

农药在植物中的内吸和传导行为与施药技术研究进展

刘婷婷¹, 刘尚可¹, 李北兴¹, 刘峰¹, 慕卫¹, 潘灿平², 邹楠^{*1}

(1. 山东农业大学植物保护学院农药毒理与应用技术重点实验室, 山东泰安 271018;

2. 中国农业大学理学院应用化学系农药创新中心, 北京 100193)

摘要: 农药的施用方式和施用效果与其在植物中的内吸和传导行为密切相关。农药在植物表面和内部的内吸和传导行为, 不仅与其自身理化性质有关, 还受植物种类、生长期、生长条件及施药方式等因素的影响。研究农药在植物体内的内吸和传导行为及其影响因素, 对于选择合适的施药技术及提高农药利用率具有重要的指导意义。本文综述了农药在植物体内的内吸和传导行为、传导方式与施药技术的关系以及影响农药内吸和传导行为的因素, 并提出改善农药内吸和传导行为的措施, 以期农药的安全合理施用提供一定的理论支撑。

关键词: 内吸性农药; 内吸传导行为; 施药技术; 影响因素; 研究进展

中图分类号: TQ450.1; S481.2 文献标志码: A 文章编号: 1008-7303(2021)04-0607-10

Review on uptake and translocation behaviors of pesticides in plants and application technologies of pesticides

LIU Tingting¹, LIU Shangke¹, LI Beixing¹, LIU Feng¹, MU Wei¹, PAN Canping², ZOU Nan^{*1}

(1. Key Laboratory of Pesticide Toxicology & Application Technique, College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Taian 271018, Shandong Province, China; 2. Innovation Center for Pesticide, Department of Applied Chemistry,

College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The application methods and application efficacy of pesticide are closely related to their uptake and translocation behaviors in the plants. The uptake and translocation behaviors of pesticides on the surface and inside of plants are not only related to the physical and chemical properties of pesticides, but also affected by some factors, such as plants species, growth period, growth conditions and application technologies. The uptake and translocation of pesticides in plants and the influencing factors have important guiding significance for the selection of application technologies and the improvement effective utilization of pesticides. This review summarized the uptake and translocation behaviors of pesticides in the plants, the relationship between conduction modes and application technologies of pesticides, and the factors influencing the uptake and translocation behaviors of pesticides. The measures to improve the uptake and translocation behaviors of pesticides were also proposed, which will provide some theoretical support for the safe and reasonable application of pesticides.

收稿日期: 2020-09-29; 录用日期: 2021-01-16.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(31801781); 山东省自然科学基金博士基金(ZR2018BC038); 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA17204043-1); 科技部重点研发计划项目(2016YFD0200206).

作者简介: 刘婷婷, 女, 硕士研究生, E-mail: 1425658440@qq.com; *邹楠, 通信作者(Author for correspondence), 女, 副教授, 研究方向为农药残留与农产品安全, E-mail: zounan1226@163.com

Keywords: systemic pesticides; uptake and translocation behaviors; application technologies; influence factors; research progress

农药在防治作物病虫害、保障作物增产增收等方面发挥着重要作用^[1],但是农药的不合理使用及低效使用也会造成诸如有害生物抗药性、生态多样性丧失、面源污染、残留超标等问题^[2-4]。明确农药在植物体内的内吸和传导特性,探究农药的科学施用方式,减少输送系统的浪费是提高农药利用率的重要举措。

农药施用于植物后一般会发内吸行为 (uptake behavior),即药液可经植物体表进入其内部,但并不是所有农药均能发生真正意义上的传导行为 (translocation behavior)。一般来说,把能在植物体内发生内吸和传导行为的农药称为内吸性农药 (systemic pesticide)^[5]。农药在植物体内的内吸和传导性能不仅与其自身性质有关^[6],还与植物种类、生长期、生长条件和施药技术等因素有关^[7]。农药在植物体内的内吸和传导行为不仅影响其效果发挥和作用范围,还关乎其使用技术。研究农药在作物各部位的内吸、动态分布和累积行为,一方面有助于明确农药的作用方式,为选择农药及其施用方式提供依据^[8-10];另一方面有助于明确农药的残留行为,对确保农产品安全具有指导意义^[11]。因此,深入了解农药内吸和传导行为的本质和影响因素,对于提高农药利用率,实现农药增效减量和减轻环境压力具有重要意义。本文从农药在植物体内的内吸和传导行为、传导方式与施药技术的关系、影响农药内吸和传导行为的因素进行综述,并提出改善农药内吸和传导性能的措施,旨在为正确理解农药内吸和传导行为的本质以及农药的安全合理应用提供参考。

1 农药内吸和传导行为

1.1 农药内吸行为

施用农药时按作物部位可分为叶部施药、茎部施药、根部施药和种子处理 4 种方式。内吸性农药施用于作物各部位后首先发生渗透 (penetration) 或内吸行为,但由于各器官生理结构的不同,植物对农药的吸收过程存在差异。

1.1.1 农药在植物叶部的内吸行为 叶片是农药进入植物体内的关键部位。农药进入植物叶片存在亲水性和亲油性两条途径,而亲水性农药和亲油

性农药进入植物叶片可能拥有各自的通道^[12]。植物叶片表皮含有角质层,是一种膜状疏水性脂类物质^[13]。不同种类植物角质层的结构与厚度存在差异,亲油性农药进入叶片组织受到表面角质层的阻隔,会首先扩散到含水非原生质体,然后通过质膜进一步渗透到共质体中^[7];亲水性农药可能通过叶片表皮的气孔或亲水小孔等进入叶片内部,进而分布在细胞质或细胞间隙内^[14-15]。此外,一些外在因素,如雾滴大小、药液表面张力、助剂性质和制剂类型等也影响着叶片对农药的吸收^[16]。

1.1.2 农药在植物茎部的内吸行为 茎部施药多用于树木病虫害的防治。树木茎部施药后,药剂首先穿透树皮的死亡组织和茎干的周皮,随后进入木质部和韧皮部中进行传导分布^[14]⁶⁰⁻⁶¹,但由于植株茎部表皮的角质层较厚,特别是多年生双子叶植物在次生发育过程中表皮形成周皮,其外侧的木栓层可能是药剂进入树木内部的屏障^[7]。

1.1.3 农药在植物根部的内吸行为 植物根系也是农药进入植物体内的重要部位。药液首先被植物根毛吸附,进而被吸收后进入植物内部组织。药液进入木质部导管中传导有共质体和质外体两条途径^[17]。共质体途径是指药剂进入根表皮细胞后在共质体内传导至导管;质外体途径是指药剂不进入植物活细胞,而在质外体(细胞壁、细胞间隙)内由外向内扩散直至进入导管,或者被内皮层的凯氏带所阻挡后进入内皮层细胞,经胞间连丝在活细胞之间移动,穿过中柱鞘及中柱内薄壁细胞到达导管^[7]。Pullagurala 等^[18]认为,农药被植物根系吸收后进入细胞内是一种扩散被动运输的过程,如图 1 所示。

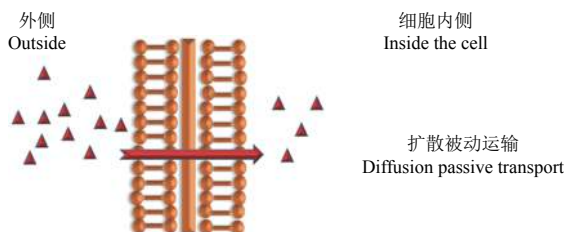


图 1 农药在植物体内的扩散和转运机制^[18]

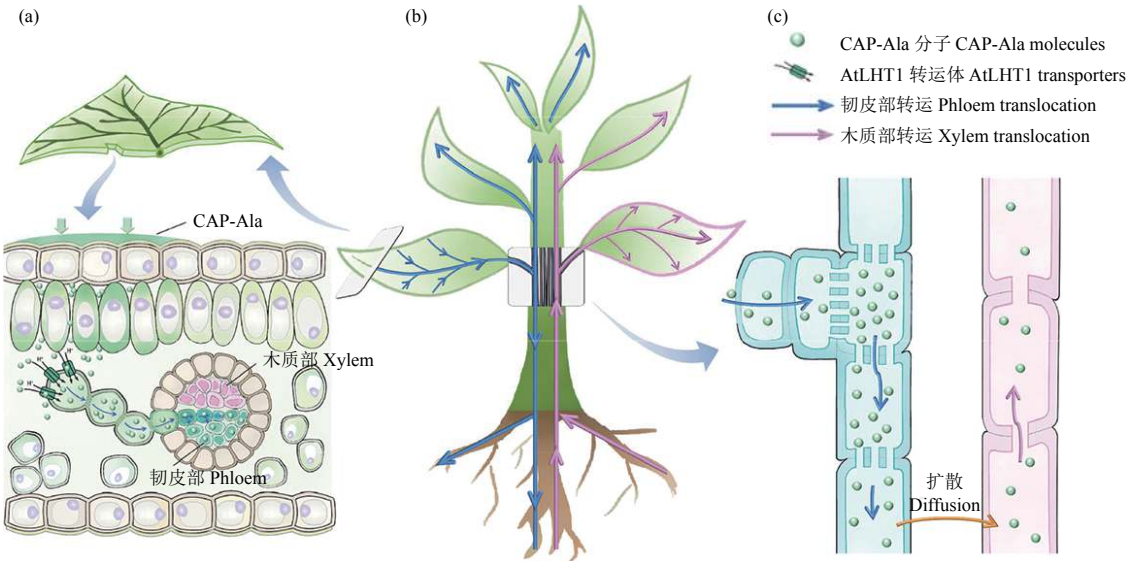
Fig. 1 Proposed mechanism for the diffusion and transport of pesticides in plants^[18]

1.1.4 农药在植物种子部位的内吸行为 种子包衣技术主要是通过某些助剂将农药包覆在种子表面, 具有靶向性强、用药量少、省时省力的特点, 在农业生产中已得到广泛应用^[19], 但是以往的研究通常忽略了在幼苗发育初期种子对于包衣农药吸收和转运的重要性。种子包衣处理后, 种皮和子叶是药剂最初的存贮点, 种子发芽后, 药剂被种子吸收进而转运到幼苗体内^[14]⁵⁹⁻⁶⁰。最近 Tang 等^[20] 利用生长介质传递法和水培溶液传递法证明了玉米幼苗在生长发育过程中根系途径与种子途径对农药的吸收和转运行为同时发生; 虽然与种子相比, 根系对药剂具有更强的吸收与转运能力, 但种子本身对包衣药剂的吸收和转运行为贡献更大; 且药剂向植株上部转移的过程是种子途径和根系途径共同作用的结果。该研究阐明了植物对农药的吸收与转运过程存在着种子途径, 因此, 未来研究明确种子对农药的吸收途径对于包衣农药的高效利用具有重要意义。

1.2 农药传导行为

根据农药在植物体内的传导形式, 可将其分

为局部传导、向上传导和双向传导 3 种类型^[5]。局部传导的农药一般施用于植物组织表面, 药液可以在同一叶片范围内传导, 包括从叶尖到叶柄的横向传导和从叶的正面到背面或方向相反的跨层传导, 该类型农药不能随着蒸腾流在整个植物组织内运动, 如腐霉利、霜脲氰等^[21-22]。向上传导的农药一般用于根部施药, 药液被根系吸收后随着蒸腾流在植物木质部内向植物顶端传导至叶部, 在此过程中茎部仅起着传输桥梁的作用, 并不是最终靶标部位, 如三环唑、丙环唑和三氟苯嘧啶等^[23-24]。双向传导是农药可以在植物体内同时进行向上和向下传导, 如甲霜灵、螺虫乙酯和氟醚菌酰胺等^[9, 25-26]。采用纳米粒子浸没的纸印迹质谱成像技术揭示了载体介导的改性氯虫苯甲酰胺在植物体内的内吸和传导机制, 如图 2 所示, 改性的氯虫苯甲酰胺经叶面施用后在甘蓝植株中具有双向传导能力, 且当初皮部中氯虫苯甲酰胺浓度累积过高时可传导至木质部, 进而通过木质部向叶部迁移^[27]。



(a) CAP-Ala 从叶片表面通过 AtLHT1 转运体向原生韧皮部转运系统的吸收过程; (b) 包括根、茎和叶在内的整个植物系统的传导过程; (c) 由木质部和韧皮部系统引起的茎的双向传导过程。

(a) The uptake processes of CAP-Ala from leaf surfaces to the native phloem translocation system via AtLHT1 transporters. (b) The conduction processes in the whole plant systems, including roots, stems, and leaves. (c) The bidirectional conduction capability in stems via the xylem and phloem systems.

图 2 载体介导的改性氯虫苯甲酰胺在植物体内的迁移机制^[27]

Fig. 2 The translocation mechanism for carrier-mediated modified chlorantraniliprole (CAP) within the plant^[27]

1.3 农药传导行为评价模型

农药在植物体内的分布浓度不仅与药剂自身性质有关, 还与植物生物量稀释作用有关, 所以农药分布浓度不是一个绝对量, 而是一个相对

量^[28]。评价农药在植物体内的内吸传导行为不应仅看其在植物不同组织中的分布浓度, 而应评价其内吸传导能力, 即计算药液在不同转移部位稳态浓度的比值。常用的评价农药内吸传导能力的

数学模型有根浓度因子 (root concentration factor, 简称 RCF)、生物富集因子 (bioconcentration factor, 简称 BCF)、蒸腾流浓度因子 (transpiration stream concentration factor, 简称 TSCF) 和转运因子 (translocation factor, 简称 TF) 等^[6, 29-31]。

RCF 用来评价植物根系对农药的吸收能力, $RCF = C_{\text{根}}/C_{\text{溶液或土壤}}$, $RCF > 1$ 表示该化合物易于被根系吸收^[6]。BCF 表示整个植株对农药的生物富集能力, $BCF = C_{\text{植株}}/C_{\text{溶液或土壤}}$, $BCF > 1$ 表示该化合物易于被植株富集^[29]。TSCF 用来评价农药在木质部中的移动能力, $TSCF = C_{\text{茎}}/C_{\text{溶液或土壤}}$ ^[31]。TF 用来评价化合物向上传导的能力, $TF = C_{\text{茎或叶}}/C_{\text{根}}$, $TF > 1$ 表示该化合物易于由根部向上传导^[31]。

综上所述, 植株不同部位对药剂的吸收途径不同, 因而植株对药剂吸收利用的程度也不同, 从吸收部位的角度来改善农药在植物体内的内吸和传导行为, 可以达到减施增效的目的。植物叶片是吸收药剂的主要部位, 喷雾施药时增加药液在叶片上的持留量和沉积量是增加药液进入植株内部组织剂量的基础。针对药液易流失的问题, 开发具有黏附性的功能材料并制备负载型农药, 可以增加持留量; 通过添加助剂增加药液沉积量, 或者使用静电喷雾器利用异种电荷相吸的作用也可增加药液沉积量; 使用某些表面活性剂可有效减少药液弹跳造成的损失。一些真菌病害侵染叶片后导致叶片表面发生变化, 研究其病害发生特征与药液附着沉积过程的关系对于提高药剂沉积量具有指导意义。一些具有内吸传导性能的药剂通过根区施用的方式可以用来防治地上部病虫害, 增强根系对其的吸收和植株转运能力可以增加到达靶标部位的剂量。首先是要提高药剂在土壤中的移动性, 可以采用纳米包封、结构修饰等技术^[17]; 其次是要改善药剂在植物体内的传导能力, 探索可以促进农药传导的外源物质, 将其用作农药剂型的制备材料, 可能有利于农药传导能力的提高。植物种子对包衣药剂的吸收利用具有至关重要的作用, 然而目前鲜见研究种子对药剂的吸收与利用及吸收途径的报道。此外, 种子的大小、种子吸收药剂的能力和药剂的持效期是制约种衣剂利用率高低的因素^[19]。

2 农药内吸传导行为与施药技术的关系

农药在植物体内的内吸传导行为对于其施药技术的选择具有指导意义。一般来说, 农药被植

株吸收后可以在植株各部位进行传导分布时才是真正意义上的内吸传导行为的体现。采用生物测定法、同位素标记法、高效液相色谱法、液质联用以及原位检测技术等可以对农药的内吸传导特性进行研究, 从而确定其合理的施药方式^[8, 12, 32-34]。探究合理的施药方式不仅有利于农药的高效利用, 也有利于对非靶标环境生物及生态系统的保护, 从而达到提高农药利用率和促进农业可持续发展的目的。

2.1 杀虫剂的内吸传导行为与施药技术的关系

近年来, 新烟碱类杀虫剂的根区施药技术得到广泛推广, 主要得益于其具有优越的内吸传导性能。内吸性杀虫剂被植物吸收后可以在木质部和韧皮部中传导, 从而对植株的新生部位提供保护^{[14]57-58}。但其在韧皮部中的传导只占次要地位, 大多数内吸性杀虫剂是经根系吸收后通过木质部途径向植株上部传导。利用该特点采用根区施药或种子包衣技术来防治地上害虫是一种可行且经济环保的措施。噻虫胺种子处理能够控制麦蚜发生并有较好的防治效果^[35]; 滴灌施药对柑橘木虱有较好防效, 且持效期长达 40 d^[36-37]。同样, 噻虫胺种子处理对棉蚜具有较好防效, 可以控制整个苗期棉蚜的为害, 其颗粒剂在蕾期通过穴施对棉田绿盲蝽防效较好, 并且可以同时防治烟粉虱、蓟马、叶蝉等的为害^[38]。采用噻虫胺种子处理结合颗粒剂穴施的施药方式可以延长对棉田刺吸式口器害虫的防效^[39]。研究发现, 噻虫胺种子处理对蜜蜂种群没有明显的不良影响, 说明农药根区施用大大缓解了环境压力^[40]。吡虫啉作为新烟碱类杀虫剂使用量最大的品种, 用作种衣剂防治小麦蚜虫的防效高且具有较长的持效期, 可有效控制小麦整个生育期麦蚜的发生, 并且对天敌生物没有不良影响^[41-42]。吡虫啉种子包衣处理黄瓜种子后对瓜蚜的持效期可达 42 d, 明显高于喷雾处理, 通过对黄瓜植株各部位残留分析发现, 其主要在黄瓜植株叶部累积^[32]。有报道表明, 吡虫啉可被烟草根系吸收, 灌根后可运输到烟草植株的不同部位, 且喷雾和灌根两种施药方式相比, 根部施药方式下吡虫啉的易位和分布更加均匀, 持效期更长^[33]。

2.2 杀菌剂的内吸传导行为与施药技术的关系

杀菌剂在投入市场使用前要进行毒理学行为评估, 其中内吸传导性能是必不可少的评价指标,

这也是为选择不同的施药方式提供基础数据。有研究采用喷雾和灌根 2 种施药方式测定了天名精内酯酮对 2 种植物叶部病害(小麦白粉病和黄瓜白粉病)和 2 种根部病害(小麦全蚀病和黄瓜枯萎病)的室内杀菌效果。结果发现:在喷雾施药方式下,天名精内酯酮对 2 种叶部病害具有较好的防效,但是对 2 种根部病害则无明显防效;在灌根施药方式下,其对 2 种叶部病害和 2 种根部病害均具有较好防效^[43]。同时该研究结果也表明了天名精内酯酮具有较强的向顶传导性能,但向基传导性能较弱。通过生物学测定和高效液相色谱法研究在叶面施药和根部施药方式下氟吗啉在黄瓜植株中的内吸传导行为,结果表明,氟吗啉通过叶面施用后仅在叶片存在局部传导行为,无向下传导性能,而通过根部施药后,其可向上传导并在叶部累积^[12]。通过研究三环唑与丙环唑在撒施方式下,其在水稻植株中的内吸传导行为及残留动态发现,两种杀菌剂采用根部施药方式时均可以向上传导至叶部^[23]。有研究表明,氟醚菌酰胺在黄瓜植株内具有双向传导特性^[26]。同样,氟唑菌苯胺在小麦植株中既可以向顶传导,也可以向基传导^[44],这表明氟醚菌酰胺和氟唑菌苯胺在叶面和根区两种施药方式下可以同时防治地下和地上病害。从以上研究结果可以看出,大多数内吸性杀菌剂是通过木质部在蒸腾拉力的作用下从根部向地上部分传导的,仅有极少数的药剂具有木质部和韧皮部双向传导能力。提高内吸性杀菌剂的韧皮部传导能力对于防治药剂难以接触部分的病害具有重要意义。此外,一些具有内吸作用的种子处理剂可以通过种皮渗透到子叶中,进而传导到幼苗体内。最近有研究采用 10 种常用杀菌剂处理棉花种子防治苗期病害,结果表明其对炭疽病、猝倒病、立枯病等均有较好防效^[45]。

2.3 不同施药技术的优缺点

叶面喷雾施药是防治叶部病虫害最直接的施药方式,而喷雾时药液易流失和见强光易分解是制约药效的关键因素^[15]。随着根区施药技术的推广,对于具有向上传导性能的农药采用根部施药方式既可以延长持效期,又可以避免对非靶标环境生物的威胁,经济安全且省时省力^[38,42],并且有些药剂根区施用后可以兼治地下部和地上部病虫害,从而实现农药的高效利用。但是根部施药后,药剂向上传导到靶标部位与害虫发生期存在

时间差,从而导致对地上部病虫害防治略有延迟^[46]。种子包衣技术属于地下施药方式的一种,具有靶向性强、药剂利用率高和环境污染小的优点^[47]。种子作为植株生长发育的前提,其对种衣剂的吸收是对植株病虫害防治的基础,因此明确种子对药剂的吸收模式对于种衣剂的高效利用具有重要意义。目前,茎部施药防治树木病虫害比较常见,但是对于防治农作物和经济作物地上部病虫害研究较少。茎部施药技术同样具有降低施药频率、减少环境污染、保护天敌生物等优点。采用吡虫啉、噻虫嗪等 4 种常用内吸性药剂通过树干高压注射防治苹果黄蚜,其持效性均优于传统喷雾处理^[48]。采用茎部涂抹法测定生物除草剂 70014 的内吸传导活性,发现其在杂草茎部无传导行为,表现为触杀活性,说明该药剂属于触杀性药剂,无内吸传导性能^[49]。有研究采用甘蓝茎部包裹施药的方法,通过测定其对小菜蛾的药效,成功筛选出适合甘蓝茎部施用的药剂^[50]。茎部施药相比于根区施药可以减少药剂在输送系统中的浪费,提高对靶输送效率,但是其大规模应用还存在一些问题,如需筛选合适的剂型、人工成本高以及是否产生药害等有待研究。

3 影响农药内吸传导行为的因素

农药在植株中的内吸传导行为受到诸多因素的影响,不仅与其自身性质有关,还与植株种类、植株生长条件、生长时期、施药方式和农药剂型等因素有关。明确影响农药内吸和传导行为的因素,对于改善农药内吸传导能力和减轻农药污染行为具有指导意义。

3.1 农药性质

农药自身理化性质不同,导致其在植物体内的内吸传导行为存在差异。有研究比较了 4 种新烟碱类杀虫剂(噻虫胺、噻虫嗪、噻虫啉、啉虫脒)在小松菜 *Brassica rapa* var. *perviridis* 体内的内吸传导行为差异,通过计算 RCF 值和 TF 值发现,噻虫嗪最易累积在根部,向叶迁移能力较弱,而啉虫脒较易向叶部迁移,不易在根部累积^[51]。利用相关性分析发现,噻虫胺、噻虫嗪、噻虫啉、啉虫脒和呋虫胺在小松菜体内的内吸传导行为差异与其辛醇/水分配系数($\log K_{ow}$)、水溶性和解离常数无关,但与其分子质量显著相关^[52]。通过比较吡虫啉、噻虫嗪和苯醚甲环唑在水稻植株

中的内吸传导行为,发现吡虫啉和噻虫嗪主要在水稻叶部累积,而苯醚甲环唑则主要在根部累积^[53]。大量研究表明:药剂的 $\log K_{ow}$ 越大,越易在根部累积,不易向顶传导;反之, $\log K_{ow}$ 越小,药剂被根部吸收后具有向叶部迁移的能力,最终在叶部累积^[6, 28, 29];且药剂的 $\log K_{ow}$ 与 RCF 值呈正相关,与 TF 值呈负相关^[30-31]。

3.2 农药亚细胞分布

农药的亚细胞分布行为是影响农药在植物体内传导和累积的关键因素。最近的研究表明,几种杀虫剂在细胞壁和细胞器中的浓度比例会随着农药疏水性的增加而增加,随着水溶性的增加而减少;而农药在细胞可溶性组分中的浓度会随疏水性的增加而下降,随水溶性增加而增加;根系对农药的吸收与药剂的疏水性和根细胞壁及细胞器的亚细胞组分浓度因子 (subcellular fraction concentration factor, SFCF) 有关,药剂从根部向茎部的转运及茎部向叶部的转运同样也受到 SFCF 的控制^[54]。

3.3 植物种类

由于植株生理结构的不同,导致同一农药在不同种类植物体内的内吸和传导行为存在差异。Létondor 等^[55] 研究发现,西葫芦和南瓜植株对十氯酮的吸收能力强于黄瓜植株。采用室内水培方法研究吡虫啉在 7 种叶菜类蔬菜内的内吸和传导行为的差异,结果表明,吡虫啉在不同品种蔬菜中向茎、叶部的转移能力存在显著差异,其中在高梗白青菜中向上转移能力较强,在紫金香妃青菜中最弱^[56]。通过比较吡虫啉在白毛杨、垂柳、水杉等树木体内的内吸传导行为,发现其只有在垂柳体内具有较好的内吸和传导性能^[57]。同样,也有研究证明树木种类是影响注干药剂被吸收的重要因素^[58]。此外,不同种类植物根系结构也存在差异,从而导致对农药的吸收能力不同。根系代谢可以合成不同类型的根系分泌物,根系分泌物与土壤中的细菌真菌等相互作用可能会改变农药的降解行为^[59]。

3.4 植株生长条件和生长期

植株生长条件会影响农药在植物体内的内吸和传导行为。通过研究不同生长条件对 4 种农药在油菜体内内吸和传导行为的影响,发现 RCF 值随温度升高而增加,短日长条件下,RCF 值和 TSCF 值均增加^[31]。Liu 等^[60] 发现,土壤性质对黄

瓜根系吸收唑菌酯有影响,其中红土对根系吸收唑菌酯的影响最大。Hwang 等^[61] 研究发现,实验室条件下黄瓜根系对硫丹的吸收能力强于温室大棚。不同生长期对农药在植物体内的内吸和传导行为也有影响。有研究表明,根系发育程度是影响农药内吸传导行为的重要因素,幼龄期根系对农药的吸收能力较弱,成熟期根系吸收能力增强^[62]。

3.5 施药剂量

施用剂量会影响农药在植物体内的内吸和传导行为。采用田间推荐剂量和 10 倍田间推荐剂量,于根部分别施用吡虫啉、噻虫嗪和苯醚甲环唑,研究其在水稻植株中的内吸和传导行为差异。通过计算 BCF 值发现,10 倍田间推荐剂量下吡虫啉和噻虫嗪的 BCF 值明显高于田间推荐剂量,但是苯醚甲环唑在两者处理下,BCF 值无显著差异^[53]。通过比较不同施用浓度下吡虫啉在玉米植株中的内吸、传导和累积行为,发现施用浓度与其在玉米植株中的内吸传导能力呈正相关^[63]。

3.6 施药方式

不同施药方式对农药在植物体内的内吸传导行为存在影响。采用叶面喷雾和根部施药两种方式研究毒死蜱在小白菜和莴苣中的内吸和传导行为,通过计算 TF 值发现,两种施药方式对毒死蜱在小白菜和莴苣中的易位能力存在显著差异,根部处理下毒死蜱在小白菜中的易位能力高于叶面处理,而毒死蜱在莴苣中的易位能力则是在叶面处理下更高^[64]。

3.7 植物内源激素

大量的研究表明,植物内源激素如水杨酸 (SA)、茉莉酸 (JA) 的添加会对农药在植物体内的内吸和传导行为产生影响。当添加 5 mg/L 的 SA 时,可以明显阻止异丙隆在小麦植株根和茎中的累积^[65-66];添加 0.1 $\mu\text{mol/L}$ 的茉莉酸甲酯 (MeJA),可明显降低异丙隆在小麦植株中的累积能力^[67];添加 1 mg/L 的 SA,可分别降低噻虫嗪、噁霉灵和氯虫苯甲酰胺在黄瓜植株根和叶中的分布浓度,并可分别减弱根系对 3 种农药的吸收能力、植株对 3 种农药的富集能力和 3 种农药从根部到叶部的转运能力^[68]。

3.8 农药助剂

由于叶片角质层的阻隔和病虫害发生后叶片表面的变化,农药喷洒到叶片后较难附着展布进而被吸收。近年来,通过改善药剂在叶片表面的

附着性能来提高其附着量, 进而提高药剂的内吸性, 如加入润湿剂、渗透剂等表面活性剂以提高叶片对药剂的吸收能力。有研究表明, 添加农药助剂可以提高 70% 吡虫啉水分散粒剂在小麦叶片上的附着展布性能^[69]; 使用分散润湿剂 D1001 和增稠剂黄原胶能够改善苯醚甲环唑悬浮剂在甘蓝和黄瓜叶片上的润湿展布性能, 进而提高叶片对农药的吸收量^[70]; 使用润湿助剂 S903 和渗透助剂 XP-2 可以提高吡唑醚菌酯在辣椒上的附着性能^[71]。也有研究发现, 亲水性农药和亲水性助剂联合施用可能会提高叶片对农药的吸收能力^[72]。天然环保助剂的开发是未来农药助剂的发展方向, 如以天然橙皮精油作为农药喷雾助剂, 可以提高咪鲜胺在黄瓜叶片上的沉积和穿透能力^[73]。

3.9 纳米农药

纳米农药是将农药负载于纳米材料中形成负载或包覆体系, 可以改善部分脂溶性药剂的水基化分散特性^[74]。通过使用具有高黏附性的包覆材料可以提高药剂在叶片表面的持留量, 如采用单宁酸和铁离子配位组装包覆阿维菌素提高了其在黄瓜叶片上的附着量^[75]。介孔二氧化硅作为一种新型介孔材料, 已被用作纳米农药剂型制备中, 如以介孔二氧化硅纳米颗粒为载体制备负载型农药纳米颗粒, 并评价其叶面处理后在黄瓜植株中的内吸传导行为。结果表明, 黄瓜叶片对负载目标农药的二氧化硅纳米颗粒吸收增强, 并且可以促进目标药剂向顶传导^[25, 76-77]。同样, Zhu 等^[78]研究表明, 介孔二氧化硅纳米颗粒可以调控农药在植物体内的内吸传导行为, 这为提高农药利用率提供了一种途径。此外, 纳米农药被国际纯粹与应用化学联合会 (IUPAC) 评为 2019 年十大新兴技术之一。

3.10 农药结构改造

利用植物定向输送营养物质的特性, 将氨基酸和葡萄糖等营养物质与农药分子偶联, 可以提高药液在植物体内的移动性^[79]。如利用 AtLHT1 蛋白转运体, 可以促进甘氨酸-氯虫苯甲酰胺偶联复合物在拟南芥中的内吸和传导^[80]。利用植物单糖转运体, 可以增加葡萄糖-氟虫腈偶联复合物在韧皮部的流动性^[81]。有研究报道, 含酯基氨基酸与氯虫苯甲酰胺偶联的化合物在蓖麻的韧皮部和木质部均有较好的移动性, 进而提高了药剂在作物中的内吸和传导能力^[82]。

4 结语与展望

农药在植物体内的内吸传导行为不仅取决于农药的物理化学性质, 还与植物种类、植物生长期、生长条件及施药方式等因素有关, 研究农药的内吸传导行为对明确其作用方式及筛选合适的施用方式具有重要意义, 同时也可以监测农药对不同植物的污染情况, 有利于指导农药在不同作物上的科学使用和安全使用。

合理利用农药内吸传导行为的影响因素来改善药液在植物中的内吸传导能力, 对于实现农药高效利用具有重要意义。根据农药性质选择不同的施用对象或施用部位, 有利于农药的精准应用。农药施用也要注意不同植物种类之间的差异, 同时要选择适宜的生长条件和生长时期施药。农药在不同植物体内的传导行为可能不同, 应据此选择合适的施药方式来减少农药的浪费。一些外源物质, 如 SA、JA 等可以抑制农药在植物体内的传导和累积行为, 这可以减少受污染植物体内的农药残留量。由于喷雾药液存在雾滴飘移、药液易流失等问题, 导致农药利用率较低, 据报道, 大约仅有 0.1% 的药量进入靶标部位发挥作用^[83], 增加农药在叶片上的沉积量是实现农药高效利用的关键, 研究开发具有药液靶标性能的农药功能助剂和农药纳米剂型是未来的研究方向; 同时研发具有精准施药功能的施药器械也有利于农药被叶片吸收利用。纳米技术和结构改造是在剂型和药剂本身水平上进行加工和修饰, 对改善药剂内吸传导能力具有较大潜力; 开发能被植株摄取并易于传导的负载材料是提高纳米农药内吸传导能力的关键, 且负载材料的尺寸也应该被考虑。采用结构改造方式提高药剂的内吸传导能力主要是农药分子偶联葡萄糖、氨基酸等营养物质形成复合物后利用植物体内特定的转运体将其运输到靶标部位。目前, 这些研究主要集中在叶面施药技术上, 根区施用农药被植物根系吸收后, 药剂向靶标部位传递效率低, 对靶标病虫害的防治会有延迟, 因此如何更好地调控药剂的内吸传导性能, 使其对靶输送, 达到即对作物安全又可以提高农药利用效率的目的是以后亟待解决的问题。探索营养物质-农药分子偶联物在根区施药方式下, 提高药液在植物木质部的移动性是提高根区施用农药利用率的一种途径, 但是营养物

质-农药分子偶联物也存在一些弊端,如有效成分释放后活性下降^[84],相似营养物质与偶联物基团存在竞争抑制^[85]等,导致偶联复合物不能被转运。未来研究可以筛选其他与农药分子偶联的营养物质基团,并选择合适的偶联基团以消除或降低竞争抑制作用。此外,探究植物体内不同的农药转运蛋白可为开发新型偶联农药提供依据。另一方面,农药被植物体吸收后可能会作为一种胁迫因子影响植物体内的次生代谢,农药在植物体内的内吸传导过程与植物生理代谢过程的关系及其品质形成、作物抗逆性等^[86]也需要进一步明确。

参考文献 (References):

- [1] LIANG J H, TANG S Y. Optimal dosage and economic threshold of multiple pesticide applications for pest control[J]. *Math Comput Model*, 2010, 51(5-6): 487-503.
- [2] CHEN D W, ZHANG Y P, LV B, et al. Dietary exposure to neonicotinoid insecticides and health risks in the Chinese general population through two consecutive total diet studies[J]. *Environ Int*, 2020, 135: 105399.
- [3] BOTÍAS C, DAVID A, HILL E M, et al. Contamination of wild plants near neonicotinoid seed-treated crops, and implications for non-target insects[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 566-567: 269-278.
- [4] HE W, YE M, HE H, et al. The decomposition and ecological risk of DDTs and HCHs in the soil-water system of the Meijiang River[J]. *Environ Res*, 2020, 180: 108897.
- [5] 徐汉虹. 植物化学保护学[M]. 4版. 北京: 中国农业出版社, 2007: 8-10.
XU H H. Chemical protection of plants[M]. 4th Ed. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2007: 8-10.
- [6] QIU J L, CHEN G S, XU J Q, et al. *In vivo* tracing of organochloride and organophosphorus pesticides in different organs of hydroponically grown Malabar spinach (*Basella alba* L.)[J]. *J Hazard Mater*, 2016, 316: 52-59.
- [7] 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, 22.
YAO A Q, YANG J. Conduction mode of pesticides in plant and pesticide-conduction biology[J]. *China Plant Prot*, 2012, 32(10): 14-18, 22.
- [8] 江树人, 弗朗茨·米勒. ¹⁴C-多菌灵在棉苗植株内的吸收、传导、分布和代谢研究[J]. *北京农业大学学报*, 1987(1): 103-111.
JIANG S R, MÜLLER F. Research of uptake, translocation, distribution and metabolism of ¹⁴C-MBC in cotton seedling[J]. *J Beijing Agric Univ*, 1987(1): 103-111.
- [9] 王锋, 李金玉, 李宝笃. 碳标记甲霜灵在黄瓜植株体内的吸收、分布、传导以及种衣剂缓释作用的研究[J]. *植物病理学报*, 1995: 167-170.
WANG F, LI J Y, LI B D. The uptake, distribution and translocation of ¹⁴C-metalaxyl in cucumber plants and the slowly releasing effect of seed coating formulation[J]. *Acta Phytopathol Sin*, 1995: 167-170.
- [10] 刘西莉, 罗爽, 杨峻, 等. ¹⁴C-标记腈菌唑的合成及其在小麦幼苗上的吸收与传导确证[J]. *农药学报*, 2008, 10(1): 23-27.
LIU X L, LUO S, YANG J, et al. Synthesis of ¹⁴C-labelled myclobutanil and the corroboration of its uptake and translocation in wheat seedling[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2008, 10(1): 23-27.
- [11] TONG M, GAO W, JIAO W, et al. Uptake, translocation, metabolism, and distribution of glyphosate in nontarget tea plant (*Camellia sinensis* L.)[J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(35): 7638-7646.
- [12] 朱书生, 刘西莉, 李健强, 等. 新型杀菌剂氟吗啉在黄瓜植株体内的吸收传导行为[J]. *高等学校化学学报*, 2006, 27(10): 1887-1890.
ZHU S S, LIU X L, LI J Q, et al. Uptake and translocation behavior of new fungicide flumorph in cucumber plant[J]. *Chem J Chin Univ*, 2006, 27(10): 1887-1890.
- [13] 高森, 王亚虹, 邵惠芳, 等. 植物角质层结构组成、生物学功能及分离方法研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(3): 46-54.
GAO S, WANG Y H, SHAO H F, et al. Research progress on structure constitution, biological function and separation methods of plant cuticle[J]. *J Agric Sci Technol*, 2018, 20(3): 46-54.
- [14] 弗朗茨·米勒. 植物药理学植物保护剂的行为和作用方式[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1988.
MÜLLER F. Plant pharmacology (behaviors and modes of action of plant protectants)[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1988.
- [15] CHRISPPEELS M J, CRAWFORD N M, SCHROEDER J I. Proteins for transport of water and mineral nutrients across the membranes of plant cells[J]. *Plant Cell*, 1999, 11(4): 661-675.
- [16] LI X X, LIU Y, HE L F, et al. Fungicide formulations influence their control efficacy by mediating physicochemical properties of spray dilutions and their interaction with target leaves[J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(5): 1198-1206.
- [17] 范添乐, 宋玥颀, 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.
FAN T L, SONG Y Y, CHEN X J, et al. Recent advances and improvement strategies for pesticide uptake ability[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2020, 22(4): 579-585.
- [18] PULLAGURALA V L R, RAWAT S, ADISA I O, et al. Plant uptake and translocation of contaminants of emerging concern in soil[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 636: 1585-1596.
- [19] 吴鹏冲, 路运才. 种子包衣技术及其应用[J]. *种子科技*, 2020, 38(12): 78-80.
WU P C, LU Y C. Seed coating technology and its application[J]. *Seed Sci Technol*, 2020, 38(12): 78-80.
- [20] TANG X, HAO F, YUAN H, et al. Uptake and translocation of imidacloprid via seed pathway and root pathway during early seedling growth of corn[J]. *Pest Manag Sci*, 2020, 76(11): 3792-3799.
- [21] TAIRA S, TOKAI M, KANEKO D, et al. Mass spectrometry imaging analysis of location of procymidone in cucumber samples[J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(27): 6109-6112.
- [22] COHEN Y, GISI U. Uptake, translocation and degradation of [¹⁴C]cymoxanil in tomato plants[J]. *Crop Prot*, 1993, 12(4): 284-292.
- [23] 冯雪雯. 三环唑和丙环唑在水稻植株内的吸收、传导和分布研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
FENG X W. Uptake, translocation and distribution of the fungicides tricyclazole and propiconazole in rice plants[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [24] FAN T L, CHEN X J, XU Z Y, et al. Uptake and translocation of triflumezopyrim in rice plants[J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(27): 7086-7092.
- [25] ZHAO P Y, YUAN W L, XU C L, et al. Enhancement of spirotramat transfer in cucumber plant using mesoporous silica nanoparticles as carriers[J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(44): 11592-11600.
- [26] 张睿. 防治黄瓜霜霉病高效药剂的筛选及防控机理的初步研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
ZHANG R. Sifting of high-efficient fungicides against cucumber downy mildew and control mechanism[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013.
- [27] WU X Z, QIN R, WU H X, et al. Nanoparticle-immersed paper imprinting mass spectrometry imaging reveals uptake and translocation

- mechanism of pesticides in plants[J]. *Nano Res*, 2020, 13(3): 611-620.
- [28] BARRACHINA A C, CARBONELL F B, BENEYTO J M. Arsenic uptake, distribution and accumulation in tomato plants: Effect of arsenite on plant growth and yield[J]. *J Plant Nutr*, 1995, 18(6): 1237-1250.
- [29] GONG W W, JIANG M Y, ZHANG T T, et al. Uptake and dissipation of metalaxyl-M, fludioxonil, cyantranilprole and thiamethoxam in greenhouse chrysanthemum[J]. *Environ Pollut*, 2020, 257: 113499.
- [30] NAMIKI S, OTANI T, MOTOKI Y, et al. Differential uptake and translocation of organic chemicals by several plant species from soil[J]. *J Pestic Sci*, 2018, 43(2): 96-107.
- [31] NAMIKI S, OTANI T, MOTOKI Y, et al. The influence of *Brassica rapa* var. *perviridis* growth conditions on the uptake and translocation of pesticides[J]. *J. Pestic. Sci*, 2018, 43(4): 248-254.
- [32] 王吉强. 吡虫啉根施对瓜蚜的防治效果及根施后药剂在黄瓜植株体内的传导分布 [D]. 保定: 河北农业大学, 2008.
- WANG J Q. The control effect on *Aphis gossypii* Glover after cucumber plant root application with imidacloprid and the pesticide's translocation and distribution in the plant[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2008.
- [33] 韩毅, 金洪石, 郭伟, 等. 两种施药方式下吡虫啉在烟草植株的吸收传导分布研究 (英文)[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(2): 344-346.
- HAN Y, JIN H S, GUO W, et al. Translocation and distribution of imidacloprid in tobacco with two application methods[J]. *Agric Sci Technol*, 2017, 18(2): 344-346.
- [34] YANG T X, ZHANG Z Y, ZHAO B, et al. Real-time and in situ monitoring of pesticide penetration in edible leaves by surface-enhanced Raman scattering mapping[J]. *Anal Chem*, 2016, 88(10): 5243-5250.
- [35] 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.
- LI Y F, DANG Z H, PAN W L, et al. Evaluation on the safety and field effect of the seed dressing by neonicotinoid insecticides clothianidin to control wheat aphids[J]. *Agrochemicals*, 2013, 52(9): 689-691.
- [36] 孟华岳, 郑淑琼, 文英杰, 等. 滴灌施用噻虫胺防治柑橘木虱研究[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(2): 47-52.
- MENG H Y, ZHENG S Q, WEN Y J, et al. Control of *Diaphorina citri* by applying clothianidin through a drip irrigation system[J]. *J South China Agric Univ*, 2019, 40(2): 47-52.
- [37] 陈红, 魏盛祿, 陈伟, 等. 30% 噻虫胺除虫脲悬浮剂防治柑橘木虱的田间药效试验[J]. *农业与技术*, 2017, 37(10): 48.
- CHEN H, WEI S L, CHEN W, et al. Field efficacy test of 30% clothianidin and diflubenzuron suspension concentration against citrus psyllid[J]. *Agriculture and Technology*, 2017, 37(10): 48.
- [38] 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.
- ZHANG X F. Effect of clothianidin seed treatment and granular application at bud stage on sucking pest in cotton field[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016.
- [39] ZHANG Z Q, ZHAO Y H, WANG Y, et al. Seed treatment combined with a spot application of clothianidin granules prolongs the efficacy of controlling piercing-sucking insect pests in cotton fields[J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(36): 8083-8092.
- [40] OSTERMAN J, WINTERMANTEL D, LOCKE B, et al. Clothianidin seed-treatment has no detectable negative impact on honeybee colonies and their pathogens[J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 692.
- [41] 高占林, 党志红, 李耀发, 等. 吡虫啉拌种量对小麦蚜虫的防治效果及其在小麦籽粒中的残留研究[J]. *河北农业科学*, 2011, 15(10): 57-59, 66.
- GAO Z L, DANG Z H, LI Y F, et al. Study on control effect and safety of seed dressing with imidacloprid against wheat aphid[J]. *J Hebei Agric Sci*, 2011, 15(10): 57-59, 66.
- [42] ZHANG P, ZHANG X F, ZHAO Y H, et al. Effects of imidacloprid and clothianidin seed treatments on wheat aphids and their natural enemies on winter wheat[J]. *Pest Manag Sci*, 2016, 72(6): 1141-1149.
- [43] 韩兴帅. 天名精内酯酮在植物体内内吸传导方式研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- HAN X S. Study on uptake and translocation behavior of carabrone in plant[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013.
- [44] 韩平, 胡彬, 马帅, 等. 超高效液相色谱-串联质谱测定氟啶菌苯胺在小麦植株中的内吸传导特性[J]. *农药学报*, 2017, 19(6): 729-734.
- HAN P, HU B, MA S, et al. Evaluation of systemic properties of penflufen in wheat seedling using ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2017, 19(6): 729-734.
- [45] 师勇强, 冯鸿杰, 魏锋, 等. 10 种杀菌剂处理棉花种子对苗期病害的防治效果[J]. *中国棉花*, 2020, 47(4): 23-24.
- SHI Y Q, FENG H J, WEI F, et al. Effects of seed treatments with ten kinds of fungicides on cotton seedling diseases[J]. *China Cotton*, 2020, 47(4): 23-24.
- [46] ALFORD A, KRUPKE C H. Translocation of the neonicotinoid seed treatment clothianidin in maize[J]. *PLoS One*, 2017, 12(3): e0173836. DOI:10.1371/journal.pone.0173836.
- [47] REN X X, CHEN C, YE Z H, et al. Development and application of seed coating agent for the control of major soil-borne diseases infecting wheat [J/OL]. *Agronomy*, 2019, 9(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy9080413>.
- [48] 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.
- ZHANG P J, GAO Y, LIU Z F, et al. Control effect of trunk high pressure injection four kinds of systemic pesticides on *Aphis citricola*[J]. *China Fruits*, 2019(4): 79-82.
- [49] 沈晓霞, 李艳波, 杨文英, 等. 茎叶涂抹灌根法测试生物除草剂 70014 吸收与传导试验初报[J]. *现代农药*, 2011, 10(1): 21-23.
- SHEN X X, LI Y B, YANG W Y, et al. Test of absorption and translocation of bioherbicide 70014[J]. *Mod Agrochem*, 2011, 10(1): 21-23.
- [50] 杨帆, 周利琳, 王攀, 等. 甘蓝茎部用药对小菜蛾内吸活性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(9): 104-108.
- YANG F, ZHOU L L, WANG P, et al. Effect of insecticides applied in cabbage stem on systemic activity of diamondback moth[J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2018, 46(9): 104-108.
- [51] 龙玲, 李勇, 严煌倩, 等. 小松菜对土壤中 4 种新烟碱类杀虫剂的吸收转运差异[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(7): 205-208.
- LONG L, LI Y, YAN H Q, et al. Differences of uptake and translocation of four neonicotinoids in komatsuna[J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2018, 46(7): 205-208.
- [52] LI Y, LONG L, YAN H Q, 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.
- [53] GE J, CUI K, YAN H Q, et al. Uptake and translocation of imidacloprid, thiamethoxam and difenoconazole in rice plants[J]. *Environ Pollut*, 2017(226): 479-485.
- [54] JU C, DONG S, ZHANG H C, et al. Subcellular distribution governing accumulation and translocation of pesticides in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Chemosphere*, 2020, 248: 126024.
- [55] LÉTONDOR C, PASCAL-LORBER S, LAURENT F. Uptake and distribution of chlordecone in radish: different contamination routes in edible roots[J]. *Chemosphere*, 2015, 118: 20-28.
- [56] 杨丽璇. 水培叶菜类蔬菜对吡虫啉的吸收、转运及累积规律研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- YANG L X. Difference of uptake, distribution and accumulation of imidacloprid in several vegetables growth in water[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.

- [57] 田鹏鹏. 树干注射吡虫啉在体内的吸收传导分布研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
TIAN P P. Uptake, translocation and distribution of imidacloprid in trees with trunk injection[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [58] 张娟, 李军, 黄俊, 等. 园林树木种类及树冠大小对直流式注干药剂吸收及传导的影响[J]. 农药学报, 2018, 20(4): 529-534.
ZHANG J, LI J, HUANG J, et al. Effects of tree species and crown size on the absorption and conduction of insecticides applied by trunk injection[J]. Chin J Pestic Sci, 2018, 20(4): 529-534.
- [59] 潘士旺, 雷志华, 吴云霄, 等. 苏丹草根分泌物在有机氯农药降解过程中的作用[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3072-3079.
PAN S W, LEI Z H, WU Y X, et al. Effect of exudates from *Sorghum sudanense* grass roots on degradation of organochlorine pesticides in soils[J]. China Environ Sci, 2017, 37(8): 3072-3079.
- [60] LIU X Y, CHEN X, DING X C, et al. Uptake and distribution characteristics of the novel fungicide pyraoxystrobin in cucumber plants[J]. RSC Advances, 2018, 8(48): 27152-27156.
- [61] HWANG J I, LEE S E, KIM J E. Plant uptake and distribution of endosulfan and its sulfate metabolite persisted in soil[J]. PLoS One, 2015, 10(11): e0141728.
- [62] NAMIK S, SEIKE N, MOTOKI Y, et al. Relationship between growth stage of *Brassica rapa* var. *perviridis* and the abilities for uptake and translocation of pesticides in soil[J]. J Pestic Sci, 2019, 44(1-2): 1-8.
- [63] SUN D L, FU J T, LU Y L, et al. Absorption, transportation and distribution of imidacloprid in maize[J]. Int J Environ Anal Chem, 2017, 97(8): 783-795.
- [64] GE J, LU M X, WANG D L, et al. Dissipation and distribution of chlorpyrifos in selected vegetables through foliage and root uptake[J]. Chemosphere, 2016, 144: 201-206.
- [65] LIANG L, LU Y L, YANG H. Toxicology of isoproturon to the food crop wheat as affected by salicylic acid[J]. Environ Sci Pollut Res, 2012, 19(6): 2044-2054.
- [66] LU Y C, ZHANG S, MIAO S S, et al. Enhanced degradation of herbicide isoproturon in wheat rhizosphere by salicylic acid[J]. J Agric Food Chem, 2015, 63(1): 92-103.
- [67] MA L Y, ZHANG S H, ZHANG J J, et al. Jasmonic acids facilitate the degradation and detoxification of herbicide isoproturon residues in wheat crops (*Triticum aestivum*)[J]. Chem Res Toxicol, 2018, 31(8): 752-761.
- [68] LIU T T, YUAN C H, GAO Y, et al. Exogenous salicylic acid mitigates the accumulation of some pesticides in cucumber seedlings under different cultivation methods[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2020, 198: 110680.
- [69] 杨云海, 赵芸, 王凯博, 等. 农药助剂对 70% 吡虫啉水分散粒剂在小麦叶片上附着性能的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2019, 34(6): 954-964.
YANG Y H, ZHAO Y, WANG K B, et al. The influence of different adjuvants on the adhesion property of 70% imidacloprid WG on wheat leaves[J]. J Yunnan Agric Univ (Nat Sci), 2019, 34(6): 954-964.
- [70] 张保华, 殷培军, 王晨, 等. 农药助剂对苯醚甲环唑悬浮剂在植物叶片上润湿行为和持留量的影响[J]. 农药, 2015, 54(10): 736-739.
ZHANG B H, YIN P J, WANG C, et al. Effects of formulation adjuvants for difenoconazole SC on wetting behavior and retention on plant leaves[J]. Agrochemicals, 2015, 54(10): 736-739.
- [71] GAO Y Y, LI X X, HE L F, et al. Role of adjuvants in the management of anthracnose-change in the crystal morphology and wetting properties of fungicides[J]. J Agric Food Chem, 2019, 67(33): 9232-9240.
- [72] MORA-GARCIA C, SPANOGHE P. Foliar absorption of pesticide in combination with adjuvants visualized through confocal laser scanning microscopy[J]. Inter J Environ Sci, 2016, 7(1): 40-48.
- [73] YUAN W L, ZHAO P Y, CHEN H P, et al. Natural green-peel orange essential oil enhanced the deposition, absorption and permeation of prochloraz in cucumber[J]. RSC Adv, 2019, 9(35): 20395-20401.
- [74] YU M L, SUN C J, XUE Y M, et al. Tannic acid-based nanopesticides coating with highly improved foliage adhesion to enhance foliar retention[J]. RSC Adv, 2019, 9(46): 27096-27104.
- [75] 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]. Chem Eng J, 2020, 394: 124854.
- [76] ZHAO P Y, CAO L D, MA D K, et al. Synthesis of pyrimethanil-loaded mesoporous silica nanoparticles and its distribution and dissipation in cucumber plants[J]. Molecules, 2017, 22(5): 817.
- [77] 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.
- [78] ZHU F, LIU X G, CAO L D, et al. Uptake and distribution of fenoxanil-loaded mesoporous silica nanoparticles in rice plants[J]. Int J Mol Sci, 2018, 19(10): 2854.
- [79] JIANG X Y, XIE Y, REN Z F, et al. Design of a new glutamine-fipronil conjugate with α -amino acid function and its uptake by *A. thaliana* lysine histidine transporter 1 (AtLHT1)[J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(29): 7597-7605.
- [80] CHEN Y, YAN Y, REN Z F, et al. AtLHT1 transporter can facilitate the uptake and translocation of a glycinergic-chlorantraniliprole conjugate in *Arabidopsis thaliana*[J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(47): 12527-12535.
- [81] 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]. J Agric Food Chem, 2012, 60(24): 6088-6094.
- [82] YAO G K, WEN Y J, ZHAO C, et al. Novel amino acid ester-chlorantraniliprole conjugates: design, synthesis, phloem accumulation and bioactivity[J]. Pest Manag Sci, 2017, 73(10): 2131-2137.
- [83] XIAO J J, CHEN L, PAN F, et al. Application method affects pesticide efficiency and effectiveness in wheat fields[J]. Pest Manag Sci, 2020, 76: 1256-1264.
- [84] XIA Q, WEN Y J, WANG H, et al. β -Glucosidase involvement in the bioactivation of glycosyl conjugates in plants: synthesis and metabolism of four glycosidic *in vitro* and *in vivo*[J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(46): 11037-11046.
- [85] XIE Y, ZHAO J L, WANG C W, et al. Glycinergic-fipronil uptake is mediated by an amino acid carrier system and induces the expression of amino acid transporter genes in *Ricinus communis* seedlings[J]. J Agric Food Chem, 2016, 64(19): 3810-3818.
- [86] 李栋, 李佳奇, 连文超, 等. 农药胁迫和硒元素等干预对作物品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(19): 6422-6431.
LI D, LI J Q, LIAN W C, et al. Effects of pesticide stress, selenium and other elements intervention on crop quality[J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(19): 6422-6431.

(责任编辑: 金淑惠)