

◆ 专论:农药加工与剂型(特约稿) ◆

## 农药的靶向传输与剂量效应研究进展

李园园<sup>1</sup>,蔡润泽<sup>1</sup>,徐博<sup>2</sup>,黄啟良<sup>1</sup>,曹立冬<sup>1</sup>,曹冲<sup>1</sup>,余曼丽<sup>1</sup>,赵鹏跃<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院植物保护研究所,北京 100193 2. 河南好年景生物发展有限公司,郑州 450000)

**摘要:** 农药的靶向传输、剂量效应与农药有效利用率密切相关。农药在植物体内的传输是一个复杂的过程,其中农药的理化性质、制剂体系、施药方式、植物种类、组织结构等多种因素都对会农药剂量传递效率产生影响。本文综述了农药在植物体内的传输行为、农药对靶剂量传递效率的影响因素,以及改善农药剂量效应的方法等方面的研究进展,为农药剂量效应的研究、农药制剂的研发,以及农药的科学使用提供参考。

**关键词:** 对靶沉积;传输行为;传递效率;有效利用率;研究进展

中图分类号:TQ 450 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2024.05.004

### Research progress on targeted delivery and dose effects of pesticides

LI Yuanyuan<sup>1</sup>, CAI Runze<sup>1</sup>, XU Bo<sup>2</sup>, HUANG Qiliang<sup>1</sup>, CAO Lidong<sup>1</sup>, CAO Chong<sup>1</sup>, YU Manli<sup>1</sup>, ZHAO Pengyue<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Henan Haonianjing Biological Development Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The targeted delivery and dosage effect of pesticides are closely related to the efficient utilization of pesticides. The transport of pesticides within plants is a complex process, influenced by various factors including the physicochemical properties of the pesticides, formulation systems, application methods, plant species, and tissue structures. The research progress on the transport behavior of pesticides within plants, the factors affecting the efficiency of targeted dosage delivery, and methods to improve the dosage effect of pesticides were reviewed in this paper. This review aimed to provide references for the study of pesticide dosage effects, the development of pesticide formulations, and the scientific application of pesticides.

**Key words:** target deposition; transport behavior; delivery efficiency; utilization efficiency; research progress

农药可有效控制植物病虫害,保证作物产量和质量,已成为现代农业不可或缺的一部分<sup>[1]</sup>。然而,农药利用率低、使用方法不当等问题日益严峻,造成农业环境污染,影响农产品质量安全,威胁农业可持续发展。在我国农业农村部提出农药零增长行动方案的背景下,明确农药的靶向传输与剂量效应,探索农药科学使用方法,减少剂量传递过程中的浪费是提高农药有效利用率的重要途径。

在实际生产中,作物对农药的利用是一个复杂的过程。首先,根据病虫害的防治需求,选择合适

的农药有效成分,并根据农药的性质将其加工成制剂产品。然后,通过适当的施药技术将农药施用到作物上。农药施用后会在作物表面沉积,但只有一部分剂量能被植物吸收并传输到其他部位。最终,农药的有效成分发挥防治作用,对病虫害产生影响。在这个过程中,每一个环节都涉及农药剂量的传递和损失,影响农药有效利用率。本文综述了农药在植物体内的传输行为、农药对靶剂量传递效率的影响因素和改善农药剂量效应的方法等,为改善农药剂量传递效率,提高农药有效利用率提供理

收稿日期:2024-07-18

基金项目:国家自然科学基金项目(32372599)

作者简介:李园园(2000—),女,山东聊城人,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 1y17686263783@163.com

通信作者:赵鹏跃(1988—),女,哈尔滨人,博士,副研究员,主要从事农药剂型加工与分析研究工作。E-mail zhaopengyue@caas.cn

论支撑。

## 1 农药在植物体内的传输行为

根据农药在植物体内的作用方式,可将农药分为内吸性和非内吸性两类。内吸性农药通过渗透和扩散等方式被植物体吸收并传输至其他部位,从而抑制已经发生的病虫害,提高植物的抗虫抗病能力。内吸性农药不受降雨、气候等环境因素影响,同时保护根部免受土壤病虫害侵袭,并阻止其向茎叶部蔓延。非内吸性农药则施用于种子、茎、叶片或果实上,以防止病虫害的入侵。由于仅残留于植物体表面,非内吸性农药不能阻止植物组织中的病虫害进一步繁殖,也无法保护未被覆盖或新生长的植物部分,亦不能防治病虫害从土壤中对根茎的侵害。然而,几乎所有农药在植物体上都表现出不同程度的吸收和传导作用,因此并不存在绝对的非内吸性农药,只是它们在不同植物种类、吸收部位及生长阶段表现出较大的差异<sup>[2]</sup>。

农药在植物体内的传输机制主要包括3个关键阶段。首先,农药在植物的根部、茎部或叶部表面沉积或吸附,随后,农药穿透角质层和表皮,并通过共质体或质外体2种途径扩散至维管组织,最后,农药通过维管组织转运到植物的其他部位,从而实现农药在植物体内的有效传输(图1)<sup>[3-5]</sup>。

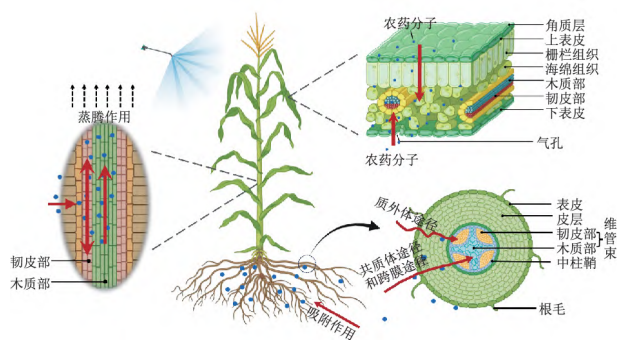


图1 农药在植物体内的传输

### 1.1 根部

农药可以通过主动吸收和被动扩散2种方式被植物根部吸收,其中被动扩散是主要的吸收方式。当农药存在于土壤溶液或灌溉水中时,它与植物根部接触,通过简单扩散到达根系,随后穿过根表皮<sup>[2]</sup>。农药进入根部后,主要通过质外体和共质体2种途径进行传输,传输途径的传递效率受到农药的理化性质(如溶解度、亲水性和亲脂性)以及植物根部的结构和功能状态的影响<sup>[6-7]</sup>。

鞠超<sup>[8]</sup>研究了小麦根部对7种常用农药(呋虫胺、噻虫嗪、吡虫啉、咪唑乙烟酸、啉菌酯、丙环唑、毒死蜱)的吸收及传输行为。研究发现,这7种农药在小麦植株中的吸收方式均属于被动吸收。其中,呋虫胺、噻虫嗪和吡虫啉被小麦根系吸收后分布在细胞的可溶性组分中,易于转运至叶片等植物的其他部位,咪唑乙烟酸虽然也主要分布在细胞的可溶性组分中,但由于离子捕获效应,其转运能力降低,主要积累在根部;啉菌酯、丙环唑和毒死蜱则主要分布在细胞壁和细胞器中。

### 1.2 茎部

植物茎部的表皮层通常较为薄弱,农药首先通过茎部表皮的气孔或细胞间隙进入茎部组织,随后会通过茎部维管组织进行传导,并通过蒸腾作用在木质部随水分一起向上传导至叶片和果实等其他部位<sup>[6,9]</sup>。根据农药传导的形式,可以将其分为局部传导、向上传导和双向传导3种类型。局部传导主要是指药剂在同一茎段内的传导,比如从茎的一个部位传导至另一个部位;而向上传导是农药从茎基部向顶部传导的过程,是农药在植物茎部传导的主要方式<sup>[10-11]</sup>。

农药的理化性质,茎表皮的结构(如木质部和韧皮部的发达程度、细胞间隙的大小等),外部条件等因素都会影响农药在茎部的吸收和传导<sup>[12]</sup>。通过同位素示踪和生物测定等方法,已证明甲胺磷进入云杉木质部后可以向上传导至韧皮部;久效磷在杨树和悬铃木内可以向上传导、向下和横向传导,其中向上传导为主要方式;氧乐果在小钻杨内先通过木质部向上输导,再转移至韧皮部发挥杀虫作用;而使用品红试剂标记的氧乐果在板栗树体内可以进行双向传导。这些研究揭示了药剂在植物体内传导的复杂性和特异性<sup>[2]</sup>。

### 1.3 叶部

植物叶片表面具有高度类脂结构,能够防止水分流失,调节体内外的气体交换,并选择性筛选外界物质<sup>[13-14]</sup>。沉积在植物叶片表面的农药首先通过扩散或协助扩散作用进入叶片,再通过细胞间的胞间连丝和细胞内的质外体途径进行传输,进一步传输到叶肉细胞和维管束中,最终实现农药在全植株的分布<sup>[15]</sup>。农药的亲脂性能会影响其在植物叶片上的吸收与传输,亲脂性分子比亲水性分子更容易渗透进入细胞。此外,植物叶片的结构也会对农药的吸收与传输带来影响。研究表明,水稻叶片角质层覆盖大量的蜡质,形成网状结构,氟氟草酯处理24 h

后,其吸收率低于30%,而稗属杂草角质层具有较少的蜡质,该药最大吸收率达73%<sup>[16]</sup>。叶片内部的代谢和降解作用也会影响农药的传输和积累,如叶片的光合作用增强,有利于农药在叶片中的代谢和降解,进而影响农药的剂量传递<sup>[17]</sup>。

综上所述,农药在植物体内的传输是一个复杂的生物学过程,涉及根、茎、叶等多个部位。这些环节受到植物种类、生长状态、农药的理化性质以及环境因素的综合影响。在实际施药过程中,需要综合考虑各种因素,结合农药在植物体内的传输机制和作用规律,选择合适的农药和使用方法,以确保农药的有效性和安全性。

## 2 农药对靶剂量传递效率的影响因素

农药对靶剂量传递效率直接影响其有效利用率<sup>[18]</sup>;而农药的性质、制剂体系、施药方式以及植物组织结构等因素对农药的对靶剂量传递均有着重要影响。

### 2.1 农药的性质

农药的水溶性、油水分配系数和相对分子质量等性质决定了其在植物体内的传递路径和效率。研究表明,新烟碱类杀虫剂(吡虫啉、噻虫嗪、噻虫啉、噻虫胺、啶虫脒和呋虫胺)均可在植物体内传导,但由于理化性质不同,经作物体内传输后,各药剂在花粉和花蜜中的分布剂量存在显著差异。噻虫啉、吡虫啉和噻虫嗪的水溶性分别为0.184、0.61、4.1 g/L,相对分子质量分别为252.7、255.7、291.7,油水分配系数分别为1.26、0.57、-0.13,3种药剂在花蜜中的平均分布量具有较大差异,分别为1.8~6.5、0.1~72.8和0.1~11.0 ng/g<sup>[15]</sup>。Briggs等<sup>[19]</sup>研究表明,当 $\log K_{ow}$ (正辛醇/水分配系数)小于4时,随着油水分配系数增加,农药在大麦茎秆中的吸收传导能力增加。鞠超<sup>[8]</sup>也发现 $\log K_{ow}$ 和 $S_w$ (水溶性)与农药在小麦植株中的转运和积累存在线性关系, $\log K_{ow}$ 越高,农药在细胞固相组分中的亚细胞浓缩因子及分布比例也越高;而 $S_w$ 越高,农药的转运能力则越低。Li等<sup>[20]</sup>研究结果表明,部分新烟碱类农药并不适用这个规律,噻虫嗪的 $\log K_{ow}$ 为-0.13,啶虫脒的 $\log K_{ow}$ 为0.8,而噻虫嗪更容易被植物根系吸收。产生该差异可能是因为所测新烟碱类杀虫剂的亲脂性较低( $\log K_{ow}$ 小于1.8),其吸收和转运性能的差异与 $\log K_{ow}$ 、 $S_w$ 或解离常数( $pK_a$ )呈弱相关,而与相对分子质量呈显著相关。氟噻唑吡乙酮脂溶性好,在植物组织的传输过程中易于穿过细胞膜,主要通过被动扩散进入植

物细胞,而烯酰吗啉的水溶性较好,但脂溶性较差。迟源冬等<sup>[21]</sup>研究发现,将氟噻唑吡乙酮施用于黄瓜幼苗的根部后,该药剂能够有效地被根部吸收,并向上传导至植株的茎部和叶片;与烯酰吗啉相比,氟噻唑吡乙酮在根部吸收、茎部积累和叶片积累的药剂最大值分别为烯酰吗啉的20%、5%和0.6%。

### 2.2 农药制剂体系

农药制剂体系是指将农药原药制备成农药制剂的过程,是确保农药有效成分均匀分布和稳定的关键,直接影响后续过程中的剂量效应。农药制剂需稀释成农药药液后才可使用,在这一过程中,农药制剂与溶剂混合,形成均匀的液体分散体系。制剂的种类、溶剂的选择、稀释比例及搅拌方式均会改变农药有效成分的分散状态。这种变化可能导致药液的理化性质改变,影响药液在靶标上的沉积性能、覆盖率和吸收率,进而影响农药的生物效应和对靶剂量传递效率<sup>[15,22]</sup>。

在传统茎叶喷雾过程中,农药药液通过喷雾器械形成雾滴并到达靶标作物。在此过程中,雾滴的大小、速度和分布均会影响农药的剂量传递效率<sup>[23-25]</sup>。Hong等<sup>[22]</sup>试验结果显示,当雾滴的粒径为50~200  $\mu\text{m}$ 时更容易被树冠捕获,当粒径大于240  $\mu\text{m}$ 时更容易沉积到地面,而当雾滴粒径小于20  $\mu\text{m}$ 时很难实现有效沉积。Hall<sup>[26]</sup>研究了3唑锡5种剂型产品对红蜘蛛的驱避作用、平均产卵量和平均取食斑数的影响。50%三唑锡可湿性粉剂、30%乳油、5%悬浮剂、6%微囊悬浮剂和80%水分散粒剂的驱避率分别为55%、17.5%、45%、50%和17.5%,试验证明可以通过剂型变化改变害螨的取食行为,影响农药的有效利用率。研究还证明,氯氰菊酯的雾滴密度影响了药剂在红蜘蛛体内的传递剂量。使用氯氰菊酯静电喷雾器专用制剂时,雾滴密度为每碟1滴时,红蜘蛛主要取食,很少爬行;增至每碟4滴时,红蜘蛛则主要爬行,少量取食。而氯氰菊酯乳油制剂雾滴密度为每碟4滴时,红蜘蛛仍主要取食,几乎不爬行。这表明氯氰菊酯静电喷雾器专用制剂雾滴密度较高时,药剂向红蜘蛛体内的传递显著增强,而乳油制剂几乎无药剂传递发生<sup>[26]</sup>。

### 2.3 施药方式

传统的茎叶喷雾是农药施用最常用的方法。然而,茎叶喷雾过程中药剂会发生蒸发、飘移、弹跳等现象,会降低农药对靶剂量传递效率。针对病虫害的发生规律,改变施药方式,如树干高压注射、种子处理、无人机施药等,可使农药有效成分能够被植物

更充分吸收利用,提高农药对靶剂量传递效率。

树干高压注射技术使农药能够更深入地进入树体内部,避免了传统喷雾施药时可能出现的药液蒸发、飘移、弹跳破裂以及脱靶流失等问题。张鹏九等<sup>[27]</sup>将树干高压注射技术与传统的喷雾施药方法进行了对比。结果表明,虽然树干高压注射在速效性上稍逊于喷雾施药,但在持效性方面表现更为出色。通过树干高压注射吡虫啉1 d后,高剂量的吡虫啉对苹果黄蚜的防治效果为82.81%,施用20 d后,其防治效果为80.67%,依然能够维持在较高水平。这表明树干高压注射施药方式不仅提高了农药的利用率,还显著延长了农药的持效期。

植保无人机施药技术具有安全性好、喷雾效率高、成本低等优势,无人机旋翼产生的向下气流扰动了作物,有助于增加雾流对作物的穿透性,从而改善药剂在作物表面的沉积效果。应俊杰等<sup>[28]</sup>比较了担架式喷雾机、背负式智能电动喷雾器和植保无人机3种施药器械对防治水稻白叶枯病效果的影响。结果表明,采用植保无人机进行飞防施药能提高农药的覆盖率和均匀度,且防治效果最佳,防效达到84.36%。

种子包衣技术作为地下施药的一种常见方式,凭借其靶向性好、药剂利用率高以及对环境污染小的特性,在农业生产中展现出显著的优势。朱岳梅<sup>[29]</sup>探究了包衣对水稻产量形成、能量利用和经济效益的影响。结果表明:包衣处理组比未包衣处理组的水稻发芽率平均提高了23.47%,成苗率、株高、鲜重和干重分别提高了95.18%、50.6%、91.25%、109.68%;且包衣处理可缓解淹水抑制,净能量、能量利用效率及能量生产力分别提高了26.79%、21.88%、30.73%,显著提高了经济效益。

此外,施药剂量也是影响农药传输效果的重要因素。Sun等<sup>[30]</sup>比较了不同浓度吡虫啉在玉米植株中的内吸、传导和累积行为,发现其在玉米植株中的内吸传导能力与药剂浓度呈正相关。迟源冬等<sup>[21]</sup>在黄瓜叶片的叶柄处喷施200 mg/L氟噻唑吡乙酮药液后,叶柄周围半径约3 cm的区域内未出现病斑,病害抑制率为74.82%;而当药液质量浓度提升至400 mg/L时,只有叶片尖端有微量病斑,药效显著,病害抑制率高达93.56%。

## 2.4 植物组织结构

植物的根系结构、茎部维管系统和叶片形态对农药的吸收和传输能力均存在影响。双子叶植物茎部维管束排列成一个环,而单子叶植物茎部维管束

随机散布在整个组织中,因此,双子叶植物体内的农药传输速度通常高于单子叶植物。Campbell等<sup>[31]</sup>研究了烯禾啉在单子叶植物(偃麦草和稗草)和双子叶植物(苜蓿和荷兰豆)中的积累、吸收、转运和分布,发现处理后24 h内双子叶植物中农药浓度比单子叶植物更高。Ge等<sup>[32]</sup>研究探讨了毒死蜱通过叶面吸收和根部吸收在蔬菜中的降解和分布情况。在不同的蔬菜品种和施药方式下,毒死蜱的降解动态和分布规律均存在差异。当采用根部处理,小白菜对毒死蜱的转运能力相较于叶面处理表现出更高的效率,而在莴苣中叶面处理则更有利于毒死蜱的转运和分布。Li等<sup>[33]</sup>研究了吡虫啉在青菜苗期、速生期和成熟期的吸收、转运和累积行为,发现不同品种、不同生育期蔬菜中吡虫啉浓度差异显著。速生期的抗热四季青、苗期的矮脚黄和苗期的高梗白根中吡虫啉质量分数最高,分别为 $(2.64 \pm 0.21)$  mg/kg、 $(1.79 \pm 0.39)$  mg/kg和 $(1.26 \pm 0.03)$  mg/kg;吡虫啉在矮脚黄和高梗白的速生期最容易累积,而夏帝青、抗热四季青和紫油菜的苗期累积最高。除了根部浓度因子、转运因子和生物浓度因子3个因素,蔬菜品种和生育阶段对吡虫啉的吸收和传导也有重要影响。

## 3 改善农药剂量效应的方法

传统农药施用存在剂量过大、环境污染以及靶标专一性差等问题,改善农药剂量效应是提高农药有效利用率的重要方法。通过改变农药的结构、改善农药的分散性、优化助剂的选择和控制有效成分的释放行为等,可有效改善农药剂量效应。

### 3.1 改变农药的结构

改变农药结构是改善农药剂量效应的一个重要的研究方向,旨在提高农药在植物体内的吸收、传导和利用率,从而优化防治效果并减少环境污染。研究表明,对阿维菌素部分结构进行改造,如碳-碳双键、羟基、侧链和羰基的修饰,可以显著提高其生物活性,并降低对环境的潜在风险<sup>[34]</sup>。当昆虫取食植物留下的伤口会产生水杨酸、茉莉酸或酚类等物质,将农药分子与这些物质偶联可引导改性后的农药向伤口处传导,从而改善农药的传输与剂量分布<sup>[35-36]</sup>。

利用植物定向输送营养物质的特性,将农药分子与氨基酸、葡萄糖等营养物质偶联已经取得了显著的研究成果。Wu等<sup>[37]</sup>研究发现,葡萄糖-氟虫腈偶联复合体在韧皮部的流动性相比传统农药提高了约20%,这一特性可能得益于其葡萄糖结合的结构。

Yao等<sup>[38]</sup>将含酯基的氨基酸(如甘氨酸酯、丙氨酸酯等)与氯虫苯甲酰胺偶联,使其更具亲和力,能够特异性地与植物组织中韧皮部的生物分子相互作用。所有的共轭物在蓖麻中均表现出优异的韧皮部迁移率和木质部迁移率,韧皮部中的浓度可以达到培养基中浓度的3倍,提高了药剂在作物中的内吸和传导能力,而且它们对特定的害虫具有显著的杀灭或抑制效果。

### 3.2 改善农药的分散性

利用纳米技术将农药制成纳米级分散体系,可有效提高农药的分散性和稳定性,保证农药在使用过程中的均匀性和持久性,避免出现沉淀、分层或团聚等现象,使其更容易与植物或害虫的表面接触,提高农药的覆盖率和防治效果。当农药的分散尺寸减小时,其有效成分更容易被植物或害虫吸收和代谢,在相同剂量下能够更好地发挥药效并减少农药的浪费和流失<sup>[39-41]</sup>。

当农药分散尺度减小时,药剂颗粒比表面积增大,表面反应活性随之提高,静电吸附和机械黏附等作用增强,使其更容易吸附在植物外表皮,进而被植物体吸收利用<sup>[42]</sup>。同时,小尺度的分散体系可以改善农药组分的溶解性,提高迁移率,更易通过蒸腾等作用进入植株<sup>[43]</sup>。Tong等<sup>[44]</sup>以单甲醚聚乙二醇-聚乳酸-羟基乙酸共聚物为载体制备纳米尺度的异丙甲草胺颗粒,该颗粒的微小尺寸和亲水性片段增强了异丙甲草胺的水溶性,且可通过质外体途径内化进入植物体内。Zhao等<sup>[45]</sup>以介孔二氧化硅作为载体制备纳米尺度的咪鲜胺颗粒。相较于传统的咪鲜胺悬浮剂,其具有基本相同的杀菌活性,但该颗粒在黄瓜叶片和根部的吸收与迁移性能优势显著。Bombo等<sup>[46]</sup>以聚己内酯为载体包覆莠去津制备纳米级微囊。研究发现,该微囊能够被植物体较好地吸收及传导,可从气孔渗透到叶肉组织,通过维管组织进入细胞后释放活性物质进而发挥除草效果。

在杀虫方面,小尺度的农药分散体系能够有效增强靶标作物叶面上药剂的沉积量,进而提高昆虫通过接触而吸收的药剂剂量<sup>[47]</sup>。例如,黄粉虫的表皮存在直径约为6~65 nm的孔道,而纳米金刚石的直径约10 nm左右,可以负载杀虫剂通过孔道进入黄粉虫体内<sup>[48]</sup>。Gao等<sup>[49]</sup>制备了纳米尺度的阿维菌素载药体系,该载药体系能显著提高阿维菌素在水稻叶面的沉积效果,增加昆虫与药剂的接触机会,对稻纵卷叶螟的防治效果显著优于阿维菌素乳油。翟婧等<sup>[50]</sup>制备了甲氨基阿维菌素苯甲酸盐纳米制剂,该

制剂在水稻田间试验中展现出80%以上的枯心防效和85%以上的杀虫效果,显著优于传统制剂。

### 3.3 优化助剂的选择

农药助剂在改善农药剂量效应中起着重要作用。农药助剂本身没有生物活性,但通过合理地使用农药助剂,可以显著改善农药药液性能,调控雾滴在靶标表面的附着、润湿、沉积、渗透和蒸发,从而增强农药在植物体或害虫体表的附着、吸收和传导能力,使农药能够高效地进入植物体内并发挥药效,提高农药的利用率<sup>[51-55]</sup>。

Song等<sup>[56]</sup>研究发现,液滴在植物叶片上沉积后,表面活性剂分子通过非共价键作用吸附在气-液与固-液界面,改变靶标界面的结构性性质,进而优化液滴的润湿与沉积效果。在药液中添加1%的十二烷基硫酸钠和三硅氧烷表面活性剂能够在一定程度上降低液滴反弹,而添加1%磺基琥珀酸钠表面活性剂后液滴不仅能迅速达到最大铺展,而且可以抑制液滴反弹,增大了与植物叶片的接触面积,进而促进农药的传输与剂量分布。

当雾滴干燥后,含有吸湿性表面活性剂形成的一层微薄的水分与表面活性剂混合的凝胶,包裹着药剂的有效成分,并与叶面的蜡质保持良好接触,从而增强了药剂穿过蜡质层表皮的能力。对于多气孔的叶片表面,选择具有极强湿润能力的有机硅非离子型表面活性剂(如Silwet L277、L27067和Y26652)药液能够迅速展布,0.5 μL的药液可以展布到146.9 mm<sup>2</sup>(相同浓度的Agral 290只能展布到2.7 mm<sup>2</sup>),证明了助剂在农药传递中的关键作用<sup>[57]</sup>。

黄桂珍等<sup>[58]</sup>将聚丙烯酸酯类微交联结构功能高分子助剂G-100A与脂肪醇聚氧乙烯醚类结构高分子助剂以及三苯乙烯苯酚聚氧乙烯醚磷酸酯等小分子助剂复配后,成功制备了40%苯醚甲环唑·吡唑醚菌酯水乳剂,显著提高了药剂对靶标的黏附力与沉积量,且具有良好的抗蒸发性能。120 s内液滴体积的蒸发减少量仅约为7%,延长了农药在靶标上的滞留时间,进而提高了农药有效利用率。在防治水稻纹枯病时,该复合助剂制备的农药制剂即使减量25%仍可达到对照药剂的防效。

### 3.4 控制有效成分的释放行为

改善农药有效成分释放行为是提高农药剂量效应的重要方法。通过物理或化学手段控制农药的释放速度,使农药能够按照作物需求缓慢释放,从而达到长期、稳定、有效的防治效果<sup>[59]</sup>。在无机或有机等功能材料的作用下,农药的物理化学性能更加

稳定。例如,以壳聚糖、木质素和海藻酸盐等天然高分子材料为载体,其长链结构和多种官能团可以与农药的活性成分产生较强的结合作用,有助于实现农药的持久释放<sup>[60-62]</sup>。

Yu等<sup>[63]</sup>以聚乳酸为载体,用单宁酸进行化学修饰,制备了阿维菌素和啮菌酯微球。由于单宁酸可以显著增加对黄瓜叶片的附着力,与传统农药相比,该载药微球在黄瓜叶片上的滞留率提高了50%以上,其持续释放时间超过120 h,有效延长了农药的释放时间,增强了黄瓜叶片对有效成分的吸收与传导,进而提高了农药的利用率。

Ye等<sup>[64]</sup>以羧甲基壳聚糖和光不稳定的2-硝基苄基为载体制备了一种光敏性的两亲性共轭物,成功负载了敌草隆。其载药率高达42.1%,表现出优异的光响应释放性能,使有效成分敌草隆能够在特定的光照条件下释放并被植物吸收利用。

王松<sup>[65]</sup>用埃洛石纳米管和蒙脱土填充改性聚乙烯醇-淀粉复合膜,用此膜包封2,4-二氯苯氧乙酸和莠去津。该复合膜耐水性强且具有紫外线屏蔽功能,可有效延缓农药有效成分的释放,降低光降解速度,从而改善植物对药剂的吸收与利用。

Xu等<sup>[66]</sup>利用聚多巴胺的光热性能和聚异丙基丙烯酰胺的温度敏感性,以聚多巴胺为内核的聚异丙基丙烯酰胺水凝胶为载体成功负载了吡虫啉。通过将光能转化为热能,有效降低了吡虫啉在环境中的释放速率,使害虫与农药有效成分接触的机会增加,提高了吡虫啉的有效利用率。

#### 4 总结与展望

在农业生产中,农药是防控有害生物的重要物资。然而,低效使用农药不仅影响农产品的质量和生态环境,还增加了农业生产的成本与人工施药费用。对于被动接受农药的植物来说,农药的利用是一个复杂的过程。农药通过植物的吸收机制进入植物体内,随后通过茎部的传导组织传输到植物的各个部位,确保对害虫和病害的精准防控。

目前,已有大量研究表明,通过改变农药结构、改善农药的分散性、优化助剂选择和有效控制成分释放行为等方法,可有效改善农药剂量效应,从而提高农药有效利用率。然而,已有的研究主要集中在单一方法(如只改变施药方式或只改变助剂选择等)对农药剂量传递效率的影响,而农药的靶向传输与剂量传递涉及到多个环节,当其中一个环节的剂量传递发生了变化,可能会对其他环节也带来影

响。因此,在农药实际应用过程中,针对特定的防控场景,如何提高每个环节的剂量传递效率,是下一步研究的重点问题。

农药在植物体内的吸收与传导已有一些研究,但尚不够深入和系统。众所周知,植物对农药的利用受到多种因素的影响,包括农药分子结构、外界气候环境、作物种类及细胞组织等。随着科技的进步和研究的深入,农药在植物体内的吸收及传输机制需更加深入、精准研究,从而为农药的科学使用提供理论依据。同时,如何综合运用现代科技手段,如纳米技术、生物技术、信息技术、人工智能技术等,合理地改善剂量传递效率,并配合科学的施药方式、合理的施药剂量,实现精准施药,也是未来研究的重点问题。

#### 参考文献

- [1] LIANG J, TANG S. Optimal dosage and economic threshold of multiple pesticide applications for pest control[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2010, 51(5/6): 487-503.
- [2] 姚安庆, 杨健. 农药在植物体内的传导方式和农药传导生物学[J]. *中国植保导刊*, 2012, 32(10): 14-18.
- [3] SU Y, ASHWORTH V, KIM C, et al. Delivery, uptake, fate, and transport of engineered nanoparticles in plants: a critical review and data analysis[J]. *Environmental Science: Nano*, 2019, 6(8): 2311-2331.
- [4] JUDY J D, UNRINE J M, RAO W, et al. Bioavailability of gold nanomaterials to plants: importance of particle size and surface coating[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8467-8474.
- [5] LEAD J R, BATLEY G E, ALVAREZ P J, et al. Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects—an updated review[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2018, 37(8): 2029-2063.
- [6] 刘婷婷, 刘尚可, 李北兴, 等. 农药在植物中的内吸和传导行为与施药技术研究进展[J]. *农药学报*, 2021, 23(4): 607-616.
- [7] 杨大文, 丛振涛, 尚松浩, 等. 从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 390-397.
- [8] 鞠超. 小麦植株对七种农药的吸收、转运及其机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [9] TINGTING L, SHANGKE L, BEIXING L, et al. Review on uptake and translocation behaviors of pesticides in plants and application technologies of pesticides[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2021, 23(4): 607-616.
- [10] LI J, GUO L, CUI H, et al. Research progress on uptake and transport of nanopesticides in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2020, 55(4): 513.
- [11] TIAN L F, YUE Y S, XIAO J C, et al. Recent advances and improvement strategies for pesticide uptake ability[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2020, 22(4): 579-585.
- [12] 陈茹玉, 杨华铮, 徐本立. 农药化学[M]. 北京: 清华大学出版社,

- 2002.
- [13] 袁会珠, 王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J]. 植物保护, 2015, 41(6): 9-16.
- [14] 周召路, 曹冲, 曹立冬, 等. 不同类型界面液滴蒸发特性与农药利用效果研究进展[J]. 农药学报, 2017, 19(1): 9-17.
- [15] 黄啟良, 杜凤沛. 农药对靶高效传递与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2023: 2.
- [16] RUIZ-SANTAELLA J, HEREDIA A, PRADO R D. Basis of selectivity of cyhalofop-butyl in *Oryza sativa* L[J]. Planta, 2006, 223: 191-199.
- [17] 李晶, 郭亮, 崔海信, 等. 纳米农药在植物中的吸收转运研究进展[J]. 植物学报, 2020, 55(4): 513-528.
- [18] 卢泓玮, 张宇, 王萌. 农药在植物中内吸传导行为及其研究方法综述[J]. 农药, 2022, 61(8): 547-553.
- [19] BRIGGS G G, BROMILOW R H, EVANS A A, et al. Relationships between lipophilicity and the distribution of non-ionised chemicals in barley shoots following uptake by the roots[J]. Pesticide Science, 1983, 14(5): 492-500.
- [20] LI Y, LONG L, YAN H, et al. Comparison of uptake, translocation and accumulation of several neonicotinoids in komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*) from contaminated soils[J]. Chemosphere, 2018, 200: 603-611.
- [21] 迟源冬, 苗建强, 董雪, 等. 氟噻唑吡乙酮在黄瓜植株内的吸收传导活性研究[C]//中国植物病理学会. 中国植物病理学会2016年学术年会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016: 1.
- [22] HONG S W, ZHAO L, ZHU H. CFD simulation of pesticide spray from air-assisted sprayers in an apple orchard: tree deposition and off-target losses [J]. Atmospheric Environment, 2018, 175: 109-119.
- [23] WOLF R E. Drift-reducing strategies and practices for ground applications[J]. Journal of Pesticide Safety Education, 2013, 15: 62-69.
- [24] DUGA A T, DEKEYSER D, RUYSEN K, et al. Numerical analysis of the effects of wind and sprayer type on spray distribution in different orchard training systems[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2015, 157: 517-535.
- [25] NUYTENS D. Drift from field crop sprayers: the influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means[DB/OL]. [2024-07-01]. [https://www.researchgate.net/publication/28360407\\_Drift\\_from\\_field\\_crop\\_sprayers\\_the\\_influence\\_of\\_spray\\_application\\_technology\\_determined\\_using\\_indirect\\_and\\_direct\\_drift\\_assessment\\_means](https://www.researchgate.net/publication/28360407_Drift_from_field_crop_sprayers_the_influence_of_spray_application_technology_determined_using_indirect_and_direct_drift_assessment_means).
- [26] HALL F. Acs symposium series 371[M]. Washington DC: American Chemical Society, 1988: 260-278.
- [27] 张鹏九, 高越, 刘中芳, 等. 树干高压注射 4 种内吸性农药对苹果黄蚜的防治效果研究 [J]. 中国果树, 2019(4): 79-82.
- [28] 应俊杰, 杨俞娟, 周夙弟, 等. 不同器械施药对水稻白叶枯病防效比较及无人机飞防新技术 [J]. 中国稻米, 2021, 27(3): 103-104; 110.
- [29] 朱岳梅. 种子包衣对淹水直播杂交稻产量、能量利用和经济效益的影响[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2023.
- [30] SUN D, FU J, LU Y, et al. Absorption, transportation and distribution of imidacloprid in maize[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2017, 97(8): 783-795.
- [31] CAMPBELL J, PENNER D. Retention, absorption, translocation and distribution of sethoxydim in monocotyledonous and dicotyledonous plants[J]. Weed research, 1987, 27(3): 179-186.
- [32] GE J, LU M, WANG D, et al. Dissipation and distribution of chlorpyrifos in selected vegetables through foliage and root uptake [J]. Chemosphere, 2016, 144: 201-206.
- [33] LI Y, YANG L, YAN H, et al. Uptake, translocation and accumulation of imidacloprid in six leafy vegetables at three growth stages[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 164: 690-695.
- [34] 刘婷婷, 蔡苏兰, 阎浩林. 阿维菌素产生菌的生物技术改造研究进展 [J]. 沈阳药科大学学报, 2005, 22(6): 463-468.
- [35] 吴必俊, 孙兵, 王振锋. 二肽类双酰胺导向农药的合成与韧皮部输导性探索 [J]. 化工管理, 2023(35): 139-141.
- [36] 徐汇虹, 张志祥, 程东美, 等. 导向农药[J]. 世界农药, 2004(5): 3-9.
- [37] WU H X, YANG W, ZHANG Z X, et al. Uptake and phloem transport of glucose-fipronil conjugate in *Ricinus communis* involve a carrier-mediated mechanism[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(24): 6088-6094.
- [38] YAO G, WEN Y, 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.
- [39] 赵鹏跃, 王超杰, 高威, 等. 30% 吡啶醚菌酯·戊唑醇纳米悬浮剂在辣椒叶片上持留性能研究[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2024, 37(1): 39-42.
- [40] QIAN H, XIANG G D. Synergism of nano additives to five botanical pesticides against western flower thrips *Frankliniella occidentalis*[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2021, 37(3): 459.
- [41] ASIF M, ISLAM S, MALIK M A, et al. Nano pesticides application in agriculture and their impact on environment [M]. London: IntechOpen Ltd., 2021.
- [42] ZHAO L, PERALTA-VIDEA J R, REN M, et al. Transport of Zn in a sandy loam soil treated with ZnO NPs and uptake by corn plants: electron microprobe and confocal microscopy studies[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 184: 1-8.
- [43] WANG Z, XIE X, ZHAO J, et al. Xylem and phloem-based transport of CuO nanoparticles in maize (*Zea mays* L.)[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(8): 4434-4441.
- [44] TONG Y, WU Y, ZHAO C, et al. Polymeric nanoparticles as a metolachlor carrier: water-based formulation for hydrophobic pesticides and absorption by plants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(34): 7371-7378.
- [45] ZHAO P, CAO L, MA D, et al. Translocation, distribution and degradation of prochloraz-loaded mesoporous silica nanoparticles in cucumber plants[J]. Nanoscale, 2018, 10(4): 1798-1806.
- [46] BOMBO A B, PEREIRA A E R S, LUSA M G, et al. A mechanistic view of interactions of a nanoherbicide with target organism[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(16): 4453-

- 4462.
- [47] 孙贺亲, 赵鹏跃, 曹冲, 等. 纳米农药与昆虫抗性[J]. 现代农药, 2023, 22(2): 40-44.
- [48] BLEWETT T A, QI A A, ZHANG Y, et al. Toxicity of nanoencapsulated bifenthrin to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Environmental Science: Nano, 2019, 6(9): 2777-2785.
- [49] GAO Y, ZHANG Y, HE S, et al. Fabrication of a hollow mesoporous silica hybrid to improve the targeting of a pesticide[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 364: 361-369.
- [50] 翟婧, 赵丽稳, 高丹娜, 等. 纳米农药防治水稻二化螟效果初探[J]. 中国稻米, 2024, 30(2): 95.
- [51] 刘芳, 唐静, 赵雪. 添加助剂减少马铃薯晚疫病防治用药量的试验效果[J]. 农业工程技术, 2020, 40(2): 30.
- [52] 胡志平. 不同农药助剂对农药的减量增效效果及对害虫天敌影响[J]. 中国稻米, 2011, 17(3): 52.
- [53] 宋小沫, 奚溪, 薛士东, 等. 喷雾助剂对农药雾滴蒸发特性影响研究[J]. 高校化学工程学报, 2020, 34(5): 1143-1150.
- [54] 张晨辉, 马悦, 杜凤沛. 表面活性剂调控农药药液对靶润湿沉积研究进展[J]. 农药学报, 2019, 21(5/6): 883-894.
- [55] MA Y, HAO J, ZHAO K, et al. Biobased polymeric surfactant: natural glycyrrhizic acid-appended homopolymer with multiple pH-responsiveness[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 541: 93-100.
- [56] SONG M, JU J, LUO S, et al. Controlling liquid splash on superhydrophobic surfaces by a vesicle surfactant[J]. Science Advances, 2017, 3(3): e1602188.
- [57] 屠豫钦. 农药剂型和制剂与农药的剂量转移[J]. 农药学报, 1999, 1(1): 1-6.
- [58] 黄桂珍, 陈博聪, 杨利超, 等. 功能高分子助剂G-100A调控农药对靶传递性能研究[J]. 农药学报, 2020, 22(2): 299-305.
- [59] 施运生. 吡虫啉和丙草胺在有机膨润土上的吸附行为及其缓释研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [60] 程雪健, 郑丽, 曹立冬, 等. 农药缓释颗粒剂载体材料类型及应用研究进展[J]. 农药学报, 2022, 24(1): 1-12.
- [61] 陈歌, 曹立冬, 赵鹏跃, 等. 甲氧基丙烯酸酯类农药缓释控制剂的研究进展[J]. 现代农药, 2021, 20(2): 7-11.
- [62] XU L, CAO L D, LI F M, et al. Utilization of chitosan-lactide copolymer nanoparticles as controlled release pesticide carrier for pyraclostrobin against *Colletotrichum gossypii* Southw[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2014, 35(4): 544-550.
- [63] YU M, SUN C, XUE Y, et al. Tannic acid-based nanopesticides coating with highly improved foliage adhesion to enhance foliar retention[J]. RSC Advances, 2019, 9(46): 27096-27104.
- [64] YE Z, GUO J, WU D, et al. Photo-responsive shell cross-linked micelles based on carboxymethyl chitosan and their application in controlled release of pesticide[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 132: 520-528.
- [65] 王松. 聚乙烯醇-淀粉/纳米粘土复合薄膜的制备及其用于除草剂缓释的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [66] XU X, BAI B, WANG H, et al. A near-infrared and temperature-responsive pesticide release platform through core-shell polydopamine@PNIPAm nanocomposites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(7): 6424-6432.

(编辑: 顾林玲)

## (上接第 23 页)

- thiamethoxam[J]. Chin J Pestic Sci, 2020, 22(6): 1054-1060.
- [40] LUO J, HUANG X P, JING T F, et al. Analysis of particle size regulating the insecticidal efficacy of phoxim polyurethane microcapsules on leaves[J]. ACS sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(12): 17194-17203.
- [41] ZHANG D X, LI B X, ZHANG X P, et al. Phoxim microcapsules prepared with polyurea and urea-formaldehyde resins differ in photostability and insecticidal activity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(14): 2841-2846.
- [42] ZHANG X P, LUO J, JING T F, et al. Porous epoxy phenolic novolac resin polymer microcapsules: tunable release and bioactivity controlled by epoxy value[J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2018, 165: 165-171.
- [43] LI G, XU W, QU H, et al. Selective wetting and transport of systemic pesticides on bionic stomatal surface regulated by host-guest interaction[J]. Chem Eng J, 2024, 488: 150878.
- [44] JURASKE R, CASTELLS F, VIJAY A, et al. Uptake and persistence of pesticides in plants: measurements and model estimates for imidacloprid after foliar and soil application[J]. J Hazard Mater, 2009, 165(1/3): 683-689.
- [45] SUN C, YU M, ZENG Z, et al. Biocidal activity of polylactic acid-based nano-formulated abamectin on *Acyrtosiphon pisum* (Hemiptera: Aphididae) and the aphid predator *Adalia bipunctata* (Coleoptera: Coccinellidae)[J]. PLoS One, 2020, 15(2): e0228817.
- [46] FUKAMACHI K, KONISHI Y, NOMURA T. Disease control of *Phytophthora infestans* using cyazofamid encapsulated in poly lactic-co-glycolic acid (PLGA) nanoparticles[J]. Colloids Surf Physicochem Eng Aspects, 2019, 577: 315-322.
- [47] MAHMOUD L A, DOS REIS R A, CHEN X, et al. Metal-organic frameworks as potential agents for extraction and delivery of pesticides and agrochemicals[J]. ACS Omega, 2022, 7(50): 45910-45934.
- [48] LIANG W, XIE Z, CHENG J, et al. A light-triggered pH-responsive metal-organic framework for smart delivery of fungicide to control *Sclerotinia* diseases of oilseed rape[J]. ACS Nano, 2021, 15(4): 6987-6997.
- [49] YAN Y, HOU H, REN T, et al. Utilization of environmental waste cyanobacteria as a pesticide carrier: studies on controlled release and photostability of avermectin[J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2013, 102: 341-347.
- [50] GUENTHER R H, LOMMEL S A, OPPERMAN C H, et al. Plant virus-based nanoparticles for the delivery of agronomic compounds as a suspension concentrate[J]. Virus-derived Nanoparticles for Advanced Technologies: Methods and Protocols, 2018: 203-214.

(编辑: 顾林玲)