLIEL A, AUSTERWEIL M, et al. Accelerated degradation of metam-sodium and dazomet in soil: characterization and consequences for pathogen control [J]. *Crop Protection*, 2003, 22(4): 635-646.

(编辑:胡新宇)

先正达基于异噁唑虫酰胺的新产品 EQUENTO® Extreme 在澳大利亚上市

近日,先正达在澳大利亚推出两款新型种子处理剂EQUENTO® Extreme和SALTRO® Duo,旨在帮助种植户在油菜生长的关键早期阶段提供最大程度的保护作用。

EQUENTO® Extreme活性成分为噁虫嗪和异噁唑虫酰胺,借助双重作用机理的协同效应,该产品不仅可实现对多种油菜早期危害性害虫如红足土螨等的快速高效防控,且持效期为3~5周。此外,该产品尚未发现针对性的抗性产生。

SALTRO® Duo是一款杀菌用种子处理剂,用于控制黑胥病、立枯病和疫霉菌等。EQUENTO® Extreme与其他种子处理剂具有良好的兼容性,与SALTRO® Duo高度兼容。

EQUENTO® Extreme和SALTRO® Duo将在本种植季销售。

(来源:世界农化网)