

◆ 综述与专论 ◆

农药根部缓控释施药技术研究进展

张硕佳, 赵鹏跃, 王超杰, 郑 丽, 程雪健, 黄啟良*

(中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193)

摘要:根部施药技术是一种根据防治对象的发生与为害位点,将选定剂量的农药施用在作物根部的技术措施。该技术一般利用作物的蒸腾拉力,把根部吸收的农药向上运输到靶标作物的不同部位。在特定的施药场景下,根据农药的理化性质、土壤的理化性质、作物的种类等条件来筛选易被作物吸收传导的农药。利用载体材料负载农药的有效成分,可改善其在作物体内的吸收传导性能,使农药能够被根部吸收并传输至地上部分。农药缓控释技术是使用缓控释材料或剂型加工技术来控制农药剂量的释放速度,使其可以持续稳定地释放到靶标位点,提高农药的持效期。发展农药根部缓控释施药技术是一个当前提高农药利用率的重要且具有前景的方向。鉴于此,本文总结了根部施药技术的种类,分析了制约根部施药技术的因素,阐述了改善农药的内吸传导性和根部施药的方法,以及农药缓控释技术种类,旨在为未来农药减量增效的应用提供理论指导。

关键词:根部施药;吸收和转运;减量增效;缓控释农药

中图分类号:TQ 450.1 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-5284.2022.03.003

Research Progress of Controlled-release Pesticide in Root Application Technologies

ZHANG Shuojia, ZHAO Pengyue, WANG Chaojie, ZHENG Li, CHENG Xuejian, HUANG Qiliang*

(Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100139, China)

Abstract: Root application technologies are technical measures to apply selected doses of pesticides to the roots of crops according to the occurrence and harm sites of the control objects. The technologies generally utilize the transpiration pull of crops to make the pesticides absorbed by the roots and translocated upward to different parts of target plants subsequently. In specific application scenarios, pesticides that are easy to be absorbed and transmitted by crops are selected according to physical and chemical properties of pesticides, physical and chemical properties of soil, crop types and etc.. The carrier material is used to load pesticide active components to improve their absorption and translocation performance in crops, so that pesticides can be absorbed by roots and transferred to the aerial parts of plants. Pesticide controlled-release technologies employ controlled-release materials or formulation processing technologies to control the release rates of pesticide doses, which can make pesticides continuously and stably released to the target sites and improve the duration of pesticides. The development of controlled-release pesticide in root application technologies is an important and promising direction for improving the utilization rate of pesticides. In this paper, types of root application technologies were reviewed. The factors restricting the root application technologies were analyzed. Meanwhile, approaches for improving the systemicity and root application of pesticides, and types of pesticide controlled-release were elaborated, aiming to provide theoretical guidance for the application methods of pesticide decrement and synergism in the future.

Key words: root application; uptake and translocation; decrement and synergism; controlled-release pesticide

收稿日期:2022-01-13

基金项目:国家重点研发计划(2019YFD1002103);江苏省重点研发计划(现代农业)(BE2021303)

作者简介:张硕佳(1996—),男,河南永城人,硕士研究生,研究方向为农药剂型加工与质量控制技术。E-mail:shuojiaz@163.com

通信作者:黄啟良(1968—),男,山东宁阳人,博士,研究员,主要从事农药剂型加工与质量控制技术研究。E-mail:qlhuang@ippcaas.cn

农业病虫害多发和频发已成为当今影响粮食产量和质量的重要因素。在生物防治、化学防治、物理防治等方式中,化学农药防治仍然是防治病虫害最有效且最高效的方式。然而,我国2020年在三大粮食作物上化学农药的有效利用率仅为40.6%^[1]。农药的大量流失不仅浪费了资源,也带来了严重的环境污染问题。随着我国对绿色植物保护技术的重视和农业农村部在2015年开展化肥农药使用量零增长行动以来,如何科学、高效地发挥农药的最大作用已成为植保学者研究的重点。

大多病虫害主要为害农作物的地上部位。茎叶喷雾作为农药的主流施药方式,被广泛应用在病虫害发生甚至爆发后。茎叶喷雾是直接把农药喷施在有害生物为害的靶标部位进行防治,目前正朝着技术手段优化、节省成本和提高农药利用率的方向发展^[2]。该喷雾技术虽已从传统的背负式施药逐步发展为农用机械喷施,甚至植保无人机空中施药,但无论是传统喷雾还是器械喷雾或者无人机飞防,在进行防治时,农药的防效都会受到植株的生长形态,如植株高度、冠层结构、有害生物在叶片的正面或背面的分布,以及光照、温度、湿度及风速等气象因子的影响。另外,喷雾防治的过程中存在农药飘移问题,施药人员的暴露风险难以避免,而农药雾滴飘移、弹跳及流失的缺陷也会导致农药浪费,降低农药利用率并污染环境。

根部施药技术是一种利用作物的蒸腾拉力,促进农药向上运输到植物靶标部位,最终使其在叶部积累的技术。这使得易暴发病虫害的叶片部位可以得到有效地预防,从而促进作物顺利进行光合作用,植株顺利成长及保障了农作物的产量^[3-6]。同时,该技术也可有效地解决茎叶喷雾过程中药剂飘移、弹跳及流失等问题,避免药液的损失并保障施药人员的安全。根部施药技术现已被广泛运用于高大园林观赏植物、果树及棉花等不便于进行茎叶喷雾的植物,并且开发出的缓控释剂型可以减少用药次数、节省人力。随着缓控释剂型加工技术及纳米技术的发展,研发人员尝试把内吸性差的农药品种用纳米技术进行修饰或使用天然和人工合成的大分子材料进行负载农药,改善其内吸性,以此扩大根部施药的农药品种,达到更好的防效。例如,使用高分子材料把农药有效成分包裹的微囊剂和微球剂;使用缓控释材料为载体的颗粒剂和胶囊剂;通过纳米技术修饰的纳米农药;通过与植物营养物质进行偶联输送到靶标部位的导向农药。

本文总结了根部施药技术的种类,分析了制约根部施药技术的因素,立足现代农业对植物保护技术需求的变化,通过探索根部施药技术及缓控释剂型加工技术,实现农药使用的零增长,旨在为未来农药减量增效的应用提供理论指导。

1 根部施药技术种类

1.1 种子处理技术

种子是作物生长发育的开端,也是作物生长过程中抵抗病虫害的最早阶段。种子处理技术是一种使用生物、物理、化学等方法来处理作物种子的技术手段,具有防治种子萌芽期或幼苗期的有害生物和调节苗期作物生长发育的作用。使用药剂进行种子处理就是利用农药在作物与有害生物之间生物活性的不同及作用方式的差异,控制或避免有害生物对作物种子及幼苗的危害。种子被处理后,可以消除种子自身携带的病原菌来保护幼苗的正常生长。将具有内吸性的农药处理种子后,药剂可以随着作物生长传输到作物的地上部位。由于农药与种子直接接触,且不同作物以及同种作物但品种不同的种子对农药的敏感性不同,所以用药处理种子之前,需要对农药的理化性质和种子的敏感性进行全面考虑,避免产生药害,造成经济损失。目前,在农业上种子处理技术的具体方式可分为浸种、拌种和包衣。

1.1.1 浸种处理

浸种法是将种子在一定浓度的药液中浸泡一定时间,消灭种子表面和内部所带病原菌或害虫,并通过提高种子的活力来促进幼苗生长的方法。种子在浸种后可以吸收充足的水分以达到催芽的效果,同时可以吸收一定量的农药,消灭种子携带的有害生物和防止幼苗遭受病虫害。我国自20世纪50年代开始推广浸种技术并用于防治地下害虫,浸种的农药大多为水剂或乳剂等低毒剂型。浸种法消毒比较彻底,但浸种后的种子不能堆放时间过长,应在晾干后立即播种。传统浸种是利用温水或热水浸泡种子来达到催芽和一定的消毒效果,现多用无机盐类(氯化钙、磷酸二氢钾等)、有机溶剂(聚乙二醇、二甲基亚砷等)、作物生长调节剂(赤霉素、水杨酸、油菜素内酯等)等具有加快种子萌发、提高作物的抗逆、抗病性和提高种子活力的化合物来浸泡种子,以此改善种子品质,达到培育壮苗、增加产量的目的^[7-12]。目前也有使用微生物菌剂浸种的方法,该方法可以使微生物在种子表面进行繁殖,待种子种植

后,微生物可以在作物根部固定氮元素来增加根部对养分的吸收,以此提供作物生长的营养需求^[13]。

由于浸种技术是把种子浸泡在药液中,使种子直接接触到药液,在此过程中种子易产生药害,所以大多数浸种技术是以使用各种试剂和作物生长调节剂来提高种子活力和消毒灭菌为主要目的。选择浸种处理时,所选农药的品种及其浓度、浸泡时间和浸泡温度是影响浸种处理效果和可能造成药害的重要因素,通过增加农药浓度,延长种子浸泡时间,提高浸泡药液的温度,都可以明显地提高浸种处理的效果,但同时会增加产生药害的风险程度。因此,研究人员需要不断摸索来合理地控制这些因素,对浸种技术进行优化,从而达到最好的浸种处理效果。

1.1.2 拌种处理

农药拌种是一种将种子、农药和拌种助剂按照比例混匀搅拌,使种子表面均匀覆盖一层农药的方法。大多数拌种剂也会被添加一些营养元素用来促进幼苗成长。拌种后的种子可以消灭种子携带的病原菌,实现长时间储存和运输,并且可以防治众多土传病虫害和苗期病虫害。我国从20世纪50年代开始使用拌种技术防治地下害虫,以此来促进种子的正常发育。当前拌种技术分为湿拌和干拌。其中,干拌主要的使用剂型是粉剂,拌种时需要将拌种器械严格密封,防止粉尘污染;湿拌是拌种技术的主流方法,使用的剂型有微囊、胶悬剂、乳油和可湿性粉剂,可降低粉剂污染的可能性。拌种技术不仅对病虫害有良好的防治作用,也可以促进幼苗的生长。拌种处理后的药剂大多具有良好的持效期,1次拌种相当于用茎叶喷雾多次施药,节省人力且降低农药用量^[14]。束兆林等^[15]使用有效成分为50~60 g的吡虫啉用于100 kg棉花种子拌种。拌种后60 d内,其可有效地防治棉蚜,并对棉花的生长也有良好的促进作用。康敏等^[16]使用丁硫克百威对水稻种子进行拌种来防治在水稻生育期前期传播病毒的介体白背飞虱,发现在拌种后31 d,其对白背飞虱的防效可以维持在95%左右,能有效降低水稻黑条矮缩病的传播。

然而,在拌种过程中,农药和肥料中的微量元素会对部分作物种子的生长产生负面影响,所以拌种时需要严格控制农药、肥料和种子的比例,避免出现“一拌无芽”的现象^[17]。现阶段,拌种技术多采用如氨基寡糖素、冠菌素、诱抗素等植物生长调节剂,通过提高种子和幼苗的活力来抵御病虫害的侵染,避免了对种子产生药害的可能性。另外,拌种时还

需添加鲜艳的着色剂来起警戒作用,既为了防止误食,也避免对鸟类等生物造成伤害。

1.1.3 种子包衣处理

种子包衣技术是一种使用种衣剂处理种子的技术手段,并且是种子处理中应用最多、研究最深的技术。种衣剂一般均含有杀虫剂、杀菌剂、生长调节剂、微肥和微生物等有效成分,具有抗病、防虫、调节和补充作物营养的功效^[18],可在种子表面形成牢固的药膜。种子包衣技术在环境友好化的前提下,对被包衣的种子还具有良好的保护功能,能有效防止种子及幼苗遭受土壤中病菌的侵染和传播,从而顺利出苗成长^[19]。此外,种子中的农药成分既不会快速释放,也不会受到外界雨水、灌溉、风吹等环境因素的影响,减少农药的流失,从而有利于对病虫害进行有效地防治,最终促进农作物的丰收^[20-21]。然而,种衣剂同样是直接作用于对外界条件敏感的种子萌芽期,所以在选择用药种类和用药量时需谨慎。近年来,种子包衣技术出现种子活性降低、影响种子出苗等问题,有时甚至会损害天敌。例如,东北地区由于近两年春播持续低温,许多用含有戊唑醇成分包衣的玉米品种在播种后,低温时会出现膜脂质过氧化和叶绿体分解,最终表现出不发芽或出苗畸形的情况,由于冷害和药害导致的缺苗率高达10%~30%,给玉米生产带来严重损失^[22]。

现阶段,种子包衣技术从传统均匀地把农药涂抹在种子表面的方法发展成为分层包衣、缓释包衣、智能控释等包衣方法^[23];种衣剂的种类也从最初的杀虫剂或杀菌剂发展成为植物源种衣剂、生物活性菌种衣剂、除草剂种衣剂、综合性种衣剂^[24];包衣材料也逐步变为对环境友好的天然产物和植物源材料^[25-26]。在现代绿色植物保护技术中,缓释型种衣剂逐渐成为主流的种衣剂。缓释型包衣是利用特殊处理方法或高分子功能材料与有效成分互作,使有效成分按照预定的时间缓慢释放,并且长时间维持有效剂量的释放。缓释型种衣剂主要有通过改善剂型加工工艺,将种衣剂研磨成粒径为15~30 nm的颗粒来进行包衣的超细粉体缓释型^[27];利用高分子成膜剂,将有效成分缓慢释放的高分子膜缓释型^[28];将有效成分先剂型加工成微囊后再进行包衣的微囊缓释型^[29];通过吸附、交联等作用,将有效成分聚集成絮状集合体的絮凝缓释型^[30];使用智能响应型高分子材料(如温敏性材料、光敏性材料、pH响应型材料等)对有效成分进行包衣的智能控释型^[31-32]。

然而,种衣剂的广泛应用在为人类带来巨大的

经济效益和生态效益的同时,也可能给生态环境带来一些潜在的生态影响,如伤害天敌和传粉昆虫,以及制备种衣剂的化学材料会对土壤产生污染等。这些负面影响需要引起科研人员的重视,对现有的种衣剂的制备技术和使用技术进行进一步改进和优化。

1.2 土壤处理技术

土壤是给作物整个生长过程中提供营养的场所,也是许多病原菌和地下害虫栖居的场所。对土壤进行施药处理不仅可以有效防治土传的病虫害,还可以通过作物根部吸收土壤中施用的农药并转运到地上部来防治地上部的有害生物。土壤处理一般有浇灌、沟施和撒施等。土壤施药较为简便省力,也不易对周围环境造成污染,但土壤环境会对施加的农药存在着吸附作用和降解作用,使农药无法发挥良好的效果。一般来说,根部吸收农药的过程如图1所示:农药施用于土壤后,其有效成分首先在作物根部周围富集,随后利用通过根表皮细胞内外的浓度差,以跨膜扩散的方式被根部吸收,再通过质外体和共质体途径进入木质部中,从而传输到各个部位^[33]。土壤中的有机质含量、温度、pH、阳离子交换量等众多因素都会影响此过程中农药被根部吸附的程度。其中,土壤中有有机质含量的高低是决定作物根部吸附农药量的关键因素。有机质对农药的吸附行为可能与有机质的疏水特性相关,通常土壤中有有机质含量越高时,能与农药发生键合的官能团数量就越多,使得土壤对农药的吸附力越强,因此减少土壤中农药向作物根部的迁移性,从而导致作物吸收的农药量减少^[34-35]。

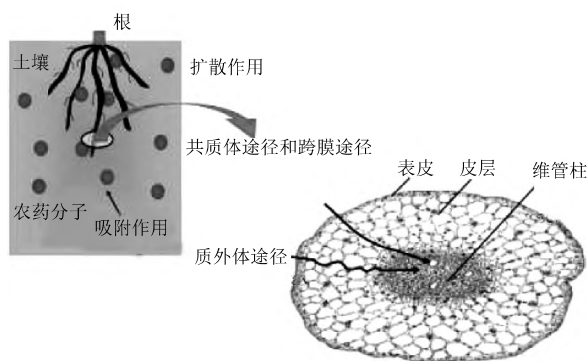


图1 农药被根部吸收进入作物体内的主要过程

周风帆等^[36]研究多效唑在不同土壤的吸附行为及多效唑在模拟田间生态系统中的分布动态,指出多效唑的吸附率与有机质含量呈显著的线性正相关。Clandio等^[37]建立了酸性农药在土壤中的吸附模

型,发现土壤的pH会影响有机化合物在土壤中的吸附,且对离子型化合物和有机酸农药的影响更大。Lawrence等^[38]发现阳离子污染物易被带负电的细胞膜吸引,而阴离子污染物则会被细胞膜排斥,难以穿过细胞膜。也有研究表明,土壤中的其他因素,如有机碳和土壤酶,也会影响作物对农药的吸收^[39-40]。因此,土壤处理需要筛选不易被土壤吸附和降解的农药品种,还需考虑施药环境是否便于进行根部施药。

1.2.1 土壤熏蒸技术

土壤熏蒸技术可以把具有杀虫、杀菌或除草等作用的农药气体施用于土壤中,从而在人为的密闭空间中防治土传病虫害^[41],一般在作物种植前进行。作为熏蒸剂的农药分子量较小,降解较快,无残留风险,对食品安全。在欧美等地区,采用熏蒸剂进行土壤消毒是综合防治技术体系的一部分,其被广泛应用在果树、草坪、蔬菜、观赏植物上^[42]。土壤熏蒸剂主要包括溴甲烷、棉隆、威百亩、异硫氰酸甲酯和氯化苦。农药本身的理化性质和环境条件是影响土壤熏蒸效果的主要因素,而农药的挥发性是影响熏蒸效果的重要因素。在密闭的土壤环境中,药剂的挥发性决定能杀死病虫的有效浓度。农药的扩散性和渗透性也是决定土壤化学熏蒸效果的重要因素。农药在被施用于土壤后需要克服土壤中的阻碍,与有害生物接触,才可以有效防治有害生物,因而需要较大的用药量。土壤的温度、湿度、质地等性质同样是影响土壤熏蒸效果的重要因素。一般情况下,在温度高于10℃时,如果土壤或环境的温度越高,土壤熏蒸的效果就越好;湿度会影响熏蒸剂在土壤中的移动,并影响着某些药剂的活性,因此在土壤熏蒸前2周需进行土壤灌溉;土壤熏蒸剂在土壤中的分解强度和活性取决于土壤的理化性质和熏蒸剂的类型,在土壤熏蒸前可进行翻土和整土^[43]。

虽然土壤熏蒸技术可以有效地防治土传病虫害,但该技术是一种处理比较繁琐、风险较大的农药使用技术,操作人员需要严格遵守使用程序,防止出现人员中毒、作物药害及破坏土壤微生物群落等问题。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壤消毒体系,研发制定了关键技术规程、消毒器械、土传病害防控体系和社会服务体系来推进土壤熏蒸事业的发展。植保所目前已对土壤熏蒸剂硫酰氟、异硫氰酸烯丙酯(AITC)、二甲基二硫(DMDS)及棉隆进行了改善,并在国内首创了电喷式广角土壤消毒机械,大幅度提高了消毒

效率,同时破解了三七、生姜以及草莓等高附加值作物的连作障碍^[44]。

1.2.2 浇灌技术

浇灌是一种以水稀释农药,把农药浇灌至作物根部附近土壤中的技术手段,一般将药液浇灌至土壤10~15 cm深处为最佳。浇灌的方式包括漫灌、滴灌、灌根等。早期浇灌法主要用于防治土传病虫害,所用的农药大多是不具有内吸性的化学农药,只针对地下有害生物,无法防治地上部病虫害。随着研究人员发现新烟碱类杀虫剂具有优秀的内吸性,并且对一些刺吸式害虫有良好的防效,研究人员遂开始尝试使用新烟碱类杀虫剂进行浇灌。目前,在浇灌法使用的农药中,内吸性农药具有较高的占比。我国从1974年引进浇灌技术,经过四十多年的发展,该技术已经在我国全面普及,现已被广泛用于大棚内蔬菜等作物灌溉、园林观赏植物和果树灌根或滴灌、大田棉花滴灌等。现代化的灌溉技术将滴灌、喷灌技术系统改装,实现自动、定时定量地向土壤中施入农药。浇灌系统现已发展成不仅可以防治为害根部的黄萎病、根腐病、根结线虫、蛴螬、田鼠等病虫害,还可以实现将水分、化肥、农药等定向输送至根部周围,减小水分和药肥的流失,从而做到精准施药、施肥^[45]。对于不易喷施到靶标部位的园林观赏植物和果树,灌根法可以较好地吧内吸性农药输送到茎叶等靶标部位^[46-47]。杨庆喜等^[48]采用喷雾和灌根法来防治草莓蚜虫,发现灌根法与茎叶喷雾相比,灌根法的速效性较差,但持效期远高于茎叶喷雾。

与传统的施药方式相比,水药肥一体化的现代化浇灌系统不仅提高农药化肥的利用率,还减少劳动力,有效地降低农业成本,增加农业生产效益^[49-50]。但近年来也有一些报道表明,灌根法施用的农药不易在土壤中降解,并且与肥料聚集在一起易造成土壤板结,对土壤环境造成破坏;农药不易在土壤中流动,被浇灌后一直存留在土壤的上表层;浇灌的药液过多使得农药随水流流入至地下水;土壤中的病原菌未能被有效地杀死且随水流加快传播等^[54-55]。因此,在农药浇灌时需要科学用药,选用不易被土壤吸附的农药,并控制农药的用量,减少药液对周围环境的破坏和对人、畜的毒害。

1.2.3 沟施技术

沟施是指在作物播种时或在土壤翻耕时把农药施用于作物播种沟中或犁沟中,再加土覆盖,并把覆盖的土块整碎。一般黏土和结块较大的土壤沟

施效果较差。沟施是除草剂较为常用的施药方法,播种前把具有选择性的除草剂进行沟施并混土处理可杀死药层的杂草。沟施中较为常用的除草剂有挥发性强的燕麦敌、易光解的氟乐灵、易被土壤吸附较难接触到杂草种子的西玛津等几种类型^[56]。

1.2.4 撒施技术

撒施是农药最早期的施药方法之一,对于毒性较高或者易受温度和光照等外界环境影响而分解的农药,可将农药制备成颗粒剂撒施到作物根部附近。内吸性农药因其可被植株吸收传导而造成颗粒剂进行撒施,非内吸农药则可以利用纳米技术改善其内吸性来进行撒施^[57]。颗粒剂撒施相比于常规茎叶喷雾具有使用方便、施药效率高、高毒农药低毒化、持效期长、减少农药损失、提高农药利用率、减轻对周围环境破坏等优点。农药的撒施可以结合肥料一起施用,或者施用药肥一体化的颗粒剂来减少人工成本,从而达到增效的目的^[58-59]。早期颗粒剂只需要撒施,无需进行药液的配制,也无农药飘移等缺陷,因而被广泛用于防治作物地下害虫和地表害虫及卫生防疫等。目前,随着处理颗粒剂的发展,这种利用撒施技术,由作物吸收并转运农药来防治作物病虫害的方法具有良好的持效期^[60-61]。撒施技术也由最初的人工撒施发展为机械撒施和无人机航空撒施,大大地节省了人力,也极大地降低对施药人员的危害,但航空撒施技术必须要制定航空撒施标准并受相关部门监管,防止对周围环境造成破坏^[62]。

2 缓控释技术种类

根部施药后,作物转运农药最低有效剂量的耗时相比于其他施药方式较长,因而需要提前施用持效期较长的农药,或者根据病虫害的为害规律,利用缓控释技术控制有效成分的释放,从而达到对有害生物的防控。农药缓控释技术是一种将农药的有效成分当作芯材,利用天然或人工材料将有效成分包裹,在适宜的条件下缓慢释放有效成分的方法。按照制备手段,缓控释剂型可分为物理型和化学型。化学型制剂是通过农药分子间的化学反应形成的具有缓释型的制剂^[63];物理型制剂是通过包衣封闭、吸附、溶解等物理作用使得原药和高分子化合物形成具有缓释性能的制剂^[64]。传统缓控释剂型产品都存在着不能精准地在有害生物发生前控制释放,或释放的有效成分含量不足以阻碍有害生物的爆发等问题。此外,一些缓控释产品不能较好地减

少土壤对有效成分的吸附和降解作用,导致农药的持效性不足以抵御有害生物的发生。新型缓控释技术利用发现的天然材料和人工合成材料对农药的有效成分进行包裹,可以降低光照、土壤、温度、pH等条件对有效成分的影响,解决根部施药易被土壤降解或吸附的问题和避免对外界环境因素产生负面影响。缓控释剂型可以较好地靶标有害生物的发生期,做到定点、定量、定时地释放有效成分,其缓控释特性也可以避免施用初期对作物的药害和农药损失^[65]。

2.1 微囊

微囊是最常用的农药缓控释剂型之一。通过化学或物理方法,利用天然高分子材料或合成高分子材料为囊壁,把有效成分包裹起来可形成微囊。每种微囊的制备都需要考虑壁材和芯材的物理化学性质、释放性能要求、应用场景等因素来选取适宜的制备条件^[66]。制备微囊时,先把原药乳化分散成微粒,然后通过选择使用溶液蒸发法、界面聚合法、喷雾干燥法、复凝聚法和同轴静电法等一种或多种制备方法来制作微囊。微囊的药物释放速率可随着粒径的减小而增大,但如何提高微囊中药物的负载率是微囊制备技术中的一大技术难题^[67-68]。微囊因其壁材的包裹作用为农药提供了稳定的释放空间,能够提高农药的有效成分的稳定性,同时可减少有效成分的挥发,延长活性物质的作用时间,减少施药量和施药频率,降低高毒农药的危害^[69]。微囊技术目前已被广泛用于种子处理剂,而种子处理的微囊悬浮剂也有产品在登记使用^[70-71]。

2.2 缓控释型颗粒剂

颗粒剂是根部施药技术中常用的剂型,由于其在施药过程中具有方向性,能够使药物不附着在作物茎叶上,从而避免产生药害。该农药剂型无农药或粉尘飘移,具有对施药人员安全、使用方便高效、持效期长等优点。由于大多数颗粒剂外部被包裹着一些无机或有机材料,可避免其中的有效成分因暴露在外环境而发生光解或热解。这些材料也可以在一段时间内将大部分有效成分与土壤隔绝,避免接触而发生分解。因此,颗粒剂本身就具有一定的缓控释性能。

近年来,众多具有缓控释性能的天然产物和人工合成的载体材料已被应用于缓释农药上,研究人员通过筛选这些载体材料来进一步加强颗粒剂的缓控释性能。目前的载体材料分为无机和有机材料,无机材料主要有二氧化硅、金属有机骨架、氧化

石墨烯、膨润土和硅藻土等;有机材料有壳聚糖、海藻酸钠、环糊精、纤维素、明胶等天然高分子化合物,以及聚羟基脂肪酸、聚丁二酸丁二醇酯、壳聚糖-聚乳酸共聚物等人工合成类材料^[72]。

2.3 缓控释药肥

提高作物的产量不仅仅需要农药来防治病虫害,还需要施肥来给作物提供营养。缓控释药肥可以做到将药肥一起施用来减少劳动力,并减少化肥和农药的使用量^[73-74]。目前,微囊缓控释药肥和颗粒剂缓控释药肥在药肥领域上运用较多,部分植物源农药因其药渣可以给作物提供养分也被做成绿色生物药肥^[75-76]。药肥的使用需要注意以下几点:(1)根据农业生产需求、生产条件和农药、肥料的种类等因素进行综合考虑,避免化肥和农药相互反应,使两者的理化性质发生变化;(2)注意防治的病虫害种类,避免化肥提供营养给有害生物而导致药肥减效;(3)需要从化肥和农药的使用释放时间来考虑药肥的最佳施用时间^[77]。未来缓控释药肥的发展需要研究人员对化肥和农药在土壤中的释放、在作物体内的吸收传导等过程的客观规律进行研究,从而形成一套缓释药肥产品性能的评价方案,使药肥满足作物生长需求,并且能实现智能化释放来提高药肥效率。

2.4 纳米技术

农药能否被作物根部吸收不仅受到根部周围的农药浓度差的影响,也会受到农药的水溶性和脂溶性的影响。农药先在作物根部吸收土壤水溶液的过程中达到水相浓度平衡,然后在根部的生物膜和细胞膜脂类上完成吸附过程。此外,农药的结构不同也会造成其被作物根部吸收的程度不同。近年来,纳米技术的迅速发展为现代植物保护技术开辟了新的应用场景,并为改善农药本身的理化性质,使其适用于根部施药提供了新的方向。纳米载体具有稳定的理化性质、高生物相容性和在植物中的低降解性等优势,可以利用其对这些农药进行负载,改善农药的内吸转运的理化性质,负载农药在作物体内吸收传导并转运到作物靶标部位上。此项技术不仅可以减少农药被土壤吸附的程度,使其可以较易地移动至作物根部附近,从而被作物吸收,还可以避免有效成分的降解和流失,延长了农药的持效期^[78-80]。

3 展望

从全世界范围来看,农药使用技术及剂型加工都向着精准、低量、高浓度、对靶性、自动化的方向

发展。如何科学运用根部施药技术需要结合有害生物的生物特性及发生特点、农药的理化性质和作用方式、施药剂型的特点、施药的环境条件、施药器械的原理等因素进行综合考虑,使农药最大限度地发挥对有害生物的作用,同时最大限度地减小对非靶标生物和环境的影响。由于根部施药技术是把农药施加到根部附近或种子的根部,在采用该项技术时需注重如下几点:(1)所选农药必须对作物安全,并且严格控制施药量;(2)选取在土壤中较易迁移的农药,利于作物根部吸收;(3)通过农药剂型加工来改善农药在作物体内的吸收运转性能,从而提高农药输送效率;(4)利用缓控释载体材料来包裹或负载有效成分,减少其流失或分解,使农药持效期延长;(5)探索协同增效的新型药肥产品来保障作物良好生长,从而达到省力、省肥、省药的效果。

随着越来越多的天然高分子化合物和人工合成化合物的研发,利用纳米材料、天然高分子化合物或人工合成化合物作为载体,构建根部施药的新剂型,可减少土壤对农药的吸附和降解作用,并改善农药的内吸性能,使农药的有效成分能够被作物根部吸收并传输,从而可以防治作物地上部位的有害生物;同时也使农药具有缓控释性能,达到延长农药的持效期、提高农药利用率、降低对环境的污染等效果。除此之外,在制备新型缓控释药肥时,也可以利用这些载体材料来提高肥料和农药的利用率,达到减肥、减药、增效的目的。

缓控释技术在实际运用过程中仍存在着一些需要改善的地方:缓控释的载体材料合成工艺复杂,成本较高,在实际运用过程中会增加生产成本;其释放性能受到温度、pH、光照等因素影响,在向土壤施药过程中可能会受到不可控的影响;持效期的延长也可能带来农药残留超标等问题。因此,在农药缓控释剂型研发过程中,科研人员需要通过学科间的交叉研究,综合考虑载体材料的种类、生产加工的工艺、农药的理化性质和施药的环境等因素,从而最终获得稳定控释、性能优良的缓控释剂型。

参考文献

- [1] 佚名. 农药使用量“零增长”≠“零使用”[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(5): 94.
- [2] QIN W C, QIU B J, XUE X Y, et al. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers[J]. Crop Protection, 2016, 85: 79-88.
- [3] 娄权, 董丰收, 徐军, 等. 作物从土壤中吸收、传递和累积农药的研究进展[J]. 植物保护, 2021, 47(2): 1-5; 19.
- [4] HAN Y, JIN H S, GUO W, et al. Translocation and distribution of imidacloprid in tobacco with two application methods[J]. Agricultural Science and Technology, 2017, 18(2): 344-346; 376.
- [5] FELIPE F S, RODRIGO F P, VALDEMAR L T, et al. Soybean seed treatment: how do fungicides translocate in plants?[J]. Pest Management Science, 2020, 76 (7): 2355-2359.
- [6] WANG W F, WAN Q, LI Y X, et al. Uptake, translocation and subcellular distribution of pesticides in Chinese cabbage (*Brassica rapa* var. *chinensis*) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 183: 109488.
- [7] GAVIN R F, EMILIO L G, KINGSLEY W D, et al. A compound from smoke that promotes seed germination[J]. Science, 2004, 305 (5686): 977-977.
- [8] 张静, 胡立勇. 农作物种子处理方法研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(2): 258-264.
- [9] 王晓多, 陆远柱, 杨九英. 水杨酸浸种对豌豆种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2007, 26(8): 42-44.
- [10] 郭群利, 胡晋, 洪中川. 高锰酸钾浸种对杂交水稻种子发芽率、成秧率的影响[J]. 种子, 2007, 26(6): 87-88.
- [11] 刘伟, 王金信, 杨广玲, 等. 芸苔素内酯对花生幼苗生长的影响[J]. 现代农药, 2005, 34(1): 42-43.
- [12] 王正才, 李颖, 陈金湘. 多效唑浸种对棉花营养液漂浮育苗幼苗生长的影响[J]. 作物研究, 2007(2): 124-125.
- [13] 李明, 陈磊, 姚东伟. 微生物与种子处理[J]. 上海农业学报, 2008, 24(1): 114-117.
- [14] 李耀发, 党志红, 潘文亮, 等. 新烟碱类杀虫剂噻虫胺拌种防治麦蚜的田间药效及安全性评价[J]. 农药, 2013, 52(9): 689-691.
- [15] 束兆林, 糜林, 杨金生, 等. 吡虫啉拌种控制棉虫作用及其促长保产效应[J]. 农药, 1997, 36(2): 36-37.
- [16] 康敏, 赵剑锋, 顾中量, 等. 4种药剂拌种对白背飞虱的防治效果[J]. 植物保护, 2016, 42(2): 220-224.
- [17] 郭建国, 刘永刚, 吕和平, 等. 几种药剂拌种后对玉米种子萌发和生长效应的初步研究[J]. 种子, 2007, 26(10): 24-26.
- [18] 武亚敬, 张金香, 高广瑞, 等. 我国种衣技术的研究进展[J]. 作物杂志, 2007(4): 62-66.
- [19] DEVON R R, ADAM M B, MARTIN I C. Profitability and efficacy of soybean seed treatment in Michigan[J]. Crop Protection, 2018, 114: 44-52.
- [20] 张学峰. 噻虫胺种子处理和颗粒剂蕾期穴施防治棉田刺吸式口器害虫效果评价[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [21] 吴凌云, 李明, 姚东伟. 化学农药型种衣剂的应用与发展[J]. 农药, 2007, 46(9): 577-579; 590.
- [22] 王雅玲, 杨代斌, 袁会珠, 等. 低温胁迫下戊唑醇和苯醚甲环唑种子包衣对玉米种子出苗和幼苗的影响[J]. 农药学报, 2009, 11 (1): 59-64.
- [23] 王莹, 遇璐, 丑靖宇. 浅谈缓释型种子处理剂研究现状[J]. 农药, 2020, 59(7): 469-472; 498.
- [24] 邹吉承, 赵海岩, 王辉, 等. 种子处理技术的应用与发展[J]. 种子, 2004, 23(9): 49-54.
- [25] JARECKI W. Soybean response to seed coating with chitosan +

- alginate/PEG and/or inoculation[J]. *Agronomy*, 2021, 11(9): 1737-1737.
- [26] ASCRIZZI R, FLAMINI G, BEDINI S, et al. Ferulago campestris essential oil as active ingredient in chitosan seed-coating: chemical analyses, allelopathic effects, and protective activity against the common bean pest *acanthoscelides obtectus*[J]. *Agronomy*, 2021, 11(8): 1578-1578.
- [27] 谷登斌, 李怀记. 种子包衣技术及发展应用[J]. *种子*, 2000, 19(1): 26-28.
- [28] 庞龙. 功能性纤维素膜材料的制备及其在缓控释农药中的应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [29] YANG D B, LI G X, YAN XI J, et al. Controlled release study on microencapsulated mixture of fipronil and chlorpyrifos for the management of white grubs (*Holotrichia parallela*) in peanuts (*Arachis hypogaea* L.) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62 (44): 10632-10639.
- [30] 赵国华, 吴梅芬, 胡惠康. 絮凝剂的水溶性聚合物包衣技术[J]. *建筑材料学报*, 2002, 5(3): 253-255.
- [31] 胡晋, 崔华威, 关亚静, 等. 温控缓释抗寒型种衣剂及抗寒剂制备方法: CN, 102511480A[P]. 2012-06-27.
- [32] 徐青, 周元敬, 刘国华. 一种光响应控释农药膜及其制备方法和应用: CN, 110140717A[P]. 2019-08-20.
- [33] 范添乐, 宋玥颐, 陈小军, 等. 农药内吸性的研究现状与改善策略[J]. *农药学报*, 2020, 22(4): 579-585.
- [34] GAO Y Z, ZHU L Z. Phytoremediation and its models for organic contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, 15 (3): 302-310.
- [35] SPARK K M, SWIFT R S. Effect of soil composition and dissolved organic matter on pesticide sorption[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 298(1): 147-161.
- [36] 周凤帆, 蔡后建, 金琦, 等. 多效唑土壤吸附及在模拟生态系统分布动态的研究[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1994, 30(1): 55-62.
- [37] CLAUDIO A S, ARTHUR G H. Soil sorption of acidic pesticides [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(3): 949-956.
- [38] LAWRENCE M M, SOMANDLA N, LUKE C. Uptake of pharmaceuticals by plants grown under hydroponic conditions and natural occurring plant species: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 477-486.
- [39] ZHANG Y, LIANG Q, GAO R T, et al. Contamination of phthalate esters (paes) in typical wastewater-irrigated agricultural soils in Hebei, north China[J]. *PLoS ONE*, 2017, 10(9): e0137998.
- [40] TAN W B, ZHANG Y, HE X S, et al. Distribution patterns of phthalic acid esters in soil particle-size fractions determine biouptake in soil-cereal crop systems[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6 (1): 31987.
- [41] 王秋霞, 颜冬冬, 曹勘程, 等. 土壤熏蒸剂研究进展[J]. *植物保护学报*, 2017, 44(4): 529-543.
- [42] CHELLEMI D O, OLSON S M, MITCHELL D J, et al. Adaptation of soil solarization to the integrated management of soilborne pests of tomato under humid conditions[J]. *Phytopathology*, 1997, 87(3): 250-258.
- [43] 毛连纲, 颜冬冬, 郑建秋, 等. 土壤化学熏蒸效果的影响因素述评[J]. *农药*, 2013, 52(8): 547-551.
- [44] 曹勘程, 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.
- [45] 臧小平, 朱嘉雯, 井涛, 等. 滴灌水肥一体化技术在热带果树上的应用研究进展[J]. *贵州农业科学*, 2019, 47(4): 42-50.
- [46] 张蓓, 阿地力·沙塔尔, 茹仙古丽·买买提. 库尔勒市果园防护林杨盾蚧环境友好型防治技术研究[J]. *新疆农业大学学报*, 2018, 41(3): 210-216.
- [47] 卢学勃. 几种喷雾施药技术在园林绿化病虫害防治中的应用[J]. *现代园艺*, 2016(10): 52.
- [48] 杨庆喜, 李东阳, 纪明山, 等. 喷雾和灌根施药后吡虫啉在草莓植株中的分布及其对草莓蚜虫的防效[J]. *植物保护*, 2019, 45(4): 250-254.
- [49] 董昕, 张恒嘉, 芦倩, 等. 膜下滴灌对农田土壤环境的影响研究进展[J]. *中国水运(下半月)*, 2021, 21(7): 103-104.
- [50] FRANK J B, EDUARDO C H, ANTHONY A U, et al. Field evaluation of systemic imidacloprid for the management of avocado thrips and avocado lace bug in California avocado groves [J]. *Pest Management Science*, 2010, 66 (10): 1129-1136.
- [51] 李志明, 吉庆勋, 杨曼利, 等. 我国农田土壤污染现状及防治对策[J]. *河南农业*, 2019(23): 46-49.
- [52] 赵玲, 滕应, 骆永明. 中国农田土壤农药污染现状和防控对策[J]. *土壤*, 2017, 49(3): 417-427.
- [53] 刘子牧. 安徽砀山梨产地环境农药调查与迁移转化研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- [54] 刘颖惠, 岳爱军, 刘洋, 等. 一起甲拌磷农药浇灌韭菜引起的食物中毒[J]. *河南预防医学杂志*, 2001, 12(2): 94.
- [55] 陈影影. 剧毒农药浇灌无公害大蒜 毒蒜祸及京津沪[J]. *今日中国论坛*, 2005(7): 73-77.
- [56] 徐汉虹. 植物化学保护学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 186.
- [57] XU Y B, XU C L, HUANG Q L, et al. Size effect of mesoporous silica nanoparticles on pesticide loading, release, and delivery in cucumber plants[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(2): 575.
- [58] 隋颖光. 肥料与不同类型农药混合施用的作用及影响[J]. *吉林蔬菜*, 2012(7): 49.
- [59] CRAIG L R, SHIBU J, BARRY J B, et al. Growth response of longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) seedlings to fertilization and herbaceous weed control in an old field in southern USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 172 (2-3): 281-289.
- [60] 张奇珍, 尹明明, 余曼丽, 等. 载药明胶微球剂的制备及应用研究进展[J]. *农药学报*, 2021, 23(4): 657-667.
- [61] 王召, 尹明明, 陈福良, 等. 阿维菌素B₂海藻酸钠-壳聚糖包埋颗

- 粒剂的制备及性能研究[J]. 农药学报, 2017, 19(6): 744-754.
- [62] 袁会珠, 杨峻, 林勇, 等. 日本植保无人机施用农药制剂登记管理情况分析[J]. 农药科学与管理, 2021, 42(3): 3-7; 11.
- [63] YAO G K, WEN Y J, ZHAO C, et al. Novel amino acid ester-chlorantraniliprole conjugates: design, synthesis, phloem accumulation and bioactivity[J]. Pest Management Science, 2017, 73 (10): 2131-2137.
- [64] 李文明, 秦兴民, 李青阳, 等. 控制释放技术及其在农药中的应用[J]. 农药, 2014, 53(6): 394-398; 438.
- [65] LUO J, ZHANG D X, JING T F, et al. Pyraclostrobin loaded lignin-modified nanocapsules: delivery efficiency enhancement in soil improved control efficacy on tomato *Fusarium* crown and root rot[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 394: 124854.
- [66] 陈歌, 曹立冬, 赵鹏跃, 等. 甲氧基丙烯酸酯类农药缓控释制剂的研究进展[J]. 现代农药, 2021, 20(2): 7-11; 22.
- [67] PRIYA S, MADHUBAN G, RAJESH K, et al. Development of pyridalyl nanocapsule suspension for efficient management of tomato fruit and shoot borer (*Helicoverpa armigera*) [J]. Journal of Environmental Science and Health Part B, 2014, 49 (5): 344-351.
- [68] LI D, LIU B X, YANG F, et al. Preparation of uniform starch microcapsules by premix membrane emulsion for controlled release of avermectin[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 136: 341.
- [69] LI Z Z, XU S A, WEN L X, et al. Controlled release of avermectin from porous hollow silica nanoparticles: influence of shell thickness on loading efficiency, UV-shielding property and release [J]. Journal of Controlled Release: Official Journal of the Controlled Release Society, 2006, 111(1-2): 81-88.
- [70] YUAN H Z, LI G X, YANG L J, et al. Development of melamine-formaldehyde resin microcapsules with low formaldehyde emission suited for seed treatment[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2015, 128: 149-154.
- [71] YANG D B, WANG N, YAN X J, et al. Microencapsulation of seed-coating tebuconazole and its effects on physiology and biochemistry of maize seedlings[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2014, 114: 241-246.
- [72] 许春丽. 多功能农药载药体系设计与调控释放性能研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [73] 冯德学, 吕新春, 高立志. 国内功能性肥料——药肥的生产方法[J]. 磷肥与复肥, 2016, 31(10): 16-18.
- [74] JASON C W, JORGE G T. Achieving food security through the very small[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(8): 627-629.
- [75] 王德飘. 0.03%氯虫苯甲酰胺颗粒剂(药肥)在甘蔗上的残留分析及消解动态研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
- [76] 冉阳. 氯虫苯甲酰胺微胶囊缓释药肥的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [77] 李国防. 药肥研究进展[J]. 河南化工, 2018, 35(7): 12-15.
- [78] ZHAO P Y, YUAN W L, XU C L, et al. Enhancement of spirotetramat transfer in cucumber plant using mesoporous silica nanoparticles as carriers[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(44): 11592-11600.
- [79] ZHAO P Y, CAO L D, MA D K, et al. Translocation, distribution and degradation of prochloraz-loaded mesoporous silica nanoparticles in cucumber plants[J]. Nanoscale, 2018, 10(4): 1798-1806.
- [80] KHANDELWAL N, BARBOLE R S, BANERJEE S S, et al. Budding trends in integrated pest management using advanced micro- and nano-materials: challenges and perspectives[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 184: 157-169.

(责任编辑:高蕾)

硒酸钠:一种防治番茄细菌性斑点病的环保手段

番茄作为最重要的园艺作物之一,2021年全球产量为3 870万t。在番茄种植过程中会受到各种环境因素的影响,包括生物和非生物因素。而生物逆境方面,番茄易受各种病毒、细菌和真菌的影响,这也是番茄产量和品质的主要限制因素。其中丁香假单胞菌(*Pseudomonas syringae*)引起的细菌性斑点病是番茄上常见且发生严重的疾病之一。目前,控制该病的主要措施是铜类杀菌剂与代森锰联合施用。然而,随着人们对环境和人类健康标准要求的提高,和丁香假单胞菌对铜抗性的发展,开发出高效又环保的病害管理措施势在必行。

意大利佩鲁贾大学农业、食品和环境科学系科研人员在Agronomy在线发表了关于硒酸钠防治番茄细菌性斑点病的研究文章。硒(Se)是一种对植物有益的微量营养素,在微量下可以促进植物生长并增强植物的非生物胁迫能力,例如耐盐分、干旱、寒冷和高温。该研究论文研究了利用4 mg/L硒酸钠(Na_2SeO_4)通过土壤浇灌法对引起番茄细菌性斑点病的丁香假单胞菌的影响。研究表明硒酸钠处理过的受丁香假单胞菌侵染的番茄植株病害程度得到改善,并且丁香假单胞菌细胞无法在处理过的番茄植株中增殖。还在体外评估了硒酸钠对丁香假单胞菌的作用,表明该病菌的生长受剂量依存性影响。并且观察到被标记的胍基质沉积以及水杨酸反应机制番茄的“病程相关蛋白1b1”(PR1b)的表达,但没有茉莉酸介导的“蛋白酶抑制剂2”(PIN2)基因的表达。硒酸钠具有诱导番茄防御反应和抗菌活性的作用,可以作为一种具有环境友好并有效控制番茄细菌性斑点病的防控手段。同时,发现处理过的西红柿中硒含量增加,为解决饮食中的硒缺乏问题提供了一种有效方法。

(金兰译)