

农药内吸性的研究现状与改善策略

范添乐, 宋玥颐, 陈小军*, 方天平, 沈殿晶, 徐王瑾, 王欣宇

(扬州大学园艺与植物保护学院/农业与农产品安全国际合作联合实验室(扬州大学), 江苏扬州 225009)

摘要: 合理利用和改善农药在植物中的内吸传导特性可大幅提高农药在靶标部位的积累并减少农药对环境的污染。通过对农药内吸性的研究, 已逐步揭示了植物吸收和传导农药的基本原理, 对内吸性农药的研发具有重要意义。随着农药改造和纳米载体的出现及发展, 利用不同方法或手段来改善农药内吸性的研究报道也逐渐增加。本综述主要从农药在植物中的内吸性研究进展、研究方法以及改善农药内吸性的策略3个方面进行了阐述, 可为内吸性农药及其剂型的开发提供参考。

关键词: 农药内吸性; 吸收与传导; 导向农药; 纳米载体; 研究进展; 改善策略

中图分类号: TQ 450.1 文献标志码: A

Research status and improvement strategies of uptake ability of pesticide

FAN Tianle, SONG Yueyi, CHEN Xiaojun*, FANG Tianping,
SHEN Dianjing, XU Wangjin, WANG Xinyu

(School of Horticulture and Plant Protection/Joint International Research Laboratory of Agriculture & Agri-Product Safety, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu Province, China)

Abstract: Uptake ability of pesticide has always been a hot topic in the field of agricultural research. Reasonable use and improvement of uptake ability of pesticide in plants can greatly increase the accumulation of pesticides at target sites and reduce pesticide pollution in the environment. The researches about uptake ability of pesticide have gradually revealed the basic principles of absorption and translocation of pesticide in plants, which is of great significance for the development of systemic pesticides. With the transformation of pesticides and the emergence of nanocarriers, the researches about these two methods to improve the uptake ability of pesticides have gradually increased. This review will summarize the research progress, methods, and the improving of the uptake ability of pesticides in plants in order to provide a basis for the development of systemic pesticides.

Keywords: uptake ability of pesticides; absorption and translocation; guided pesticides; nanocarrier; progress; improvement strategies

提高农药利用率仍然是中国目前亟待解决的重要问题之一^[1], 而提高农药与靶标部位接触的机

会是提高农药利用率的一种重要方式^[2]。对于内吸性农药, 其与植物接触后可以通过渗透作用进入

收稿日期: 2019-10-30; 录用日期: 2020-01-17.

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2019340); 江苏省高校自然科学基金(19KJB10028); 扬州市科技计划项目(YZ2019139); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(XKYCX18_092).

作者简介: 范添乐, 男, 硕士研究生, E-mail: 781773153@qq.com; *陈小军, 通信作者(Author for correspondence), 男, 博士, 副教授, 研究方向为农药残留与环境毒理学, E-mail: cxj@yzu.edu.cn

植物体内并随体内的水分循环到达植物各部位,从而提高与靶标的接触几率并减少在环境中的浪费^[2];而对于非内吸性农药,如果其未与靶标生物直接接触就很难得到有效利用,未接触靶标的农药会因雨水冲刷或漂移作用进入土壤、水等环境中,有的还会随食物链富集对有益生物产生影响^[3]。随着导向农药和纳米载体材料的发展,以其作为提高农药利用率的手段得到了广泛关注,目前有关改善农药的内吸性或靶向性的研究也取得了一定的进展。本综述拟从农药在植物中的内吸性研究进展入手,先介绍农药与植物的相互作用原理,再阐述当前研究农药内吸性的主要方法,介绍农药内吸性的主要研究手段,最后介绍两种改善农药内吸性的途径,旨在为提高农药利用率的途径提供建议。

1 农药在植物中的内吸性研究进展

内吸性农药可以被植物的根系或叶片吸收,并通过短距离运输和长距离运输两种方式在植物中传导,从而在植物体中形成系统性分布,最终使作物得到保护^[4]。以下从农药与植物之间的关系阐明内吸性农药在植物体内的吸收方式和传导途径与判断方法。

1.1 植物根系对农药的吸收

植物根系是农药进入植物的重要部位之一。植物根系对农药的吸收能力受农药本身的物理化学性质、植物的生物学特性和环境介质因素的影响^[5]。植物根系吸收农药有主动吸收和被动扩散两种方式,通常以被动扩散为主^[5]。一般来说,农药通过根系进入植物体可分为吸附和吸收两个步骤:首先,农药在根系表面吸附,再蒸腾流的作用下随之被吸收进入植物体内(图1)。土壤的温度、pH值、有机质含量和有机碳含量等均会影响土壤对农药的吸附,导致不同土壤中有机物的生物利用性存在差异^[6]。在植物根系被动吸收农药过程中,环境中农药的浓度可直接影响农药对根系的吸附作用。蒸腾流是影响植物从外界吸收农药的重要因素之一^[7],此外,根系中的碳水化合物、含水量以及脂溶性物质之间的含量关系等均植物吸收农药起到重要作用^[7]。正辛醇/水分配系数的对数值($\log K_{ow}$)通常是被用来评价化合物在水和有机质或生物脂肪之间分配的重要指标,其多被用来比较植物从土壤中吸收有机物的能力,也有

研究表明,可以用其来预测农药在植物体内的传导方式^[8]。但也存在例外, Li 等研究发现部分新烟碱类农药并不适用这项规律,以噻虫嗪($\log K_{ow} = -0.13$)和啶虫脒($\log K_{ow} = 0.8$)为例,虽然噻虫嗪更容易被根系吸收,但啶虫脒在小青菜中却有更好的转移能力,产生该差异似乎与其 $\log K_{ow}$ 值呈弱相关,而与其相对分子量呈显著相关^[9]。

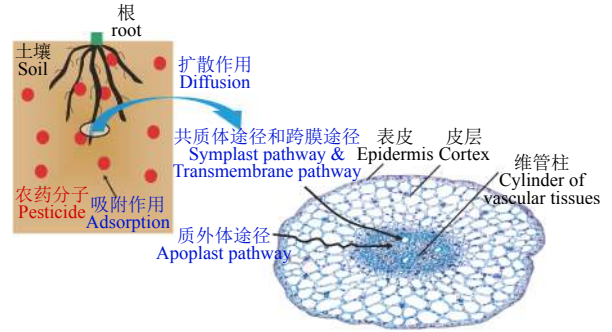


图1 农药进入植物根系的主要途径

Fig. 1 The main routes of pesticides entering plant roots

1.2 植物叶片对农药的吸收

植物叶片是农药进入植物的重要部位,农药通过植物叶片进入体内必须克服许多障碍。农药进入植物叶片,必须穿过的首要屏障是植物表皮^[5]。因此,植物叶片表皮上的角质层、气孔或亲水小孔就是农药进入植物叶片的主要途径。不同种植物的蜡质层构造与厚度存在差异,角质层的厚度随植物种类而变化,但对于大多数农业植物而言,其范围为 $0.5\sim 25\ \mu\text{m}$ ^[10]。通过角质层进行扩散的农药,其扩散能力与农药的分子大小、温度和角质层的性质存在密切联系,亲脂性农药的扩散过程可以用 Fick 扩散第一定律进行描述^[5]。而气孔或亲水小孔则是亲水性农药进入植物表皮的主要途径,这与植物组织结构有着较为密切的联系,角质层中也有些供极性物质通过的亲水小孔和分布在叶片上的气孔^[11]。质膜作为叶片吸收的最后一步,膜上的一些载体和质子泵也有可能参与农药的吸收过程^[11]。此外,植物叶片吸收农药的能力还与植物品种、植物生长阶段以及一些环境因素密切相关^[5](图2)。由于农药的液滴大小、接触面积和制剂类型等因素的影响,叶片角质层与农药的作用关系并不完全一致。

1.3 农药在植物中的传导

植物质膜是吸收和传导农药的物理屏障,细胞膜是一个疏水载体,主要用来控制细胞和环境

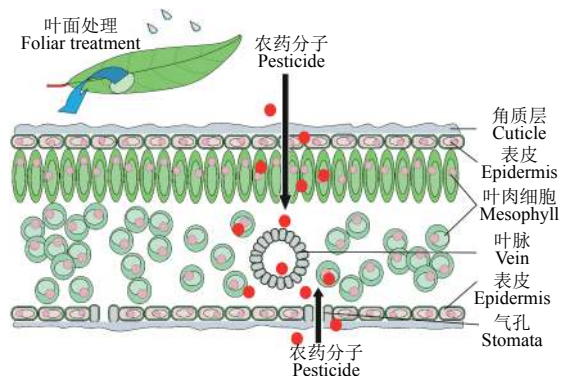


图2 农药进入植物叶片的主要途径

Fig. 2 The main routes of pesticides entering plant leaves

之间的信息和物质交换^[10]。农药要进入植物维管系统必须通过细胞膜才能在细胞之间传导,并最终进入维管束进行长距离运输。因此,膜渗透机理是影响植物长距离运输和分布的关键因素。

1.3.1 植物的传导组织 木质部是植物运输水和矿物盐的主要组织,与细胞相比木质部可以更好地输送水溶液,而不易被阻塞。韧皮部在植物中主要起到运输营养物质的作用。木质部与韧皮部在植物中形成了水、溶质和光合作用产物的平行运输方式^[10]。不同性质的农药在植物体中的运输方式也存在差异,一般认为存在木质部运输、韧皮部运输和双向传导三种方式^[5]。

1.3.2 判断农药在植物中传导的方法 植物吸收和传导一般来说是一个连续的过程。用于判断农药在植物中的传导方法有多种,比如蒸腾流富集比(TSCF)、传导因子(TF)、正辛醇/水分配系数($\log K_{ow}$)、解离常数(pKa)、传导蛋白、脂肪含量等都会影响农药在植物中的传导情况^[7,9]。蒸腾流富集比表示有机化合物在木质部的含量与其在溶液中的浓度之比,通常用来评价有机化合物通过被动运输从根到茎的传导能力^[10]。传导因子用来评估在不同处理方式下有机化合物在植物体内的传导能力^[12-13], Ge等用传导因子值比较了毒死蜱在不同蔬菜中的传导能力^[12]与几种新烟碱类农药在水稻中的传导能力^[13]。然而,农药在植物中的吸收和传导能力都与农药自身的 $\log K_{ow}$ 大小存在一定的关系。有研究表明,疏水性较低的有机化合物主要通过蒸腾流来吸收和传导,疏水性较高的有机化合物则不易在植物中发生传导^[14],而是以根系聚积为主,也有一些脂溶性农药的传导需要借助脂质传导蛋白来实现^[14]。Hsu等发现 $\log K_{ow}$ 值过大或过小,蒸腾流富集比值(TSCF)

都会降低,不利于农药的传导^[15]。当外源化合物的 $\log K_{ow} = 1.78$ 时,其在水稻中的TSCF达到最大值^[15]。也有研究发现 $\log K_{ow} > 1.8$ 的农药可以被植物根系吸收,但不易通过木质部向植物其他部位进行传导,造成农药在植物根系的聚积^[8]。农药在传导过程中还有可能在木质部和韧皮部被降解或代谢,而这些代谢物的出现也会影响农药在植物中的传导能力^[5]。判断农药在植物中传导的方法除了上述内容外,也要注重植物的品种、生育期和环境条件等其他因素^[10]。

2 农药在植物中的内吸性研究方法

农药内吸性的研究方法有很多种,目的都是研究植物吸收农药的能力与传导农药的途径。目前,用的最多的方法就是利用残留分析的手段来测定农药在植物体内的含量与分布上的差异^[16]。当然,也有利用可视化途径来研究农药的内吸性,通过靶标生物或细胞层面进行分析。

2.1 生物测定法

利用靶标生物在植物上的分布或死亡率情况来判断农药在植物中的传导情况,这种方法一般会将生物测定与农药内吸性研究结合在一起,通过观察害虫死亡情况与病菌受抑制情况来判断农药在植物体内的分布情况^[17]; Olson将吡虫啉施用至种植马铃薯的土壤中,通过观察马铃薯不同叶片上的马铃薯甲虫死亡率来判断吡虫啉在马铃薯中的传导情况^[18]。然而,这种方法的缺点在于特定生物所需的饲养和检测方法复杂,特定生物对农药的敏感性存在差异而使导致试验误差较大,且部分农药在植物体内形成代谢产物可能会影响检测结果。

2.2 同位素标记法

放射性同位素标记法就是借助同位素原子以追踪农药分子在植物体内的分布情况和传导过程,使农药内吸性研究变得可视化^[19]。例如用放射性同位素¹⁴C标记腈菌唑后,利用放射性自显影照片可观察植物各部位的放射强度,进而判断农药在植物中的分布和途径情况^[20]。

2.3 荧光标记法

异硫氰酸荧光素(FITC)是一种在细胞生物学、分子生物学和药物研究等领域广泛应用的荧光素类标记物^[21]。FITC是在荧光素的结构上引入异硫氰基(-N=C=S)得到的,异硫氰基通过与被标

记物如蛋白质的伯胺基团反应形成硫脲键, 成为牢固的荧光蛋白质结合物, 从而实现了对农药分子的荧光标记^[21]。因此, FITC 与农药分子结合后将有利于农药在植株中的可视化研究。例如, Wang 等就利用荧光蛋白与氟虫腈结合来检测氟虫腈在蓖麻韧皮部中的传导情况, 使其在韧皮部的传导途径可视化^[22]。Nair 等将 FITC 与农药载体结合观察到荧光农药载体在水稻幼苗根部的有效传输^[21]。但是, Nair 也发现 FITC 标记的农药载体对水稻种子萌发具有抑制作用^[21]。因此, 在利用 FITC 作为农药的内吸性的检测方法时, 不仅要注意荧光基团对植物的生理影响, 还要确保选择的荧光基团不能影响农药自身的理化性质^[23]。

2.4 亚细胞定位法

植物的亚细胞分级主要分为可溶性组分、细胞壁和细胞器三个部分。柯林斯等报道称, 在固溶体系中, 溶解度低的有机化学品更容易被分解成脂肪含量较高的固相。Kang 等发现植物的细胞壁则主要由多糖组成, 而细胞器则含有更多的脂类成分, 可溶性组分则由质外体中的水分、液泡溶液和细胞或细胞器之间的溶胶状基质组成^[24]。一般来说, 疏水性的农药更容易被分配至脂肪含量较高的组分, 通过测定农药在亚细胞组分中的含量有利于测定农药在细胞中的聚集场所, 也可以用于农药在植物中分布的分析^[25]。在 Ju 等的研究发现乙草胺在根系细胞器的浓度明显高于细胞壁和可溶性组分, 这使得乙草胺主要聚集在小麦根系而不易向上的传导^[26]。而阿特拉津在细胞器

和细胞壁中的富集能力较低, 这使得阿特拉津不易在根系富集, 而是更容易向上传导^[7]。然而, 亚细胞定位对农药传导情况的预测也存在一定的局限性, 在某些情况下农药的亚细胞分布还可能会随 logKow、pKa、亚细胞组分相对含量和植物种类的不同而出现差异^[27]。有研究发现虽然啞菌酯在根系得可溶性细胞组分中的分布比例最高, 但并没有发生较高得向上传到现象^[27]。

3 改善农药内吸性的策略

改善农药内吸性可以增加其接触靶标的机会, 虽然, 利用基团或载体来提高农药内吸性的手段尚处于起步阶段, 但透过当前的研究可以发现这两种手段在改善农药内吸性上具有较大的潜力。定量构效关系 (QSAR) 是利用分子的理化性质或结构式与其生物活性之间的关系来筛选活性化合物的重要方法之一^[28]。导向农药的研究很多就是借助 QSAR 的手段来预测农药与植物之间的互作关系, 借此改善农药的内吸性^[29]。纳米载体在哺乳动物中的应用比在植物中的应用早, 纳米材料在植物中的应用仍然是一个相对较新的概念^[30]。近年来, 纳米技术在农作物上的应用逐渐增加, 其中一个重要应用就是农药控制释放的研究。其次, 作为一种促进农用化学品在植物中的传导应用也已经引起了关注^[30]。近些年来, 一些学者通过添加基团对农药进行改造或通过采用纳米载体的方式提高农药的内吸性的研究报道 (表 1)。

表 1 提高农药内吸性的案例

Table 1 Examples of improving pesticide's uptake

农药种类 Types of pesticides	采用类型 Types	提高内吸性的方法 Methods of improving uptake	参考文献 References
氟虫腈 Fipronil	导向农药 Guided pesticides	甘氨酸 Glycine	[31]
氟虫腈 Fipronil	导向农药 Guided pesticides	葡萄糖 Glucose	[32]
拌种咯 Fenpiclonil	导向农药 Guided pesticides	酸性衍生化 Acidic derivative	[33]
三唑醇 Triadimenol	导向农药 Guided pesticides	吲哚乙酸 Indoleacetic acid	[34]
氰菌胺 Fenoxanil	纳米载体 Nanocarrier	介孔二氧化硅 Mesoporous Silica	[30]
螺虫乙酯 Spirotetramat	纳米载体 Nanocarrier	介孔二氧化硅 Mesoporous Silica Nanoparticles	[35]
咪鲜胺 Prochloraz	纳米载体 Nanocarrier	介孔二氧化硅 Mesoporous Silica Nanoparticles	[36]

3.1 提高农药在植物体内的导向性

一种可以在植物体内定向传导并积累的农药称为导向农药, 其是通过二元拼接的方法或其他方法与农药活性成分偶联形成的导向载体-农药活

性成分复合物^[29]。导向农药可以利用农药分子与一些植物的营养物质相偶联, 例如, 肽、氨基酸或葡萄糖等分子或基团^[37]。通过植物转运营养物质的方法将农药转移到营养物质的积累部位; 若

有昆虫取食植物形成伤口植物就会产生一些抗性物质在伤口处积累, 例如, 水杨酸、茉莉酸或酚类化合物等, 因此导向农药也可以利用这样的特性让农药在植物中形成定向积累^[37]。

3.1.1 导向农药的应用 糖基化农药成为开发具有韧皮部传导能力的新型杀虫剂的一种有效途径。Hsu 等人就指出酸性物质在韧皮部具有较高的韧皮部迁移率, 葡萄糖醛酸化可促进化合物在韧皮部的移动^[38]。农药经糖基化改性后, 可以使原本在韧皮部流动性差或不发生传导的农药流动转化为可以在韧皮部传导的结合物, 利用内源植物单糖传导可以实现单糖-农药结合物在韧皮部的理想迁移^[39]。Wu 等将葡萄糖与氟虫腈结合, 发现所得到的糖基氟虫腈在蓖麻韧皮部的传导能力显著提高^[32]。在 Wang 等的研究中还发现蓖麻韧皮部细胞对低浓度的荧光葡萄糖-脯氨酸衍生物 (2-NBDGTF) 吸收量随 pH 值的降低而显著上升, 同时, 该过程也有主动运输的参与^[22]。随后的研究也发现植物膜转运蛋白在细胞、器官及其环境之间的信息和物质交换中起着重要作用, 以氨基酸为导向农药的复合物可由多种植物转运蛋白调节来提高内吸性^[40-41]。Xie 等在研究由甘氨酸与氟虫腈结合而得的甘氨酸-氟虫腈复合物在蓖麻韧皮部传导时, 发现其中的 *RcLHT6*、*RcANT15*、*RcProT2* 和 *RcCAT2* 四个转运蛋白参与了甘氨酸-氟虫腈复合物的传导过程^[31]。当然, 也有学者利用酸性衍生化来提高农药在韧皮部的传导能力^[33]。Chollet 等就利用拌种略的酸性衍生化提高其在韧皮部的传导能力, 并表现出良好的生物活性^[33]。

3.1.2 导向农药存在的问题 导向农药的研发提高了农药的内吸性, 增加了农药在靶标部位的聚集, 为发现用于可持续植物保护的新产品开辟了广阔的前景。然而, 由于对各种植物营养物质转运体的功能和结构特征了解有限, 寻找能够作为农药转运的特异性载体十分困难。导向农药一旦到达目标位置, 植物将通过各种酶或化学溶解释放农药分子, 但是农药的活性却受到了影响^[42]。Xia 等研究发现, 虽然葡萄糖-氟虫腈复合物中的 O-糖苷键可以被 β -葡萄糖苷酶水解下得到氟虫腈活性成分, 但是其杀虫活性稍有降低^[39]。在植物对导向农药吸收的过程中, 一些与导向农药基团相似的营养物质会对其产生竞争抑制作用^[31]。在蓖麻吸收氨基酸导向农药甘氨酸-氟虫腈时, 谷氨

酸、甘氨酸、组氨酸和苯丙氨酸四种氨基酸与甘氨酸-氟虫腈存在竞争抑制关系, 尽管苯丙氨酸与甘氨酸一样是中性氨基酸, 苯丙氨酸的抑制作用却显著高于另外三种氨基酸^[31]。因此, 未来导向农药在基团选择与农药搭配的研究中仍然面临着众多挑战。

3.2 采用纳米载体提高农药在植物中的传导性

纳米载体具有理化性质稳定、易于表面功能化、高生物相容性和在植物中的低降解性等特点。将农药分子负载于纳米载体中, 通过纳米技术和纳米材料的应用, 可以改善脂溶性农药的水基化分散特性, 利用特定的纳米载体可以改善部分农药在细胞中的吸收和转移能力^[35-36]。因此, 通纳米技术来改善植物对农药吸收和传导的能力, 是提高农药的有效利用效率的另一种有效途径。

3.2.1 纳米载体的应用 纳米载体中常用的无机纳米材料有多种, 包括金属、金属氧化物、半导体和二氧化硅等^[43]。其中, 介孔二氧化硅纳米颗粒 (MSNs) 作为一种高效的生物分子载体在哺乳动物系统中占据主导地位。在医学领域, 为了提高细胞对药物、蛋白质和核酸等分子的吸收能力, MSNs 成为了增强化合物在组织和器官中运输的重要载体^[44]。近年来, 纳米技术在农作物上一个重要应用就是农药缓释技术的研究^[30]。其次, 也有研究发现 MSNs 对植物几乎没有毒性且具有促进植物吸收和传导的特点^[45-46], 这使得利用 MSNs 改善农药内吸性的应用引起了广泛的关注。Chang 等利用功能化 MSNs 将外源 DNA 导入拟南芥的根中, 并且在众多现象中发现 MSNs 可能具有跨维管束长距离运输和细胞间运输的功能^[47]。在 Zhu 等的研究中发现 MSNs 也提高了水稻对杀菌剂氟菌胺的吸收传导能力^[30]。还有研究发现以 MSNs 为载体的咪鲜胺与传统的咪鲜胺悬浮剂具有几乎相同的杀菌活性, 并且以 MSNs 为载体的咪鲜胺更易被黄瓜植株吸收, 且具有更长的持效期^[36]。在 Zhao 等研究中发现以 MSNs 不仅提高了黄瓜叶片对螺虫乙酯的吸收能力, 也提高了螺虫乙酯在黄瓜体内的传导能力^[35]。此外, MSNs 还提高了螺虫乙酯在黄瓜果实中的积累量, 但是未超过农药残留标准^[36]。

3.2.2 纳米载体存在的问题 MSNs 的粒径是限制植物吸收纳米农药关键因素, 只有合成了具有最佳粒径和构型的 MSNs, 才可能被植物细胞或

组织吸收。在多数植物的根系中,只有纳米载体颗粒的粒径小于或等于 50 nm 才能穿过植物的细胞和细胞壁^[45-47]。然而,在 Zhao 等研究发现粒径在 200~300 nm 之间的 MSNs 也可以被黄瓜叶片吸收并发生跨叶传导现象^[35]。Zhu 等研究发现水稻也能吸收平均粒径在 258 nm 的 MSNs^[30]。Dietz 和 Herth 就这对这种现象做出了解释,认为植物细胞在受到钙、硅、蛋白质、病毒和环境胁迫等影响下会适当改变对被吸收物质的尺寸限制^[48]。可见,不同植物的各部位对纳米载体的粒径要求并非完全一致,因此设计结构合理的 MSNs 是改善农药内吸性的关键。

4 小结与展望

研究农药在植物中的内吸传导原理和方法,为新农药开发和剂型创新提供了重要的依据。目前,农药的内吸性主要由农药的理化性质、制剂类型以及植物生理特性来决定。新农药研发也往往需要花费数年的时间,且得到的化合物不一定兼备良好的内吸性和高生物活性。因此,单靠筛选内吸性的农药化合物,并不是提高农药内吸性的最佳措施。在现有农药的基础上,随着农药改性与纳米载体两条途径的出现,改善农药内吸性的成功案例逐渐增加。虽然这两种途径的发展还会面临众多的挑战,但这为日后提高农药利用率的基础研究和实际应用开辟了广阔的前景。

参考文献 (References):

- [1] 农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》的通知(农农发〔2015〕2 号),2015.2.17
Ministry of agriculture on printing and distributing the action plan for zero growth of fertilizer use by 2020 and the action plan for zero growth of pesticide use by 2020(Nong Nong Fa[2015] No. 2), February 17, 2015
- [2] SICBALDI F, SACCHI G A, TREVISAN M, et al. Root uptake and xylem translocation of pesticides from different chemical classes[J]. *Pesticide Science*, 1997, 50(2): 111-119.
- [3] BRÜCK E, ELBERT A, FISCHER R, et al. An innovative ambimobile insecticide for sucking insect pest control in agriculture: Biological profile and field performance[J]. *Crop Prot*, 2009, 28(10): 838-844.
- [4] SUN J, WU Y, JIANG P, et al. Concentration, uptake and human dietary intake of novel brominated flame retardants in greenhouse and conventional vegetables[J]. *Environ Int*, 2019, 123: 436-443.
- [5] ZEBROWSKI W, BUSZEWSKI B, LANKMAYR E. Modeling of uptake of xenobiotics in plants[J]. *Crit Rev Anal Chem*, 2004, 34(3-4): 147-164.
- [6] KHAIRY A M, NOONAN O G, LOHMANN R. Uptake of hydrophobic organic compounds, including organochlorine pesticides, polybrominated diphenyl ethers, and perfluoroalkyl acids in fish and blue crabs of the lower Passaic River, New Jersey, USA[J]. *Environ Toxicol Chem*, 2019, 38(4): 872-882.
- [7] CHIOU C T, SHENG G, MANES M. A partition-limited model for the plant uptake of organic contaminants from soil and water[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35(7): 1437-1444.
- [8] BURKEN J G, SCHNOOR J L. Predictive relationships for uptake of organic contaminants by hybrid poplar trees[J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 32(21): 3379-3385.
- [9] 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.
- [10] TRAPP S. Plant uptake and transport models for neutral and ionic chemicals[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2004, 11(1): 33-39.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] KADER, Jean-Claude. Lipid-transfer proteins in plants[J]. *Annu Rev Plant Phys*, 1996, 47(1): 627-654.
- [15] HSU F C, KLEIER D A, MELANDER W R. Phloem mobility of xenobiotics[J]. *Plant Physiol*, 1988, 86(3): 1265-1271.
- [16] 范添乐, 魏芩杰, 陈小军, 等. 氟啶磺隆在野燕麦中的内吸传导特性[J]. *农药学学报*, 2018, 20(6): 809-813.
FAN T L, WEI C J, CHEN X J, et al. Uptake and translocation of flucarbazone-sodium in *Avena fatua*[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2018, 20(6): 809-813.
- [17] DEWEY J E. Pesticide residues, utility of Bioassay in the determination of pesticide residues[J]. *J. Agric Food Chem*, 1958, 6(4): 274-281.
- [18] OLSON E R, DIVELY C P, NELSON J O. Bioassay determination of the distribution of imidacloprid in potato plants: implications to resistance development[J]. *J Econ Entomol*, 2004, 97(2): 614-620.
- [19] BOWMER K, EBERBACH P, MCCORKELLE G. Uptake and translocation of ¹⁴C-glyphosate in *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. (alligator weed). I: rhizome concentrations required for inhibition[J]. *Weed Research*, 2010, 33(1): 53-57.
- [20] 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]. *农药学学报*, 2008, 10(1): 23-27.
LIU XL, 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.
- [21] NAIR R, POULOSE A C, NAGAOKA Y, et al. Uptake of FITC labeled silica nanoparticles and quantum dots by rice seedlings: effects on seed germination and their potential as biolabels for plants[J]. *Journal of Fluorescence*, 2011, 21(6): 2057-2068.
- [22] WANG J, LEI Z W, WEN Y J, et al. A Novel fluorescent conjugate

- applicable to visualize the translocation of glucose-fipronil[J]. *J. Agric Food Chem*, 2014, 62(35): 8791-8798.
- [23] JIA J L, JIN X Y, ZHU L, et al. Enhanced intracellular uptake in vitro by glucose-functionalized nanopesticides[J]. *New J Chem*, 2017, 41(19): 11398-11404.
- [24] KANG F X, CHEN D S, GAO Y Z, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in subcellular root tissues of ryegrass (*Lolium multiflorum Lam.*)[J]. *BMC Plant Biol*, 2010, 10: 210.
- [25] COLLINS C, FRYER M, GROSSO A. Plant uptake of non ionic organic chemicals[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(1): 45-52.
- [26] JU C, ZHANG H C, WU R L, et al. Upward translocation of acetochlor and atrazine in wheat plants depends on their distribution in roots[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 703: 135636.
- [27] JU C, ZHANG H C, YAO S J, et al. Uptake, translocation, and subcellular distribution of azoxystrobin in wheat plant (*Triticum aestivum L.*)[J]. *J. Agric Food Chem*, 2019, 67(24): 6691-6699.
- [28] XI Z, YU Z H, NIU C W, et al. Development of a general quantum-chemical descriptor for steric effects: Density functional theory based QSAR study of herbicidal sulfonylurea analogues[J]. *J Comput Chem*, 2006, 27(13): 1571-1576.
- [29] Wu H X, Xu H H, Marivingt-Mounir Cécile, Bonnemain Jean-Louis, Chollet Jean-François. Vectorizing agrochemicals: enhancing bioavailability via carrier-mediated transport[J]. *Pest Manag Sci*, 2018, 75: 1507-1516.
- [30] ZHU F, LIU X, CAO L, et al. Uptake and distribution of fenoxanil-loaded mesoporous silica nanoparticles in rice plants[J]. *Int J Mol Sci*, 2018, 19(10): 2854-2867.
- [31] XIE Y, ZHAO J L, WANG C W, et al. Glycineric-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.
- [32] 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, 62(24): 6088-6094.
- [33] CHOLLET J F, ROCHER F, JOUSSE C, et al. Acidic derivatives of the fungicide fenpiclonil: effect of adding a methyl group to the N-substituted chain on systemicity and fungicidal activity[J]. *Pest Manag Sci*, 2005, 61(4): 377-382.
- [34] 李俊凯, 徐汉虹, 江定心, 等. 啉啉乙酸引导下三唑醇在大豆植株中的传导与积累研究初报[J]. *农药学报*, 2005(3): 259-263.
- LI J K, XU H H, JIANG D X, et al. The preliminary study of transportation and accumulation of triadimenol in soybean seedlings induced by indoleacetic acid[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2005(3): 259-263.
- [35] 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]. *J. Agric Food Chem*, 2018, 66(44): 11592-11600.
- [36] ZHAO P Y, CAO L D, MA D K, et al. Translocation, distribution and degradation of prochloraz-loaded mesoporous silica nanoparticles in cucumber plant[J]. *Nanoscale*, 2017, 10(4): 1798-1806.
- [37] 徐汉虹, 张志祥, 程东美, 等. 导向农药[J]. *世界农药*, 2004(5): 3-9.
- XU H H, ZHANG Z X, CHENG D M, et al. Guided pesticides[J]. *World Pesticides*, 2004(5): 3-9.
- [38] HSU F C, SUN K, KLEIER D A, et al. Phloem mobility of xenobiotics VI. A phloem-mobile pro-nematicide based on oxamyl exhibiting root-specific activation in transgenic tobacco[J]. *Pest Manag Sci*, 1995, 44(1): 9-19.
- [39] 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 bond conjugates in vitro and in vivo[J]. *J. Agric Food Chem*, 2014, 62(46): 11037-11046.
- [40] 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.
- [41] YANG W, WU H X, XU H H, et al. Synthesis of glucose-fipronil conjugate and its phloem mobility[J]. *J. Agric Food Chem*, 2011, 59(23): 12534-12542.
- [42] PETER J. Propesticides and their use as agrochemicals[J]. *Pest Manag Sci*, 2016, 72(2): 210-225.
- [43] ILARIA S, ANTONIETTA L, ALFREDO A. Nanotechnology in plant science: to make a long story short[J]. *Front Bioeng Biotech*, 2019, 7: 120.
- [44] KEASBERRY N A, YAPP C W, IDRIS A. Mesoporous silica nanoparticles as a carrier platform for intracellular delivery of nucleic acids[J]. *Biochemistry*, 2017, 82(6): 655-662.
- [45] SLOMBERG D L, SCHOENFISCH M H. Silica nanoparticle phytotoxicity to *Arabidopsis thaliana*[J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46(18): 10247-10254.
- [46] POPAT A, LIU J, HU Q, et al. Adsorption and release of biocides with mesoporous silica nanoparticles[J]. *Nanoscale*, 2012, 4(3): 970-975.
- [47] CHANG F P, KUANG L Y, HUANG C A, et al. A simple plant gene delivery system using mesoporous silica nanoparticles as carriers[J]. *J Mater Chem B*, 2013, 1(39): 5279-5287.
- [48] DIETZ K J, HERTH S. Plant nanotoxicology[J]. *Trends Plant Sci*, 2011, 16(11): 582-589.

(责任编辑: 金淑惠)