

刘嘉楠, 程金金, 孙 星, 等. 水稻对三种常用农药的吸收及转运[J]. 江苏农业学报, 2023, 39( 1 ): 53-64.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.01.007

## 水稻对三种常用农药的吸收及转运

刘嘉楠<sup>1</sup>, 程金金<sup>2</sup>, 孙 星<sup>2</sup>, 周春丽<sup>2</sup>, 闫小龙<sup>2</sup>, 耿韧华<sup>2</sup>, 王冬兰<sup>2</sup>, 万 群<sup>2</sup>,  
余向阳<sup>1,2</sup>

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院/江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏 南京 210023; 2. 江苏省农业科学院, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 施用农药已经成为当今世界十分盛行的作物保护手段。研究作物对农药的吸收及转运机制对促进农药吸收、提高农药利用率以及创制新农药提供科学依据。本试验以三氟苯嘧啶、氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺为供试农药, 以水稻( *Oryza sativa* L.) 为研究对象, 通过室内水培结合抑制剂(水通道抑制剂、离子通道抑制剂、代谢抑制剂、蒸腾抑制剂) 分析水稻各组织中农药含量及转运系数。结果表明, 3 种农药的主要富集器官为根系,  $TF$  (转移因子)  $< 1$ ; 噻呋酰胺的吸收转运与其质量浓度无关, 在 1.0 mg/L 和 10.0 mg/L 质量浓度处理下没有显著差异; 在 1.0 mg/L 质量浓度处理下, 水稻根系对三氟苯嘧啶的吸收是多通道参与的主动过程, 对氯虫苯甲酰胺的吸收转运则是不需要通道蛋白以及载体协助的过程, 对噻呋酰胺的吸收需要能量, 可能依赖阴离子通道以及蒸腾作用。

**关键词:** 农药; 吸收; 转运; 抑制剂; 水稻

**中图分类号:** S511; S482

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2023)01-0053-12

## Absorption and transport of three commonly used pesticides in rice

LIU Jia-nan<sup>1</sup>, CHENG Jin-jin<sup>2</sup>, SUN Xing<sup>2</sup>, ZHOU Chun-li<sup>2</sup>, YAN Xiao-long<sup>2</sup>, GENG Ren-hua<sup>2</sup>,  
WANG Dong-lan<sup>2</sup>, WAN Qun<sup>2</sup>, YU Xiang-yang<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics/Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The application of pesticides has become a very popular crop protection method in the world today. Studying the absorption and transport mechanism of pesticides by crops provides a scientific basis for promoting pesticide absorption, improving pesticide utilization, and creating new pesticides. In this experiment, triflumezopyrim, chlorantraniliprole and thifluzamide were used as test pesticides, and rice ( *Oryza sativa* L.) was used as research object. The pesticide content and transport coefficient in various tissues of rice were analyzed by indoor hydroponics combined with inhibitors (water channel inhibitors, ion channel inhibitors, metabolic inhibitors, transpiration inhibitors). The results showed that the main enrichment organ of the three pesticides was the root, and the transfer factor (  $TF$  )  $< 1$ . The absorption and transport of thifluzamide were not related to its mass concentration, and there was no significant difference between the two treatments at the mass concentration

of 1.0 mg/L and 10.0 mg/L. Under the treatment of 1.0 mg/L, the absorption of triflumezopyrim by rice roots was an active process involving multiple channels, while the absorption and transport of chlorantraniliprole is a process without the assistance of channel proteins and carriers. The absorption of thifluzamide required energy and may depend on anion channels and transpiration.

**收稿日期:** 2022-09-29

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(32172448); 江苏省农业科技自主创新基金项目[ CX(21)2002 ]; 省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目( BE2022424 )

**作者简介:** 刘嘉楠(1998-), 女, 河南三门峡人, 硕士研究生, 主要从事食品质量安全研究。(E-mail) Liujianan67@163.com

**通讯作者:** 万 群, (E-mail) wanqun@jaas.ac.cn

**Key words:** pesticides; absorption; transport; inhibitor; rice

研究表明,害虫和病原体对全球水稻、小麦、玉米、土豆造成的损失在17%~30%<sup>[1-2]</sup>,从统计的角度来看,中国的农药使用量几乎占全球的30%,大量的农药导致作物中的农药残留逐渐积累,并通过径流、侵蚀、挥发等方式影响环境,通过食物链危害人体健康<sup>[3]</sup>。尽管农药对人类和其他生物体有潜在的不利影响,但由于其控制病虫害和提高农业生产力的优势,农药仍被广泛应用于农业生产中<sup>[4]</sup>。近年来世界各国对环境保护日益重视,农药的不当使用对环境造成的各种危害随之引起了广泛关注。

氧化应激和细胞凋亡是判断污染物对环境生物是否造成不利影响的重要指标。三氟苯嘧啶是防治稻飞虱的优良农药,作为一种农业害虫,小褐飞虱对水稻、玉米、小麦等多种作物造成损失。小褐飞虱不仅直接啃食作物植株本身,更严重的是传播病毒(水稻黑条矮缩病、水稻条纹病毒)<sup>[4-6]</sup>。三氟苯嘧啶作为介离子化合物,对半翅目昆虫褐飞虱和鳞翅目昆虫均具有高杀虫活性,同时对传粉的蜜蜂也具有高毒性<sup>[7]</sup>,而且对于蚯蚓 DNA 的损伤表现出生物累积性<sup>[8]</sup>。并且长期广泛使用三氟苯嘧啶还会导致小褐飞虱对该农药的抗性逐渐增强。氯虫苯甲酰胺,作为双酰胺杀虫剂之一<sup>[9]</sup>,为全世界第4大常用杀虫剂<sup>[10]</sup>,主要用于防治鳞翅目和鞘翅目害虫<sup>[11]</sup>,2021 年全球销售额达到 $1.8529 \times 10^9$  元<sup>[12]</sup>。然而氯虫苯甲酰胺利用效率低,流失比例高,不仅造成环境污染,还会对周围水生生物造成毒害<sup>[13-14]</sup>,如对大型水蚤、牡蛎和虾均具有生殖毒性<sup>[12]</sup>,还会引起蚯蚓、赤眼蜂的氧化应激反应。最近的研究报道称,该农药影响脊椎动物鸡胚的生长发育,即使低剂量也会导致怀孕大鼠的胎儿畸形<sup>[15]</sup>。另有试验结果表明,氯虫苯甲酰胺会诱导斑马鱼肝脏细胞凋亡<sup>[4]</sup>。噻呋酰胺,作为广谱高效杀菌剂<sup>[2]</sup>,以防治水稻纹枯病而闻名<sup>[16]</sup>,对水生生物(斑马鱼、大型蚤)具有中等毒性<sup>[2,17]</sup>。氯虫苯甲酰胺能够抑制蚯蚓的生长和繁殖,当浓度超过 1 mg/kg 时,会导致蚯蚓的氧化应激反应<sup>[18]</sup>。氯虫苯甲酰胺还会影响真菌群落结构,对土壤微生物群落等非目标生物造成不利影响,抑制土壤中磷酸酶、过氧化氢酶、脲酶等的活性<sup>[3]</sup>,影响生态结构稳定。上述农药残留已经造成了环境

污染、生态毒性和人类疾病<sup>[19]</sup>,造成了非目标生物(斑马鱼、蚯蚓、大型水蚤、淡水蜗牛、其他无脊椎动物和藻类)的危害<sup>[20-21]</sup>以及人类急性和慢性疾病(皮肤和眼睛刺激、头痛、心脏病、免疫系统减弱、内分泌紊乱、癌症、过敏等)<sup>[22-24]</sup>。

根系吸收是农药进入作物的主要途径,具体方式有两种,分别为主动吸收和被动吸收,两者的主要区别在于是否消耗能量。主动吸收是由载体介导的能量消耗过程,被动吸收包括简单的扩散和需要载体和通道介导的协助扩散,不消耗能量。当农药从土壤或水环境进入作物的根系细胞时,一部分通过主动吸收,一部分则通过被动吸收进入细胞内部。被动吸收经过的通道主要包括水通道、离子通道。水通道蛋白是一种跨膜通道蛋白,主要用于维持细胞内水平衡。剧毒的  $\text{Hg}^{2+}$  会使质膜生物化学性质遭到破坏,多篇研究报道称  $\text{Hg}^{2+}$  通过抑制水通道蛋白可逆地抑制植物细胞内大量水的跨膜转运<sup>[25-28]</sup>。 $\text{Ag}^+$  是比常用的  $\text{Hg}^{2+}$  更有效的水通道蛋白抑制剂, $\text{Ag}^+$  与位于 NPA 基序附近的半胱氨酸的巯基反应,从而达到抑制水通道蛋白的作用。植物阴离子通道根据动力学特性可以分为快阴离子通道和慢阴离子通道<sup>[29]</sup>,分别以 DIDS 和 9-AC 为代表。NPPB 是氯离子通道抑制剂,和 DIDS、9-AC 均作为阴离子通道抑制剂用于验证农药的跨膜吸收转运是否通过阴离子通道<sup>[30]</sup>。TEAC 和  $\text{Ba}^{2+}$  是钾离子通道抑制剂,其专一性被广泛研究。 $\text{CoCl}_2$ 、EGTA 和  $\text{CaCl}_2$  为钙离子通道抑制剂。 $\text{Na}_3\text{VO}_4$  为代谢抑制剂,可以通过抑制质膜  $\text{H}^+$ -ATP 酶活性来抑制根细胞产生能量<sup>[30]</sup>。 $\text{NaN}_3$  是一种氧化磷酸化抑制剂,主要通过抑制电子传递系统和细胞色素氧化酶活性从而抑制细胞产生能量<sup>[31-32]</sup>。2,4-DNP 是一种典型的氧化磷酸化解耦子,能够抑制线粒体中 ATP 的生物合成<sup>[33]</sup>。

进入根系细胞之后,农药随着蒸腾流通过木质部继续向地上部分转运<sup>[25]</sup>。化学物质由植物根系到茎叶部分是在木质部的蒸腾流作用下进行传输的,蒸腾作用是化学物质向上输送的主要驱动力,因此蒸腾流不仅能够传输植物所需的营养物质,还能够传输对植株不利的有害物质,ABA 等植物激素除

了参与离子转运和调节根系生长外,最重要的是降低气孔导度和蒸腾作用,促进气孔关闭<sup>[34]</sup>,因此在试验中可以用于验证蒸腾作用对植株吸收转运农药的影响。

三氟苯嘧啶,氯虫苯甲酰胺,噻呋酰胺作为稻田中常用的拌种农药<sup>[35-36]</sup>,具有低成本、高效率、靶标性强的特点,常作为种衣剂的主要成分用于防治病虫害。目前关于这3种农药的田间防治效果研究较多<sup>[37-38]</sup>,但是有关水稻对这3种农药的吸收机理的报道较少。研究水稻对三氟苯嘧啶,氯虫苯甲酰胺,噻呋酰胺具体的吸收机理,对于提高农药利用率,降低土壤、水体等环境污染,走绿色防控路线具有极大的生态价值和指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试水稻南粳5055,由江苏省农业科学院粮食作物研究所提供。

仪器:Qtrap 5500+高效液相色谱串联质谱仪(美国AB Sciex公司产品);Kinetex 2.6  $\mu\text{m}$  F5液相色谱柱,全自动样品快速研磨仪(上海净信公司产品)。

试剂:三氟苯嘧啶,氯虫苯甲酰胺,噻呋酰胺原药,纯度96%,上海阿拉丁试剂公司产品;乙腈(色谱纯,德国Merck公司产品);硝酸银( $\text{AgNO}_3$ ),氯化汞( $\text{HgCl}_2$ ),氯化钡( $\text{BaCl}_2$ ),氯化钴( $\text{CoCl}_2$ ),氯化钙( $\text{CaCl}_2$ ),无水硫酸镁( $\text{MgSO}_4$ ),*N*-丙基乙二胺(PSA),上海国药集团产品;9-蒽甲酸(9-AC),4,4'-二硝基二苯乙烯-2,2'-二磺酸(DIDS),5-硝基-2-(3-苯丙胺)苯甲酸(NPPB),四乙基氯化铵(TEAC),乙二醇双(2-氨基乙基醚)四乙酸(EGTA),钒酸钠( $\text{Na}_3\text{VO}_4$ ),2,4-二硝基苯酚(2,4-DNP),叠氮化钠( $\text{NaN}_3$ ),脱落酸(ABA),上海源叶生物科技有限公司产品;水稻营养液干粉,北京酷来搏科技有限公司产品。

### 1.2 试验设计

水稻种子用3%次氯酸钠溶液消毒5 min,用去离子水完全冲洗表面,然后用75%乙醇消毒5 min,并用去离子水完全冲洗干净。在去离子水中浸泡24 h后,将种子转运到培养皿的滤纸上,在28  $^{\circ}\text{C}$ 黑暗中催芽48 h,并在种子刚刚露白时播种至96孔黑色水培盒,按比例加入pH为5.6~5.8

的水稻营养液,温室条件设置为每天30  $^{\circ}\text{C}$ 下光照处理14 h,25  $^{\circ}\text{C}$ 下黑暗处理10 h。生长25 d后,选择长势、大小一致的健康幼苗用于之后的水培暴露试验。

1.2.1 农药暴露试验 吸干水稻表面水分后分别放入含不同质量浓度、不同农药的50 ml玻璃管中,并用锡纸包裹水稻根部所在的玻璃管表面,以防农药的光解和挥发。三氟苯嘧啶的处理质量浓度为0.2 mg/L、1.0 mg/L;氯虫苯甲酰胺和噻呋酰胺的处理质量浓度均为1.0 mg/L、10.0 mg/L,每个处理3个重复,处理时间分别为2 h、6 h、12 h、24 h、48 h、96 h,同时设置不加农药的空白对照组,从0 h开始取水样。

1.2.2 不同通道抑制剂对农药吸收的影响 处理条件同方法1.2.1,三氟苯嘧啶、氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺的处理质量浓度均为1 mg/L,在加入农药的同时分别加入不同抑制剂,水通道抑制剂选用1  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AgNO}_3$ 和10  $\mu\text{mol/L}$   $\text{HgCl}_2$ ;9-AC、DIDS、NPPB作为阴离子通道抑制剂,浓度分别为10  $\mu\text{mol/L}$ 、5  $\mu\text{mol/L}$ 、5  $\mu\text{mol/L}$ ;20  $\mu\text{mol/L}$  TEAC、1 mmol/L  $\text{BaCl}_2$ 、20  $\mu\text{mol/L}$   $\text{CoCl}_2$ 、20  $\mu\text{mol/L}$  EGTA、1 mmol/L  $\text{CaCl}_2$ 作为阳离子通道抑制剂;代谢抑制剂选择0.6 mmol/L  $\text{Na}_3\text{VO}_4$ 、0.5 mmol/L 2,4-DNP、0.1 mmol/L  $\text{NaN}_3$ 、10  $\mu\text{mol/L}$  ABA作为蒸腾抑制剂以及添加保护膜处理(Film)。同时设置不含抑制剂只含农药的对照组,每个处理3个重复。

### 1.3 水稻植株中农药含量的测定

1.3.1 样品提取 在取样时间将水稻植株从水培营养液中取出,用去离子水冲洗水稻根部,充分去除表面可能残留的农药,用吸水纸吸干植株表面的水分,分离根(地下部分)和茎叶(地上部分),分别放入10 ml离心管中,并称质量,-20  $^{\circ}\text{C}$ 冰冻保存。提取时,加入6 ml乙腈和两颗直径6 mm的钢珠,振荡研磨20 min,加入1 g NaCl,继续振荡涡旋,以6 000 r/min的转速离心5 min。吸取上清液1 ml,加入含有200 mg净化剂(150 mg无水硫酸镁、25 mg PSA、25 mg C18)的2 ml离心管中,充分涡旋1 min,8 000 r/min离心2 min,上清液经过0.2  $\mu\text{m}$ 有机滤膜的过滤倒入进样小瓶中,待检测。水样也进行同样的操作,在每个取样时间,吸取1 ml水样于10 ml离心管中,加入2 ml乙腈涡旋振荡5 min,加入1 g NaCl继续涡旋震荡5 min,充分振荡后静置5 min,吸取1 ml

上清液经过 0.2  $\mu\text{m}$  有机滤膜的过滤倒入进样小瓶,待检测。

**1.3.2 检测条件** 通过 AB-Sciex Exion 液相色谱结合 AB-Sciex Qtrap 5500+三重四极质谱(HPLC-MS/MS)进行检测。使用 Kinetex 柱(F5, 2.6  $\mu\text{m}$ , 100 cm $\times$ 30 mm)在 30  $^{\circ}\text{C}$  下实现色谱分离,进样体积设置为 2  $\mu\text{L}$ ,流动相为 10%甲酸水和 90%乙腈,每次样品运行前的平衡时间为 2 min,流速 0.3 ml/min,保留时间 5 min。

#### 1.4 数据统计与分析

所有试验数据通过 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行差异显著性分析,利用 Microsoft Excel 2019 软件进行处理并绘图,利用 Origin 2019 软件进行吸收浓度和吸收速率的方程拟合,水稻根部从营养液中富集农药的程度用根部生物富集因子(RCF)表示,茎叶部分富集农药的程度用茎叶部生物富集因子(SCF)表示,由地下部分(根部)向地上部分(茎叶部分)的转运能力用转移因子(TF)表示,水稻根系对 3 种农药的吸收量和吸收速率与吸收时间之间的关系采用 Elovich 方程进行拟合,计算公式如下:

$$RCF = C_{\text{root}} / C_{\text{water}}$$

$$SCF = C_{\text{stem+leaf}} / C_{\text{water}}$$

$$TF = C_{\text{stem+leaf}} / C_{\text{root}}$$

公式中  $C_{\text{root}}$ :根中农药浓度,  $C_{\text{stem+leaf}}$ :茎叶中农药浓度,  $C_{\text{water}}$ :营养液中农药浓度。

$$C_t = C_0 + k \ln(t/2)$$

$$V_t = V_0 \times e^{-kt}$$

公式中  $C_t$ 为  $t$  时刻水稻根系/茎叶(鲜质量)中农药的吸收量(mg/kg);  $C_0$ 为初始时刻的吸收量(mg/kg),  $t$  为吸收时间(h),  $k$  表示吸收速率常数[mg/(kg $\cdot$ h)]。  $V_t$ 表示  $t$  时间段内水稻根系的平均吸收速率[mg/(kg $\cdot$ h)],  $V_0$ 表示初始时刻的吸收速率[mg/(kg $\cdot$ h)]。

#### 1.5 方法验证

在水稻根、茎叶、营养液中分别加入三氟苯嘧啶、氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺标准溶液,添加水平为 0.05 mg/kg、0.10 mg/kg 和 1.00 mg/kg,每个处理 5 次重复。结果显示 3 种农药的平均回收率为 83%~97%,相对标准偏差为 1.85%~4.40%,基质标准曲线的决定系数均大于 0.990,符合农药残留分析的要求。

## 2 结果与分析

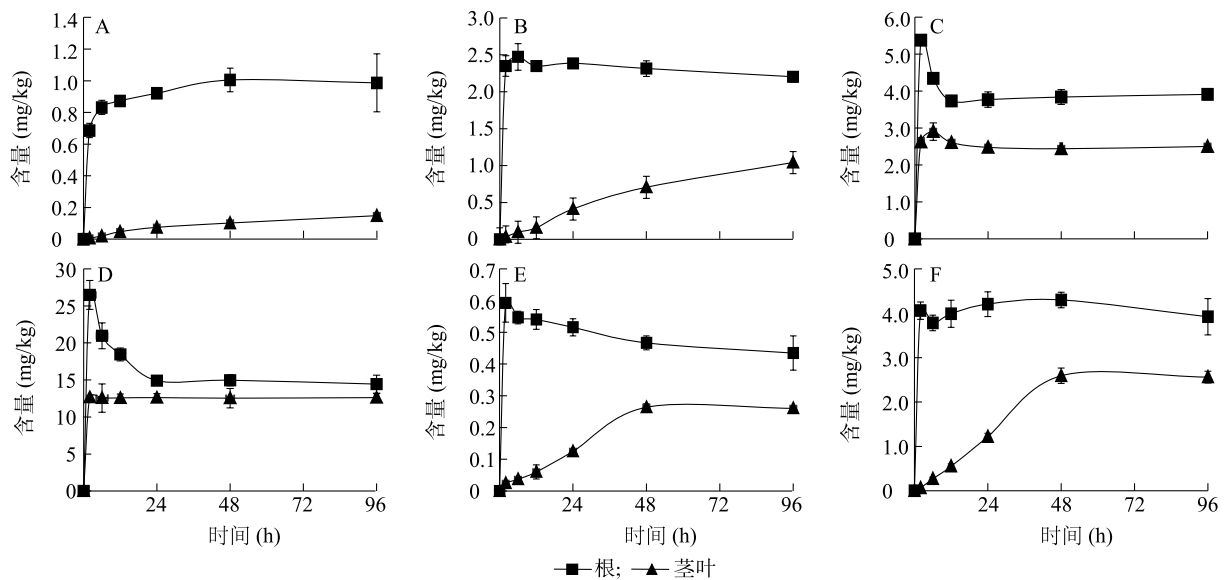
### 2.1 水稻对农药的吸收积累

在每个取样时间点,与对照组相比水稻没有受到明显的药害作用,水稻根系和茎叶中农药含量随时间的变化趋势见图 1,三氟苯嘧啶、氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺在地下部分和地上部分的积累均符合一级动力学方程。处理农药为三氟苯嘧啶时,0.2 mg/L 质量浓度下,水稻根系在 0~2 h 快速吸收三氟苯嘧啶,在 2~48 h 内缓慢吸收三氟苯嘧啶,并逐渐达到平稳状态,最终根系中三氟苯嘧啶含量维持在 0.95 mg/kg; 1.0 mg/L 质量浓度下,根系中三氟苯嘧啶含量在前 2 h 内快速升高,在 6 h 达到吸收峰值(2.47 mg/kg),后开始呈下降趋势,逐渐达到平稳状态并最终含量保持在 2.30 mg/kg,茎叶中三氟苯嘧啶富集呈现持续缓慢上升的趋势(图 1A、图 1B)。处理农药为氯虫苯甲酰胺时,1.0 mg/L 和 10.0 mg/L 质量浓度下,富集趋势相同,其中根系中的氯虫苯甲酰胺含量在前 2 h 快速升高,分别达到 5.40 mg/kg 和 26.50 mg/kg,在 2~12 h 快速下降,24 h 之后达到平稳状态,最终含量分别维持在 3.80 mg/kg 和 14.80 mg/kg;茎叶中氯虫苯甲酰胺含量在 0~2 h 快速升高,之后小幅度下降后保持平稳,最终含量分别维持在 2.40 mg/kg 和 12.60 mg/kg (图 1C、图 1D)。处理农药为噻呋酰胺时,1.0 mg/L 和 10.0 mg/L 质量浓度处理下,根系吸收峰值也均在 2 h 出现,最高含量分别为 0.59 mg/kg 和 4.05 mg/kg;茎叶中富集量都在 48 h 达到最大值,分别为 0.26 mg/kg 和 2.59 mg/kg,之后保持平稳状态(图 1E、图 1F)。

为进一步探讨水稻对 3 种农药在处理时间 96 h 内的吸收速率与吸收时间的关系,拟合吸收速率曲线如图 2 所示,在三氟苯嘧啶处理下,质量浓度为 0.2 mg/L 和 1.0 mg/L 时,根系在 0~2 h 内吸收速率快速升高,峰值分别达到 0.34 mg/(kg $\cdot$ h) 和 1.17 mg/(kg $\cdot$ h),在 2~6 h 吸收速率下降较快,在 6~48 h 下降幅度较缓,在 48~96 h 吸收速率接近 0,在第 6 h 的吸收速率分别是第 2 h 的 40.4% 和 35.1%,在第 48 h 的吸收速率分别是第 2 h 的 6% 和 4% (图 2A、图 2B)。在氯虫苯甲酰胺处理下,质量浓度为 1.0 mg/L 和 10.0 mg/L 时,根系和茎叶均在 0~2 h 内吸收速率快速升高,根系吸收速率分别达到 1.34

mg/(kg·h) 和 6.62 mg/(kg·h), 茎叶吸收速率分别达到 0.26 mg/(kg·h) 和 1.17 mg/(kg·h); 在 6~48 h 吸收速率减慢, 48~96 h 保持接近 0 的状态 (图 2C、图 2D)。噻呋酰胺在 1.0 mg/L 和 10.0 mg/L 质量浓度下, 根系在 0~2 h 的吸收速率最高分别达到 0.15 mg/(kg·h) 和 1.02 mg/(kg·h), 之后吸收速率逐渐下降, 最后保持接近 0 的状态, 茎叶吸收速率始终保持接近 0 的平稳状态 (图 2E、图

2F)。从图 2 中水稻根系对 3 种农药的吸收速率曲线可以看出, 水稻根系对 3 种农药的吸收速率均呈现前 2 h 快速升高后又快速下降然后呈现平稳接近 0 的趋势; 同时对同种农药的不同质量浓度处理下, 拟合的吸收速率曲线趋势吻合, 说明吸收速率与农药的质量浓度无关。对比水稻根系和茎叶对 3 种农药的吸收速率可以看出, 根是主要农药富集器官, 水稻将农药向茎叶部分转运的能力较差。



A: 三氟苯嘧啶 0.2 mg/L; B: 三氟苯嘧啶 1.0 mg/L; C: 氯虫苯甲酰胺 1.0 mg/L; D: 氯虫苯甲酰胺 10.0 mg/L; E: 噻呋酰胺 1.0 mg/L; F: 噻呋酰胺 10.0 mg/L。

图 1 水稻根系与茎叶中农药含量随时间的变化

Fig.1 Changes of pesticide content in rice roots, stems and leaves with time

## 2.2 农药在水稻植株中的转运规律

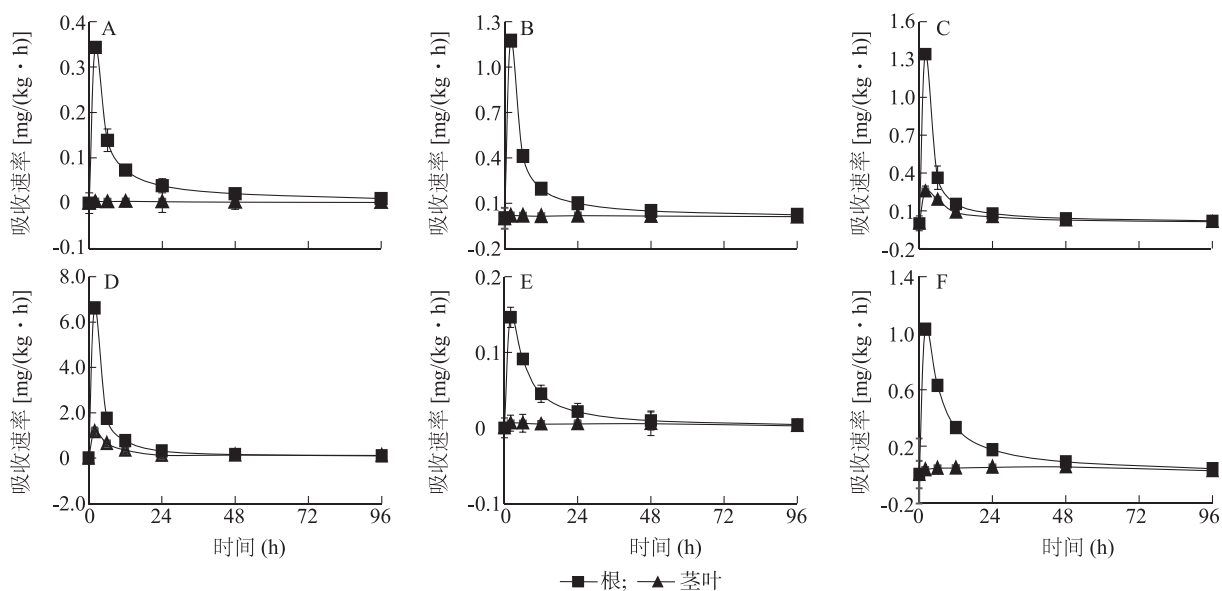
由图 3A 所示, 三氟苯嘧啶处理下, 质量浓度为 0.2 mg/L 时, 转移因子随时间缓慢升高; 质量浓度为 1.0 mg/L 时, 转移因子快速升高, 在 0~96 h 的处理时间内,  $TF < 1$ ; 由图 3B 所示, 氯虫苯甲酰胺处理下, 质量浓度为 1.0 mg/L 时, 转移因子先快速升高, 24 h 后达到平稳的趋势; 质量浓度为 10.0 mg/L 时, 0~48 h 快速升高达到峰值后下降; 由图 3C 所示, 噻呋酰胺处理下, 质量浓度为 1.0 mg/L 和 10.0 mg/L 时, 两种质量浓度下水稻的转移因子趋势吻合, 0~48 h 快速升高, 48~96 h 趋于平稳。水稻分别在不同质量浓度的三氟苯嘧啶、氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺处理下,  $TF < 1$ , 再次印证了之前的结论: 三氟苯嘧啶、氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺主要富集在水稻的根系, 水稻将其由地下部分向地上部分的转运能力较差。噻呋

酰胺处理下, 1.0 mg/L 和 10.0 mg/L 两种质量浓度下水稻转移因子趋势重合, 说明噻呋酰胺在水稻植株中的转运与其质量浓度无关。

## 2.3 抑制剂对水稻吸收农药的影响

为了研究水稻对三氟苯嘧啶、氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺的吸收机制, 我们利用多种水通道蛋白抑制剂、阴离子通道抑制剂、阳离子通道抑制剂、代谢抑制剂、蒸腾抑制剂进行区分, 多种抑制剂对于水稻吸收转运农药的抑制情况在图 4~图 6 中显示。

2.3.1 抑制剂对水稻吸收三氟苯嘧啶的影响 多种抑制剂对水稻吸收转运三氟苯嘧啶的影响如图 4 所示。水通道蛋白抑制剂: 在添加  $\text{AgNO}_3$  的三氟苯嘧啶水稻营养液中培养水稻 48 h, 与没有添加抑制剂的对照相比, 根系中的农药含量降低了 28%, 茎叶中农药含量下降了 53%, 由根系向茎叶中的转运



A: 三氟苯嘧啶 0.2 mg/L; B: 三氟苯嘧啶 1.0 mg/L; C: 氯虫苯甲酰胺 1.0 mg/L; D: 氯虫苯甲酰胺 10.0 mg/L; E: 噻呋酰胺 1.0 mg/L; F: 噻呋酰胺 10.0 mg/L。

图2 水稻对农药吸收速率随时间的变化

Fig.2 Changes of uptake rate of pesticide in rice with time

抑制率达到 34%; 添加  $\text{HgCl}_2$  的处理与对照相比, 水稻根系中农药含量仅降低了 18%, 茎叶中农药含量降低了 34%,  $\text{HgCl}_2$  对三氟苯嘧啶转运的抑制作用达到 20%。

**阴离子通道抑制剂:** 在分别添加 9-AC、DIDS、NPPB 的三氟苯嘧啶水稻营养液处理中, 水稻根系对三氟苯嘧啶的吸收分别降低了 22%、10%、19%, 茎叶中三氟苯嘧啶含量显著降低了 34%、54%、53%, 三氟苯嘧啶地下部分向地上部分的转运抑制率分别达到 15%、49%、41%。说明阴离子通道抑制剂部分抑制水稻对三氟苯嘧啶的吸收转运。

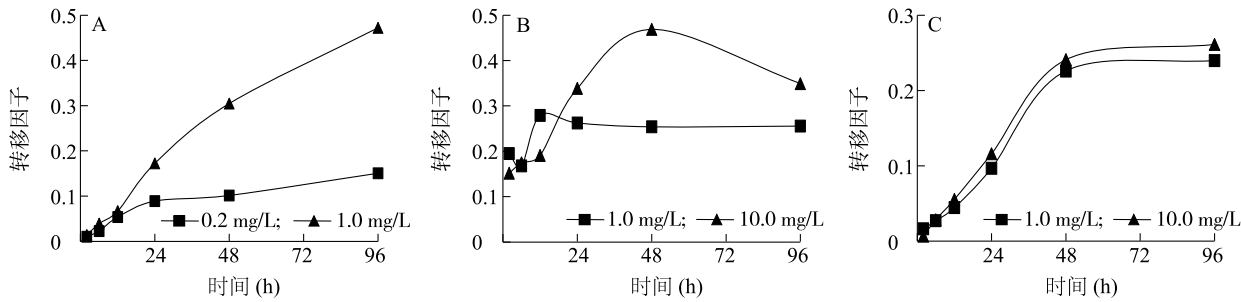
**阳离子通道抑制剂:** 三氟苯嘧啶作为介离子农药, 分子结构中同时包含阴离子和阳离子。通过添加阳离子抑制剂验证水稻对该农药的吸收转运中阳离子通道的作用, 在分别添加 TEAC、 $\text{BaCl}_2$ 、 $\text{CoCl}_2$ 、EGTA、 $\text{CaCl}_2$  的处理中, 根系对三氟苯嘧啶的吸收分别降低了 27%、28%、25%、24%、-24%, 茎叶中对农药的积累降低了 45%、21%、26%、7%、29%, 对三氟苯嘧啶转运的抑制率达到 29%、-13%、2%、-24%、43%。结果表明部分钾离子和钙离子通道抑制剂抑制了水稻对三氟苯嘧啶的吸收, 部分阳离子通道是农药进入根系的通道之一,  $\text{CaCl}_2$  反而促进了根系对三氟苯嘧啶的吸收, 但是抑制了其向上转运的能力。

**代谢抑制剂:**  $\text{Na}_3\text{VO}_4$ 、2,4-DNP、 $\text{NaN}_3$ , 分别对根系三氟苯嘧啶吸收抑制率达到 11%、35%、42%, 茎叶中三氟苯嘧啶含量分别下降 43%、24%、38%, 对三氟苯嘧啶根系向茎叶转运的抑制率达到 34%、-19%、-6%。表明三氟苯嘧啶的吸收转运部分依赖能量。

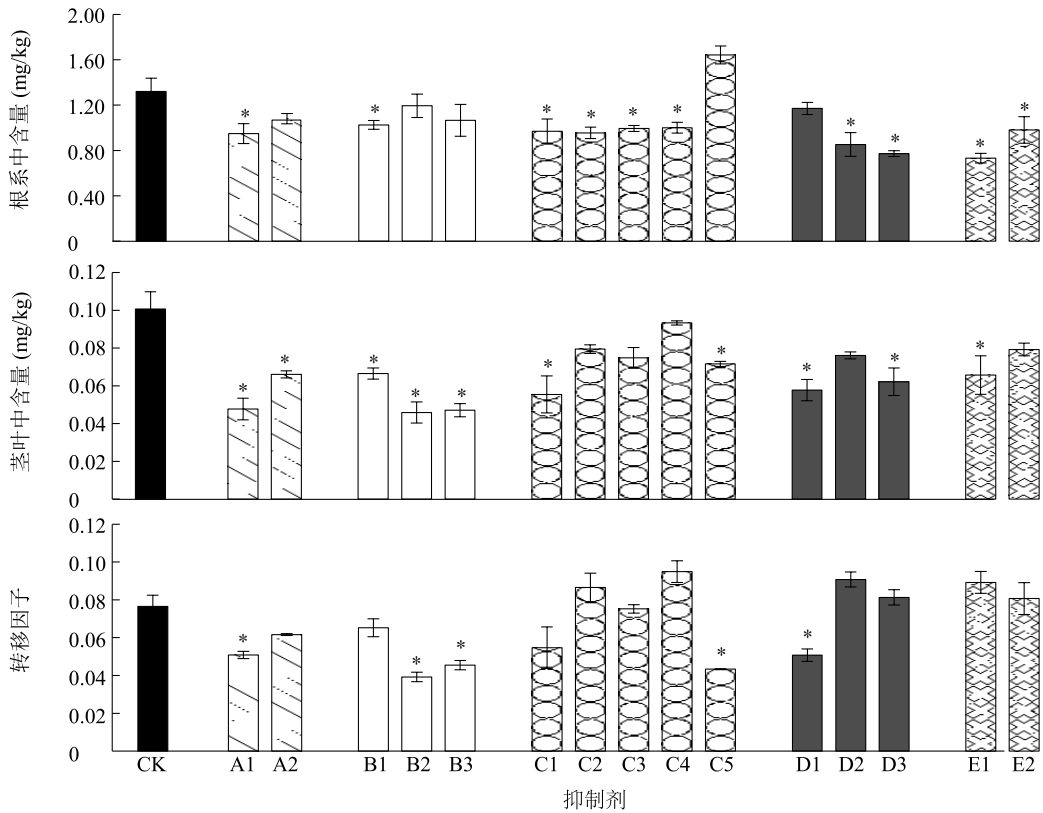
**蒸腾抑制剂:** 分别采用手动添加保鲜膜制造黑暗场景和添加 ABA 抑制水稻蒸腾作用 2 种方式验证蒸腾作用对水稻吸收转运农药的影响, 2 种方式分别对根系三氟苯嘧啶吸收抑制率达到 45%、26%, 茎叶中三氟苯嘧啶含量分别下降了 35% 和 21%, 但 2 种方式对三氟苯嘧啶转运没有明显抑制作用。

### 2.3.2 抑制剂对水稻吸收氯虫苯甲酰胺的影响

图 5 显示, 分别添加不同的水通道蛋白抑制剂和阴离子通道抑制剂的试验组与对照相比, 没有显著差异, 说明氯虫苯甲酰胺在水稻根系中富集以及向茎叶中的转运不依赖水通道蛋白和阴离子通道。在添加代谢抑制剂  $\text{Na}_3\text{VO}_4$ 、2,4-DNP、 $\text{NaN}_3$  后, 氯虫苯甲酰胺在根系中富集量提升, 分别达 43%、37%、139%, 代谢抑制剂对于茎叶中农药的富集量则没有显著影响, 氯虫苯甲酰胺由地下部分向地上部分的转运则分别被抑制了 28%、29%、58%, 表明代谢抑制剂提升了氯虫苯甲酰胺在根系中富集, 抑制其向上转运。



A: 三氟苯嘧啶; B: 氯虫苯甲酰胺; C: 噻呋酰胺。  
图3 水稻根系向茎叶转运农药的转移因子  
Fig.3 Transfer factors of pesticides transferring from roots to stems and leaves of rice

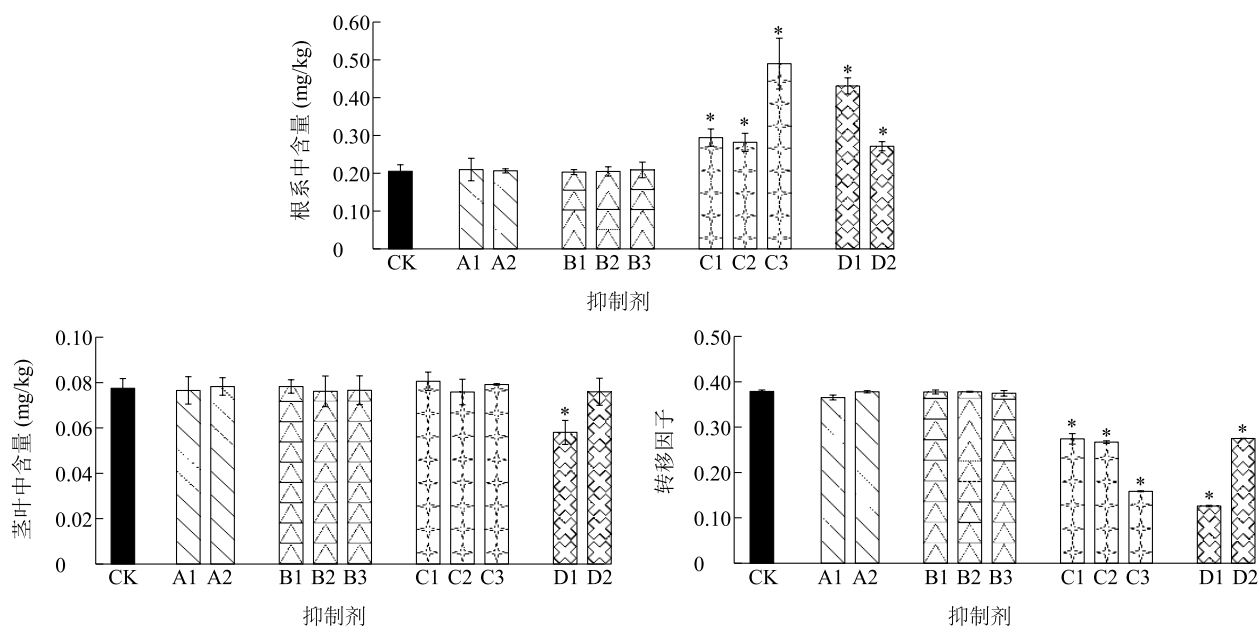


A1: AgNO<sub>3</sub>; A2: HgCl<sub>2</sub>; B1: 9-AC; B2: DIDS; B3: NPPB; C1: TEAC; C2: BaCl<sub>2</sub>; C3: CoCl<sub>2</sub>; C4: EGTA; C5: CaCl<sub>2</sub>; D1: Na<sub>3</sub>VO<sub>4</sub>; D2: 2, 4-DNP; D3: NaN<sub>3</sub>; E1: 添加保鲜膜制造黑暗场景 (Film); E2: ABA。\* 表示处理与对照之间在 0.05 水平上差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图4 添加抑制剂后水稻根系对三氟苯嘧啶的吸收及转运  
Fig.4 Uptake and transfer of triflumezopyrim by rice roots after adding inhibitors

由添加保鲜膜和添加蒸腾抑制剂 ABA 处理中发现,根系氯虫苯甲酰胺的富集量分别显著提高了 110% 和 32%,两种处理对氯虫苯甲酰胺转运的抑制率分别为 67% 和 27%,表明蒸腾作用被抑制后,农药跟随水分及营养物质沿蒸腾流向上传输大幅度削减,说明蒸腾作用是影响氯虫苯甲酰胺从水稻根系

向茎叶转运的重要因素之一。  
2.3.3 抑制剂对水稻吸收噻呋酰胺的影响 如图 6 所示,添加水通道蛋白抑制剂 AgNO<sub>3</sub>对水稻根系和茎叶中噻呋酰胺的富集没有显著影响,但是噻呋酰胺由地下部分向地上部分的转运提高了 31%,HgCl<sub>2</sub>对噻呋酰胺的吸收转运没有显著的抑制作用。在添



A1:  $\text{AgNO}_3$ ; A2:  $\text{HgCl}_2$ ; B1: 9-AC; B2: DIDS; B3: NPPB; C1:  $\text{Na}_3\text{VO}_4$ ; C2: 2,4-DNP; C3:  $\text{NaN}_3$ ; D1: 添加保鲜膜制造黑暗场景 (Film); D2: ABA。

\* 表示处理与对照之间在 0.05 水平上差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 5 添加抑制剂后水稻根系对氯虫苯甲酰胺的吸收及转运

Fig.5 Uptake and transfer of chlorantraniliprole by rice roots after adding inhibitors

加阴离子通道抑制剂 9-AC、DIDS、NPPB 后,根系对噻虫酰胺的吸收分别被抑制了 55%、29%、39%,阴离子通道抑制剂促进噻虫酰胺由根系向茎叶中的转运,分别提高了 50%、112%、96%。

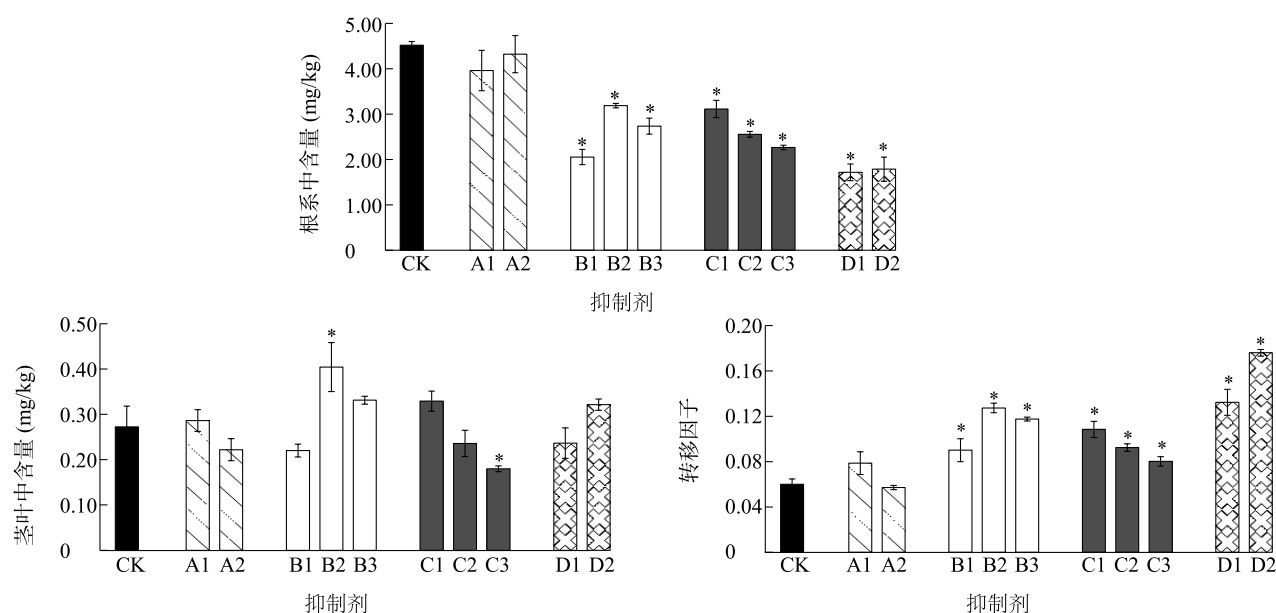
代谢抑制剂  $\text{Na}_3\text{VO}_4$ 、2,4-DNP、 $\text{NaN}_3$  对根系富集噻虫酰胺的抑制率分别为 31%、43%、50%,对茎叶的富集抑制率达到 -21%、13%、34%,对噻虫酰胺由地下部分向地上部分的转运分别提高了 81%、54%、34%,说明噻虫酰胺的吸收转运依赖能量,是一个主动吸收的过程。

保鲜膜处理抑制了水稻根系对噻虫酰胺的吸收,抑制率为 62%,对茎叶中累积抑制率为 13%,噻虫酰胺由根系向茎叶中的转运提高了 120%;ABA 对水稻根系噻虫酰胺的富集抑制了 60%,对于茎叶中噻虫酰胺的富集提高了 18%,由根系向茎叶的转运提高了 193%。

### 3 讨论

在本研究中,三氟苯嘧啶、氯虫苯甲酰胺、噻虫酰胺均可以被水稻根系吸收且部分向地上部茎叶转运。在相同农药不同质量浓度处理下,根系和茎叶中累积量随时间的动态趋势没有显著差异,说明水

稻对这 3 种农药的吸收转运可能与农药的质量浓度无关,而与农药的类别有关。水稻对不同农药的富集趋势不同,但均在前 2 h 根系中累积量快速升高,这可能是由于前期水稻从营养液中快速吸收,后期逐渐趋于饱和达到平稳状态的结果。Liu 等<sup>[39]</sup>关于小麦中 11 种农药的吸收动力学研究中也发现相似的吸收动态趋势,小麦分别在含有乐果、噻啉磷有机磷农药、抗蚜威氨基甲酸酯类杀虫剂、阿特拉津三嗪类除草剂、三唑酮、戊唑醇杀菌剂的营养液中暴露 144 h,在 96 h 均达到吸收平衡,氟硅唑和苯醚甲环唑在 48 h 就达到吸收动态平衡,之后保持平稳状态;Ju 等<sup>[40]</sup>关于小麦中 6 种农药吸收转运的试验中同样得到在 6~24 h 小麦根系中农药含量快速升高,后期有所下降并维持在一个稳定水平,达到稳定的时间不同可能是由于农药的类别不同以及植物不同造成的。Yu 等<sup>[31]</sup>研究小白菜对抗生素的吸收,发现在抗生素处理后 72 h 内并没有达到吸收平衡;张硕佳等<sup>[36]</sup>在水稻暴露在噻虫酰胺试验中也得到相似结果,水稻前期快速吸收噻虫酰胺后,达到稳定状态。本研究发现,三氟苯嘧啶、氯虫苯甲酰胺、噻虫酰胺这 3 种农药的主要富集器官为根系,  $TF < 1$ ,说明向上转运的能力较差,Fan 等<sup>[41]</sup>在玉米中关于



A1:  $\text{AgNO}_3$ ; A2:  $\text{HgCl}_2$ ; B1: 9-AC; B2: DIDS; B3: NPPB; C1:  $\text{Na}_3\text{VO}_4$ ; C2: 2,4-DNP; C3:  $\text{NaN}_3$ ; D1: 添加保鲜膜制造黑暗场景 (Film); D2: ABA。

\* 表示处理与对照之间在 0.05 水平上差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 6 添加抑制剂后水稻根系对噻唑酰胺的吸收及转运

Fig.6 Uptake and transfer of thifluzamide by rice roots after adding inhibitors

氯虫苯甲酰胺的研究也得到相似的结果,根为其主要富集器官;张硕佳等<sup>[36]</sup>关于水稻对多种杀菌剂的吸收与转运性能的研究发现,水稻地下部分噻唑酰胺的含量远远高于地上部分,  $TF < 1$ ,说明根系吸收的农药只有部分可以向上转运,在营养液和营养土的不同培养条件下也得到相似的结果。

利用通道抑制剂验证植物对农药的吸收转运所依赖的通道是学者常采用的研究手段,然而不同的植物可能有不同的吸收路径,同种类型的农药在被植物吸收时的路径也可能不同。Zhang 等<sup>[42]</sup>利用汞离子抑制水通道蛋白活性的研究中发现,玉米对抗生素的吸收受水通道蛋白的影响。汞离子通过共价修饰水通道蛋白的其他区域的晶体残基,造成水通道阻塞,从而抑制紫花苜蓿对水以及土霉素的吸收,由于汞离子自身的毒性作用,用同样为水通道蛋白抑制剂的银离子和甘油进行验证,发现土霉素的吸收与水通道无关<sup>[43]</sup>。由此得出在验证水通道在作物吸收转运农药的过程中,银离子比汞离子更有说服力,同时采用多种水通道抑制剂进行验证也更有说服力。植物中的水通道和阴离子通道是一种膜蛋白,可以根据膜蛋白上的孔和电荷来运输水和阴离子,由于  $\text{PFHxPA}$  (全氟己基磷酸) 相对分子质量小,

亲水性中等 ( $1 < \lg K_{ow} < 4$ ), 因此可以利用这些通道来运输<sup>[33]</sup>。在本研究中三氟苯嘧啶的吸收转运受到硝酸银的抑制,氯虫苯甲酰胺的吸收转运则与水通道蛋白无关;噻唑酰胺的吸收与水通道蛋白没有显著关联,但是转运却由于硝酸银的抑制而提升,说明水通道对于噻唑酰胺的转运提供了帮助。

9-AC、DIDS 被广泛用于验证植物吸收转运是否经过阴离子通道。在湿地植物泽泻中,阴离子通道抑制剂 9-AC 对 PFOS (全氟辛烷磺酸) 的抑制率达 11.1%, DIDS 对 PFOA (全氟辛酸) 的抑制率达 16.4%, NPPB 对 PFOS 和 PFOA 的抑制率分别为 27.6% 和 23.9%<sup>[24]</sup>。DIDS 和 9-AC 被用来验证大白菜对 DNB 的吸收,结果发现该过程不涉及阴离子通道, DIDS 和 9-AC 对 DEHP 的吸收抑率分别为 13.4% ~ 15.5% 和 4.0% ~ 9.5%, 该研究结果表明, DEHP 的吸收可能与水通道蛋白无关<sup>[44]</sup>。在本研究中,水稻对三氟苯嘧啶的吸收转运受到阴离子通道抑制剂 9-AC 的显著抑制,转运也受到离子通道抑制剂 DIDS 和 NPPB 的显著抑制;水稻对氯虫苯甲酰胺的吸收转运则完全不受阴离子通道抑制剂的影响。阴离子通道抑制剂对噻唑酰胺的影响则是抑制其被水稻吸收,但是却促进了其转运。

三氟苯嘧啶是同时含有阴离子和阳离子的介离子型农药,不同于其他两种农药,在吸收转运过程中可能涉及阳离子通道的参与,比如钾离子通道、钙离子通道,很多研究者也利用阳离子通道抑制剂进行验证试验。作为钾离子通道抑制剂,TEAC 和  $\text{Ba}^{2+}$  均显著抑制了钾离子的内流,凌桂芝等<sup>[45]</sup>发现添加 TEAC 后黑麦根尖中钾离子含量显著下降。钙离子对于花粉的萌发是必要元素,利用钙离子通道抑制剂 EGTA 处理花粉,发现显著抑制了花粉的萌发<sup>[46]</sup>,推测这是由于钙离子进入细胞内部需要通过钙离子通道。在本研究中,水稻对三氟苯嘧啶的吸收受部分阳离子通道尤其是  $\text{K}^+$  通道的影响。

Ju 等<sup>[32]</sup>在研究小麦植株对吡虫啉的吸收试验中发现添加  $\text{NaN}_3$  后,吡虫啉的根系吸收没有受到抑制,反而增加了 30%,说明根系吸收吡虫啉不存在能量依赖性。代谢抑制剂 2,4-DNP 显著抑制了紫花苜蓿根系对土霉素的吸收,这是因为土霉素进入紫花苜蓿根系是一个能量依赖过程,需要选择性结合位点<sup>[43]</sup>。小白菜根系对双性化合物四环素的吸收是依赖水通道蛋白和能量的主动吸收,抗生素进入小白菜根系细胞后经过木质部导管和水一起进入嫩枝,可能受水通道蛋白活性和蒸腾作用的影响<sup>[31]</sup>。玉米和苜蓿对抗生素的吸收都是主动吸收,需要水通道蛋白的参与。这可能是由于不同作物对相同农药的吸收存在不同的路径造成的。在本研究中,同样作为介离子化合物的三氟苯嘧啶,根系细胞吸收和向地上部转运需要能量的支持,说明主动吸收和蒸腾拉力起到作用,氯虫苯甲酰胺和噻呋酰胺的转运也都同样需要能量。

蒸腾抑制剂 ABA 显著抑制了氯虫苯甲酰胺在玉米中的转运,说明蒸腾作用促进了氯虫苯甲酰胺的顶端转运<sup>[41]</sup>,而在该研究中,蒸腾抑制剂 ABA 显著抑制了氯虫苯甲酰胺在水稻中的向上转运。对三氟苯嘧啶的向上转运没有作用,反而促进了噻呋酰胺的向上转运。说明氯虫苯甲酰胺的向上转运依靠蒸腾拉力的作用,而三氟苯嘧啶和噻呋酰胺的向上转运可能不受蒸腾拉力的作用。

本研究中,水通道、阴离子通道、阳离子通道均参与了介离子化合物的三氟苯嘧啶的吸收转运,根系跨膜吸收三氟苯嘧啶需要能量的支持,是一个主动吸收的过程,降低蒸腾速率可以显著减缓农药进入根系的速率,根系中吸收的农药不能随蒸腾流向上传输,吸收速率

受到抑制,从而导致茎叶中农药的积累也受到抑制。氯虫苯甲酰胺的吸收转运过程不需要水通道、阴离子通道的协助,蒸腾拉力是农药随蒸腾流向上转运的驱动力,噻呋酰胺的吸收是一个需要阴离子通道的主动吸收过程。总之,三氟苯嘧啶在水稻中的吸收转运是一个多通道相结合的主动吸收过程,氯虫苯甲酰胺的吸收不需要通道蛋白以及载体协助,但向上转运需要耗能以及蒸腾拉力的驱动。

## 参考文献:

- [1] DU S Q, HU X P, SHAO X S, et al. Novel trifluoromethyl sydnone derivatives: Design, synthesis and fungicidal activity[J]. Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters, 2021, 44: 128114.
- [2] YANG Y, CHANG J H, WANG D H, et al. Thifluzamide exposure induced neuro-endocrine disrupting effects in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Archives of Toxicology, 2021, 95(12): 3777-3786.
- [3] ZUBAIRI N A, TAKAIJUDIN H, YUSOF K W. A review on the mechanism removal of pesticides and heavy metal from agricultural runoff in treatment train[J]. International Journal of Environmental and Ecological Engineering, 2021, 15(2): 75-86.
- [4] MENG Z Y, CUI J J, LIU L, et al. Toxicity effects of chlorantraniliprole in zebrafish (*Danio rerio*) involving in liver function and metabolic phenotype[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2022, 187: 105194.
- [5] SUN Z G, LIU Y Q, XIAO S Z, et al. Identification of quantitative trait loci for resistance to rice black-streaked dwarf virus disease and small brown planthopper in rice[J]. Molecular Breeding, 2017, 37(6): 72.
- [6] YU Y L, ZHANG M T, HUO Y, et al. *Laodelphax striatellus* Atg8 facilitates rice stripe virus infection in an autophagy-independent manner[J]. Insect Science, 2021, 28(2): 315-329.
- [7] LEWIS K A, TZILIVAKIS J, WARNER D J, et al. An international database for pesticide risk assessments and management[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2016, 22(4): 1050-1064.
- [8] WEN S F, LIU C, WANG Y W, et al. Oxidative stress and DNA damage in earthworm (*Eisenia fetida*) induced by triflumezopyrim exposure[J]. Chemosphere, 2021, 264: 128499.
- [9] 于居龙, 周泳凯, 顾浩天, 等. 氯虫苯甲酰胺拌种处理对不同生育期水稻生化物质的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 289-294.
- [10] 于居龙, 张国, 缪康, 等. 氯虫苯甲酰胺拌种对稻纵卷叶螟的防治效果及安全性评价[J]. 农药学报, 2019, 21(3): 300-308.
- [11] DONG F S, XU J, LIU X G, et al. Determination of chlorantraniliprole residues in corn and soil by UPLC-ESI-MS/MS and its application to a pharmacokinetic study[J]. Chromatographia, 2011, 74: 399-406.
- [12] YU S M, WANG Z K, ZHANG L Y, et al. Possible changes in

- trade-off strategy in female lizards (*Eremias argus*) during hibernation following exposure to chlorantraniliprole: Impact on the HPG axis and the energy mobilization[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2022, 184: 105059.
- [13] WU Y Y, XI X C, TANG X, et al. Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(27): 7010-7015.
- [14] SONG C, ZHANG J W, HU G D, et al. Risk assessment of chlorantraniliprole pesticide use in rice-crab coculture systems in the basin of the lower reaches of the Yangtze River in China[J]. *Chemosphere*, 2019, 230: 440-448.
- [15] OMAR A R, EMAM DAKRORY A, ABDELAAL M M, et al. Impact of intrauterine exposure to the insecticide coragen on the developmental and genetic toxicity in female albino rats[J]. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2022, 9(1): 23-42.
- [16] YAO X F, LIU Y, LIU X, et al. Effects of thifluzamide on soil fungal microbial ecology[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 431: 128626.
- [17] YANG Y, LIU W X, MU X Y, et al. Biological response of zebrafish embryos after short-term exposure to thifluzamide[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 1-11.
- [18] YAO X F, ZHANG F W, QIAO Z H, et al. Toxicity of thifluzamide in earthworm (*Eisenia fetida*) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 188: 1-10.
- [19] GORLACH B M, SAGERVANSKI A, HENNINGSSEN J N, et al. Uptake, subcellular distribution, and translocation of foliar-applied phosphorus: Short-term effects on ion relations in deficient young maize plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 166: 677-688.
- [20] JONNALAGADDA P R, RAO M B P. Histopathological changes induced by specific pesticides on some tissues of the fresh water snail, *Bellamya dissimilis* Muller [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1996, 57(4): 648-654.
- [21] TOPAZ T, EGOZI R, SUARI Y, et al. Environmental risk dynamics of pesticides toxicity in a Mediterranean micro-estuary[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114941.
- [22] KIM K H, KABIR E, JAHAN S A. Exposure to pesticides and the associated human health effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 525-535.
- [23] 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.
- [24] WANG T T, YING G G, HE L Y, et al. Uptake mechanism, subcellular distribution, and uptake process of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonic acid by wetland plant *Alisma orientale* [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 733(378): 139383.
- [25] SNIGDHA M, HARIPRASAD P, VENKATESWARAN G. Mechanism of aflatoxin uptake in roots of intact groundnut (*Arachis hypogaea* L.) seedlings [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(12): 8502-8510.
- [26] DORDAS C, BROWN P H. Evidence for channel mediated transport of boric acid in squash (*Cucurbita pepo*) [J]. *Plant and Soil*, 2001, 235(1): 95-103.
- [27] DU X, ZHU Y G, LIU W J, et al. Uptake of mercury (Hg) by seedlings of rice (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture and interactions with arsenate uptake[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 54(1): 1-7.
- [28] LI R Y, AGO Y, LIU W J, et al. The rice aquaporin Iasi1 mediates uptake of methylated arsenic species[J]. *Plant Physiology*, 2009, 150(4): 2071-2080.
- [29] ROBERTS S K. Plasma membrane anion channels in higher plants and their putative functions in roots[J]. *New Phytologist*, 2006, 169(4): 647-666.
- [30] GONG X Y, WANG Y, PU J, et al. The environment behavior of organophosphate esters (OPEs) and di-esters in wheat (*Triticum aestivum* L.): Uptake mechanism, *in vivo* hydrolysis and subcellular distribution[J]. *Environment International*, 2020, 135: 105405.
- [31] YU X L, CHEN J H, LIU X X, et al. The mechanism of uptake and translocation of antibiotics by pak choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 151748.
- [32] JU C, LI X, HE S H, et al. Root uptake of imidacloprid and propiconazole is affected by root composition and soil characteristics[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(52): 15381-15389.
- [33] ZHOU J, YANG Z S, LIU Q, et al. Insights into uptake, translocation, and transformation mechanisms of perfluorophosphinates and perfluorophosphonates in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 54(1): 276-285.
- [34] RAZI K, MUNEEER S. Drought stress-induced physiological mechanisms, signaling pathways and molecular response of chloroplasts in common vegetable crops [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2021, 41(5): 669-691.
- [35] 马明勇, 吴生伟, 彭兆普. 三氟苯嘧啶种衣剂对褐飞虱控制效果研究[J]. *应用昆虫学报*, 2022, 59(5): 1143-1150.
- [36] 张硕佳, 王超杰, 徐博, 等. 五种杀菌剂在水稻上的吸收与传导性能研究[J]. *农药学报*, 2022, 24(4): 752-761.
- [37] CHEN X J, CUI H R, FAN S Q, et al. Systemicity of chlorantraniliprole in velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) [J]. *Journal of AOAC International*, 2013, 96(1): 1-6.
- [38] WU Q, ZHANG G, CHEN Y, et al. Seed dressing with triflumezopyrim controls brown planthopper populations by inhibiting feeding behavior, fecundity and enhancing rice plant resistance[J]. *Pest Management Science*, 2021, 77(6): 2870-2886.
- [39] LIU Q Y, LIU Y C, DONG F S, et al. Uptake kinetics and accumulation of pesticides in wheat (*Triticum aestivum* L.): Impact of chemical and plant properties[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 275: 116637.

- [40] JU C, DONG S X, ZHANG H C, et al. Subcellular distribution governing accumulation and translocation of pesticides in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Chemosphere, 2020, 248: 126024.
- [41] FAN T L, CHEN X J, ZHAO M, et al. Uptake, translocation and subcellular distribution of chlorantraniliprole and tetrachlorantraniliprole in maize [J]. Science of the Total Environment, 2021, 800: 149429.
- [42] ZHANG C, XUE J M, CHENG D M, et al. Uptake, translocation and distribution of three veterinary antibiotics in *Zea mays* L. [J]. Environmental Pollution, 2019, 250: 47-57.
- [43] KONG W D, ZHU Y G, LIANG Y C, et al. Uptake of oxytetracycline and its phytotoxicity to alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Environmental Pollution, 2007, 147(1): 187-193.
- [44] CHENG Z P, WANG Y, QIAO B T, et al. Insights into mechanisms involved in the uptake, translocation, and metabolism of phthalate esters in Chinese cabbage (*Brassica rapa* var. *chinensis*) [J]. Science of the Total Environment, 2021, 768: 144945.
- [45] 凌桂芝, 石保峰, 黄永禄, 等. 铝胁迫下黑麦根尖分泌有机酸和钾离子的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 893-898.
- [46] 尚忠林, 李建华, 李冰. 钙通道抑制剂对川百合花粉萌发的影响 [J]. 河北师范大学学报, 2004(5): 510-513, 518.

(责任编辑: 成纾寒)