

杨听雨, 杨邦保, 闫小龙, 等. 三种农药拌种后在土壤-水稻系统中的迁移和分布[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(2): 405-412.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.02.013

三种农药拌种后在土壤-水稻系统中的迁移和分布

杨听雨¹, 杨邦保², 闫小龙², 耿韧华², 万 群², 程金金², 余向阳²

(1. 江苏大学, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院, 江苏 南京 210014)

摘要: 农药拌种处理已成为农药精简使用的重要手段, 农药拌种后在土壤-作物系统中的迁移和分布会直接影响农药的利用率以及安全性, 但目前相关研究较少。本研究采用田间试验方法, 研究了氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺和三氟苯嘧啶 3 种农药拌种后在土壤-水稻系统的迁移和分布特征。结果表明, 种子拌农药播种后 15 d 时, 分别有 0.43%、0.84% 和 0.03% 的氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺和三氟苯嘧啶分布于水稻植株中。此时, 3 种农药的消减率分别达到了 39.39%、49.83% 和 97.21%, 表明在育苗阶段拌种的农药已有较大程度的损失。移栽后, 3 种农药在水稻植株、根际中的含量随时间延长不断降低。收获时, 水稻根际和稻谷中 3 种农药残留量均小于 0.01 mg/kg, 表明 3 种农药拌种处理对生态环境友好, 稻米食用的安全性较高。本研究结果对于提高拌种农药的利用率和保障其安全性有重要意义。

关键词: 农药拌种; 氯虫苯甲酰胺; 噻呋酰胺; 三氟苯嘧啶; 迁移; 水稻; 土壤

中图分类号: S481.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)02-0405-08

Migration and distribution of three pesticides in soil-rice system after seed dressing

YANG Ting-yu¹, YANG Bang-bao², YAN Xiao-long², GENG Ren-hua², WAN Qun², CHENG Jin-jin², YU Xiang-yang²

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Seed treatment has become an important means to simplify the use of pesticide. The migration and distribution of pesticides in soil-rice system after seed dressing can directly affect their utilization and safety, but there are few relevant studies at present. In this study, field experiments were conducted to reveal the migration and distribution characteristics of chlorantraniliprole, thifluzamide and triflumezopyrim in the soil-rice system after seed dressing. The results showed that 0.43%, 0.84% and 0.03% of chlorantraniliprole, thifluzamide and triflumezopyrim were distributed in the rice plants after 15 days of sowing, respectively. At this time, the reduction rates of the three pesticides reached 39.39%, 49.83% and 97.21%, respectively, indicating that the seed treating pesticides had been largely lost in the seedling stage. After transplanting, the contents of three pesticides in rice plants and rhizosphere decreased with time. At harvest, the residues of three pesticides in the rhizosphere and grain of rice under different treatments were all less than 0.01 mg/kg, indicating that the three pesticides

were ecologically friendly to the environment and the safety of rice consumption was high. The results are of great significance for improving the utilization rate of pesticides and ensuring their safety under seed treatment.

Key words: pesticide seed dressing; chlorantraniliprole; thifluzamide; triflumezopyrim; migration; rice; soil

收稿日期: 2022-12-16

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]

作者简介: 杨听雨(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为农产品产地农药环境行为。(E-mail) 921987352@qq.com

通讯作者: 程金金, (E-mail) 2547445116@qq.com; 余向阳, (E-mail) yuxy@jaas.ac.cn

使用农药拌种防治病虫害省工节本效果显著,已成为当前农药减量的重要途径^[1]。稻纵卷叶螟、稻飞虱和纹枯病是水稻生产中 3 种重要的病虫害,严重威胁水稻产量和品质^[2-3]。由于具有优良的内吸传导性、持效期长、防治效果好等优点,氯虫苯甲酰胺、三氟苯嘧啶和噻呋酰胺被发现可通过拌种包附于种子表面,然后通过水稻根系吸收传输到植株地上部实现对靶标病虫害如稻纵卷叶螟、稻飞虱和纹枯病等的持续防治^[4-6]。氯虫苯甲酰胺已在中国、美国、巴西、日本、印度、缅甸、墨西哥和阿根廷等多个国家登记和上市,被用于水稻、玉米、大豆和棉花等农作物的种子处理^[7]。通过中国农药信息网(<http://www.chinapesticide.org.cn/>)查询发现,噻呋酰胺作为拌种药剂目前在中国市场上主要用在水稻、花生和马铃薯等作物上。三氟苯嘧啶是新型介离子嘧啶酮类杀虫剂,具有作用机理新颖、与其他杀虫剂无交互抗性、持效期长、对病虫害天敌安全等诸多优点,2017 年 10% 三氟苯嘧啶悬浮剂在中国获准用于稻飞虱的防治^[8]。已有研究结果表明,氯虫苯甲酰胺、三氟苯嘧啶和噻呋酰胺通过种子处理方式可长效防控水稻生长前中期的稻纵卷叶螟、稻飞虱和纹枯病^[9]。然而,不少学者对拌种农药的环境风险产生了担忧^[10]。据测算,采用拌种处理,仅有 2%~20% 的新烟碱类农药可以被靶标作物吸收传输到植株地上部发挥防效^[11]。未被靶标作物吸收的农药可残留于土壤中、迁移至水体或被非靶标植物吸收进而产生潜在的环境风险^[12]。

氯虫苯甲酰胺、三氟苯嘧啶和噻呋酰胺在土壤中的吸附、解吸、降解、淋溶以及被植物吸收等迁移和分布方式已受到广泛关注^[13-15]。这 3 种农药的溶解度、正辛醇-水分配系数等性质差异较大(表 1),导致它们在淋溶特性、降解半衰期、植物吸收等方面也存在较大差异^[16-18]。氯虫苯甲酰胺、三氟苯嘧啶和噻呋酰胺随水稻种子进入土壤后,将同时向土壤、根系和茎叶等部位进行迁移。但关于拌种农药氯虫苯甲酰胺、三氟苯嘧啶和噻呋酰胺在土壤-水稻系统的迁移和分布特征目前仍缺乏系统研究。

本研究拟采用田间试验,探究不同用量氯虫苯甲酰胺、三氟苯嘧啶和噻呋酰胺拌种后,在土壤-水稻系统的迁移分布,为正确认识种子处理农药进入土壤后的迁移和分布,以及为提高拌种农药的利用率和保障环境安全提供指导。

表 1 三种农药的基本性质

Table 1 The basic properties of the three pesticides

农药	正辛醇-水分配系数($\lg K_{ow}$)	溶解度(mg/L)	相对分子质量
氯虫苯甲酰胺	2.86	0.88	483.15
噻呋酰胺	4.16	1.60	528.06
三氟苯嘧啶	1.23	230.00	398.34

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于江苏省镇江市农业科学院农业科技创新中心行香基地(119.311 1°E, 31.964 6°N),地势平坦,土壤肥力均匀,灌排能力良好。土壤类型为板浆白土,pH 值为 7.1,有机质含量为 17.8 g/kg,土壤全氮含量为 1.1 g/kg,速效磷含量为 34.5 mg/kg,速效钾含量为 71.4 mg/kg。

1.2 材料、试剂与仪器

供试水稻品种为江苏省丘陵地区粳稻主栽品种南粳 9108。水稻种植方式为早育秧,2021 年 6 月 5 日拌种、播种,2021 年 6 月 20 日人工移栽至大田。供试拌种药剂分别为美国杜邦公司生产的 20% 氯虫苯甲酰胺悬浮剂,美国陶氏益农公司生产的 24% 噻呋酰胺悬浮剂和美国杜邦公司生产的 10% 三氟苯嘧啶悬浮剂。

主要试剂:乙腈(德国默克公司产品)、无水硫酸镁(上海安谱科学仪器有限公司产品)、氯化钠(上海安谱科学仪器有限公司产品)、C18(上海安谱科学仪器有限公司产品)、PSA(上海安谱科学仪器有限公司产品)。

主要仪器:液相色谱-串联质谱仪(型号 SCIEX Triple Quad™ 5500+, 美国 AB Sciex 公司产品)、离心机(型号 Centrifuge 5804 R, 美国 Eppendorf 公司产品)、研磨机(型号 A 11, 德国 IKA 公司产品)、高速粉碎机(型号 FW 80, 天津泰斯特公司产品)、多管涡旋振荡器(型号 SCDEALL VX-III, 北京安简公司产品)。

1.3 试验设计

试验设置 9 个药剂处理和 1 个清水对照。9 个药剂处理分别为 3 种农药的低、中、高 3 种用量的拌种处理,低、中、高 3 种用量分别为 3 种农药推荐拌种剂量的最低、中间和最高值^[4-6]。每 1 kg 种子拌种所用氯虫苯甲酰胺设置为 500 mg、1 250 mg、2 000 mg,所用噻呋酰胺设置为 2 500

mg、5 000 mg、7 500 mg,所用三氟苯嘧啶设置为250 mg、750 mg、1 250 mg。每个处理重复3次,试验共设置30个田间小区,每个试验小区规格为5 m×8 m,小区之间用泥埂隔离,所有处理随机排列。

拌种方法采用人工湿拌法^[5]。拌种前将水稻种子置于网袋中,清水浸泡48 h后沥水24 h。根据试验设置称取农药,加入红色指示剂并加入去离子水,使药液和种子质量比为1:25。将沥干后的种子和药液加入加厚塑料自封袋中,快速翻动搅拌,待种子呈现均匀红色后平铺于纸上,阴干备用。

1.4 样品采集和测定

拌种后(6月5日)采用4分法采集种子样品,测定种壳和种胚中农药含量。拌种后当天播种,播种后15 d(移栽前),在苗床上采集5 cm×5 cm的带苗土样3块,带回实验室分离出种壳、植株和基质土壤样品,测定种壳、基质土壤、水稻根和水稻茎叶中农药含量。拌种后30 d、60 d、90 d和收获时,按S型采样法,每个小区采集水稻植株6株。用窄口铁锹将土壤及植株连根挖起带回实验室,挖深25 cm,采用抖根法收集根际,剪下水稻植株并用镊子收集根系样品,分别获得根际、茎叶、稻壳、糙米和根系样品,测定各样品中农药含量。

样品前处理:水稻根系和茎叶清洗干净并用吸水纸吸干表面水分后,加入液氮研磨粉碎备用。稻谷进行脱粒、研磨,制备成糙米和稻壳样品。种子样品冻干后,用尖头镊子将种壳和种胚分离,称量种壳和种胚的质量,用粉碎机分别将种壳和种胚粉碎备用。土壤样品冻干后,用粉碎机粉碎备用。根系和种壳样品称取0.20 g,加入2 ml水、5 ml色谱纯乙腈。茎叶称取2.00 g,加入10 ml水、10 ml色谱纯乙腈。基质土壤或根际取1.00 g,加入2 ml水、5 ml色谱纯乙腈。稻壳称取2.00 g,加入4 ml水、10 ml色谱纯乙腈。种胚和糙米取5.00 g,加入10 ml水、25 ml色谱纯乙腈。

操作方法为将样品准确称量至离心管中,先加入水涡旋震荡20 min润湿样品,然后加入色谱纯乙腈涡旋震荡提取30 min。按照NaCl:水=1:2的质量比加入NaCl,涡旋振荡5 min后3 500 r/min离心5 min使乙腈和水相分层。用移液枪移取1 ml上

清液于2 ml塑料离心管中,并加入0.150 g无水MgSO₄、0.025 g C18和0.025 g PSA,涡旋混匀30 s后于8 000 r/min离心2 min。上清液用0.22 μm有机系滤膜过滤,种壳样品上清液在测定前稀释100倍,待LC-MS/MS(liquid chromatography tandem mass spectrometry)测定。

色谱条件:Kinetex F5色谱柱(100.0 mm×3.0 mm,2.6 μm),流动相为0.1%甲酸水溶液(A)和乙腈(B),柱温为40℃,进样体积为2 μl,梯度洗脱条件见表2。

质谱条件:检测方法为多重反应检测,gas1(N₂)、gas2(N₂)压强为379 212 Pa,离子源温度为550℃。负电离模式下,喷雾电压为-4 500 V;正电离模式下,喷雾电压为5 500 V。MRM参数见表3。在0.01~0.50 mg/L,3种农药的含量与其峰面积具有良好的线性关系,相关系数均高于0.995 2。基质土壤、根际、稻壳、种胚和糙米中3种农药的最低检测含量均为0.01 mg/kg,根系和种壳中3种农药的最低检测含量为0.25 mg/kg。每种拌种用农药添加量设为0.05 mg/kg、0.10 mg/kg和0.50 mg/kg,分别添加到稻壳、糙米、根、茎叶和土壤中,3种农药的添加回收率分别为:氯虫苯甲酰胺86%~98%、噻呋酰胺84%~97%、三氟苯嘧啶84%~97%(表4),满足农药残留检测要求。

表2 流动相梯度洗脱条件

Table 2 Gradient elution conditions of mobile phase

时间 (min)	流速 (ml/min)	流动相 A (%)	流动相 B (%)
0	0.3	80	20
1.0	0.3	80	20
3.0	0.3	15	85
5.0	0.3	0	100
7.1	0.3	80	20
8.0	0.3	80	20

1.5 数据分析

农药由根向茎叶转移系数=茎叶中农药含量/根中农药含量,其值越大,表明农药越容易从植物根向茎叶迁移。

试验数据采用Excel 2019和SPSS 18.0进行统计分析和绘图。差异显著性检验采用单因素方差分析法进行,显著性水平为P<0.05。

表 3 多反应监测 (MRM) 参数

Table 3 Multiple reaction monitoring (MRM) parameters

化合物	保留时间 (min)	定量离子对	定性离子对	离子对碰撞能 (定量/定性)(V)	碎裂电压 (V)
氯虫苯甲酰胺	4.8	484.0/453.0	484.0/284.1	25/21	105
噻呋酰胺	5.2	526.7/125.0	526.7/293.9	-71/-31	-99
三氟苯嘧啶	4.5	399.1/278.1	399.1/306.3	39/30	140

表 4 三种农药的添加回收率

Table 4 The recoveries of the three pesticides

农药	基质	添加量 0.05 mg/kg 回收率(%)	添加量 0.10 mg/kg 回收率(%)	添加量 0.50 mg/kg 回收率(%)
氯虫苯甲酰胺	种壳	86±0.3	93±0.6	97±1.5
	种胚	88±1.4	94±0.7	95±0.3
	根	90±1.8	92±1.1	96±3.2
	茎叶	85±0.4	94±0.5	97±1.7
	土壤	88±0.6	96±0.4	98±0.6
噻呋酰胺	种壳	84±0.5	92±0.3	95±0.6
	种胚	85±1.3	93±0.7	95±0.8
	根	84±2.1	91±1.0	97±4.7
	茎叶	83±1.3	96±0.4	96±1.1
	土壤	85±0.8	92±0.5	97±2.5
三氟苯嘧啶	种壳	85±0.6	94±0.6	96±0.3
	种胚	84±1.6	93±1.2	95±2.9
	根	91±2.3	94±0.5	96±4.6
	茎叶	85±0.4	93±0.7	96±1.8
	土壤	87±0.2	93±0.3	97±0.2

2 结果与分析

2.1 拌种后农药在种壳和种胚上的分布

农药按预设用量拌种后,种子中 3 种农药的实测含量与拌种用量的关系如图 1 所示。其中,500 mg/kg、1 250 mg/kg和2 000 mg/kg用量的氯虫苯甲酰胺拌种后,其在种子上的实测含量分别为 400 mg/kg、1 140 mg/kg 和 1 840 mg/kg;2 500 mg/kg、5 000 mg/kg和7 500 mg/kg用量的噻呋酰胺拌种后,其在种子上的实测含量分别为2 010 mg/kg、4 470 mg/kg 和 7 000 mg/kg; 250 mg/kg、750 mg/kg 和 1 250 mg/kg用量的三氟苯嘧啶拌种后,其在种子上的实测含量分别为 200 mg/kg、660 mg/kg 和 1 130 mg/kg,由于拌种器具内壁粘附,导致种子上药剂实测含量低于拌种用量。随着拌种用量的增加,种子中 3 种农药实测含量与拌种用量的比值不断提高,种子中 3 种农药的实测含量均达到拌种用量的 80.00%以上。

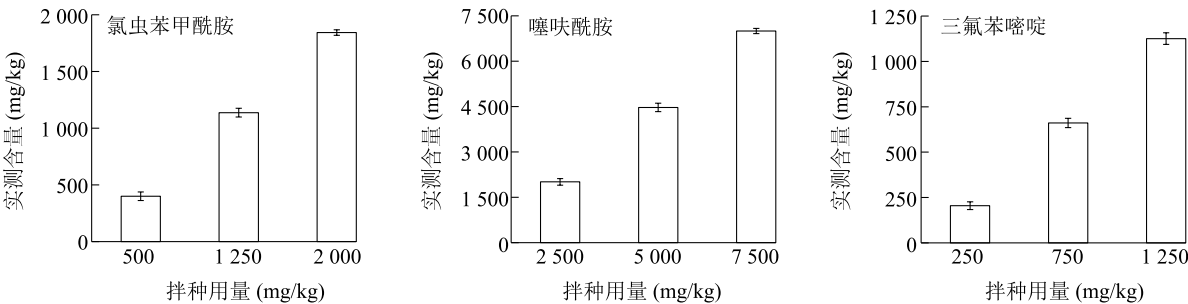


图 1 三种农药的拌种用量与种子中实测含量

Fig.1 The dosage of three pesticides and the measured content in seed

3 种农药拌种后种壳和种胚中农药含量比见图 2。结果表明,拌种后分别有 93.12%的氯虫苯甲酰胺、91.75%的噻呋酰胺和 96.69%的三氟苯嘧啶分

布于种壳中,因此种壳是拌种农药的主要载体。

2.2 育苗期种壳中农药含量动态

水稻种子在育苗盘中发芽出苗至待移栽时(播

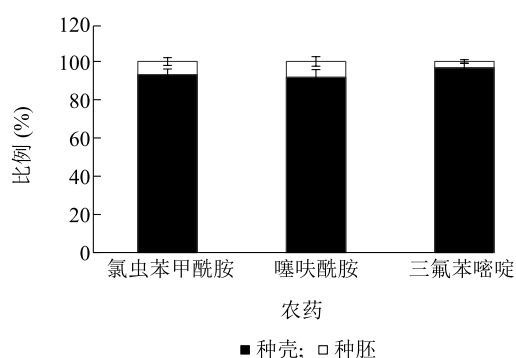


图2 拌种后三种农药在种壳和种胚中的分布

Fig.2 Distribution ratio of three pesticides in seed shell and seed embryo after seed treatment

种后 15 d), 种壳中农药含量相比于播种时大幅降低(图 3)。种壳中氯虫苯甲酰胺含量分别由 2 440 mg/kg、6 930 mg/kg 和 1 1240 mg/kg 降低至 1 310 mg/kg、3 230 mg/kg 和 3 740 mg/kg, 下降幅度分别达到 46.31%、53.39% 和 66.73%。种壳中噻呋酰胺含量分别由 12 090 mg/kg、26 870 mg/kg 和 42 050 mg/kg 降低至 3 820 mg/kg、7 910 mg/kg 和 9 170 mg/kg, 下降幅度分别达到 68.40%、70.56% 和 78.19%。种壳中三氟苯嘧啶含量分别由 1 300 mg/kg、4 180 mg/kg 和 7 130 mg/kg 降低至 330 mg/kg、570 mg/kg 和 710 mg/kg, 下降幅度分别达到 74.62%、86.36% 和 90.04%。种壳中 3 种农药的含量下降幅度表现为三氟苯嘧啶>噻呋酰胺>氯虫苯甲酰胺。对比播种后 15 d 时种壳中农药的含量可以发现, 不同用量农药拌种处理的种壳中噻呋酰胺和三氟苯嘧啶含量已无显著差异, 低用量氯虫苯甲酰胺拌种处理的种壳中氯虫苯甲酰胺含量显著低于中、高用量拌种处理。

2.3 三种农药在水稻根际、根及茎叶中的分布

种壳中的农药与育苗土直接接触进而向其中迁移。播种后 15 d 时, 育苗土中 3 种农药含量均大幅增加(图 4)。3 种农药低、中、高用量拌种处理播种后 15 d 时, 育苗土中氯虫苯甲酰胺含量分别为 3.51 mg/kg、12.43 mg/kg 和 31.52 mg/kg, 噻呋酰胺含量分别为 35.52 mg/kg、62.99 mg/kg 和 107.7 mg/kg, 三氟苯嘧啶含量分别为 1.04 mg/kg、2.15 mg/kg 和 3.58 mg/kg。水稻秧苗移栽至大田后, 根际中农药含量大幅降低。移栽后 15 d 时(播种后 30 d), 根际中氯虫苯甲酰胺含量为 0.06~0.07 mg/kg, 噻呋酰

胺含量为 0.17~0.32 mg/kg, 三氟苯嘧啶含量为 0.01~0.02 mg/kg。

水稻根和茎叶中 3 种农药含量动态与根际中 3 种农药含量动态一致(图 5、图 6), 均表现为随着播种后时间延长, 农药含量迅速降低并长时间保持在较低的水平, 且不同处理间无明显差异。播种后 15 d 时, 3 种用量的氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺和三氟苯嘧啶由根系向茎叶转移的转移系数分别为 0.09~0.16、0.08~0.13 和 0.93~2.53, 表明三氟苯嘧啶在水稻植株中由根系向茎叶的迁移能力远高于噻呋酰胺和氯虫苯甲酰胺。

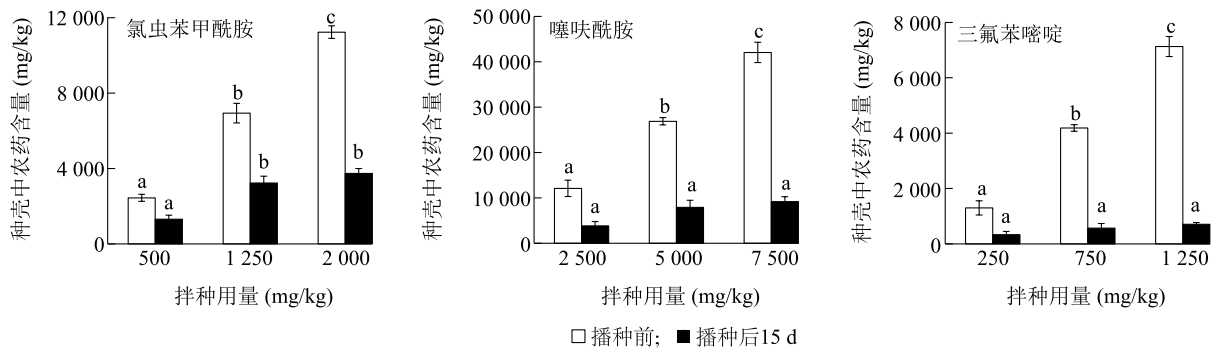
播种后, 分布于种壳上的农药除了向根际育苗土、根和茎叶中迁移, 还会通过淋溶、降解等方式消减。由图 7 可知, 播种后 15 d 时, 氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺和三氟苯嘧啶分别消减了 39.39%、49.83% 和 97.21%。氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺和三氟苯嘧啶仅分别有 0.43%、0.84% 和 0.03% 分布于水稻根和茎叶中。此外, 有 60.17% 的氯虫苯甲酰胺和 49.34% 的噻呋酰胺分布于种壳和育苗土中, 而仅有 2.76% 的三氟苯嘧啶分布于种壳和育苗土中。由于农药性质的不同, 导致了不同农药的去向出现了较大差异。

2.4 三种农药在土壤和稻谷中的最终残留量

不同用量的 3 种农药拌种处理后, 水稻收获时根际、糙米和稻壳中 3 种农药残留量均低于最低检测含量(0.01 mg/kg)。《食品安全国家标准食品中农药最大残留限量》(GB 2763-2021) 规定, 氯虫苯甲酰胺和噻呋酰胺在糙米中的最大残留限量分别为 0.50 mg/kg 和 3.00 mg/kg。美国和日本发布的大米中三氟苯嘧啶的最大残留限量为 0.40 mg/kg 和 0.01 mg/kg^[14]。因此, 在本研究设置的拌种用量下, 3 种农药通过拌种方式施用, 稻米食用安全性高。

3 讨论

本研究中, 播种后 15 d, 氯虫苯甲酰胺、噻呋酰胺和三氟苯嘧啶通过降解、淋溶等途径消减的比例分别为 39.39%、49.83% 和 97.21%, 不同农药之间差异较大。农药性质如溶解度、正辛醇-水分配系数等是影响农药在环境中迁移分布的重要因素^[19]。溶解度越大、正辛醇-水分配系数越小的农药, 其水溶性越强, 在土壤中的吸附程度越小, 越容易淋溶、



同一时间不同拌种用量间不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图 3 三种农药在种壳上的残留动态

Fig.3 Residual dynamics of three pesticides on seed shells

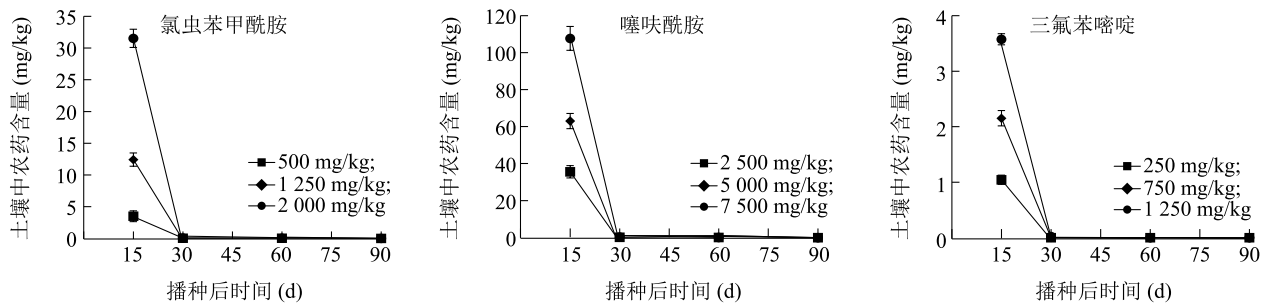


图 4 水稻根际土壤三种农药含量的动态

Fig.4 Dynamics of the contents of three pesticides in rice rhizosphere soil

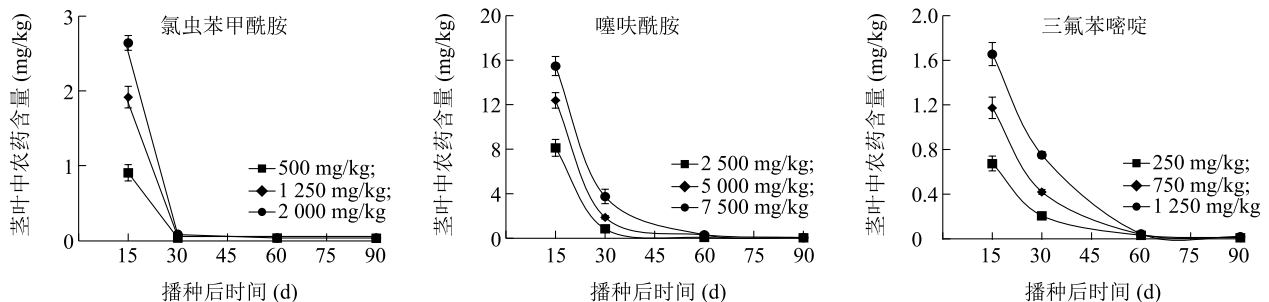


图 5 水稻茎叶中三种农药含量的动态

Fig.5 Dynamics of the contents of three pesticides in rice stems and leaves

迁移和被土壤微生物降解^[20-21]。本研究的 3 种农药中,三氟苯嘧啶的溶解度(230.00 mg/L)最高、正辛醇-水分配系数(1.23)最低。氯虫苯甲酰胺和噻呋酰胺的溶解度(0.88 mg/L和 1.60 mg/L)远低于三氟苯嘧啶,而正辛醇-水分配系数(2.86 和 4.16)远高于三氟苯嘧啶。因此,由于溶解度和正辛醇-水分配系数的差异,造成了种子中的三氟苯嘧啶更易通过淋溶迁移和被土壤微生物降解等途径消减。

据文献报道,氯虫苯甲酰胺在玉米植株中的转移系数为0.024~0.108^[22],三氟苯嘧啶在水稻植株

中的转移系数为0.283~1.190^[18]。本研究中氯虫苯甲酰胺和三氟苯嘧啶由根系向茎叶转移的转移系数分别为0.090~0.160 和0.930~2.530,与文献报道的较为一致。水稻植株根系中农药向茎叶传导的难易程度受农药理化性质的影响。已有研究结果表明,疏水性越弱、水溶性越大、相对分子质量越小的农药越容易由植物根系向茎叶转移^[23-24]。本研究发现,三氟苯嘧啶由根系向茎叶转移能力远高于噻呋酰胺和氯虫苯甲酰胺,其原因可能是三氟苯嘧啶疏水性最弱、水溶性最大、相对分子质量最小。

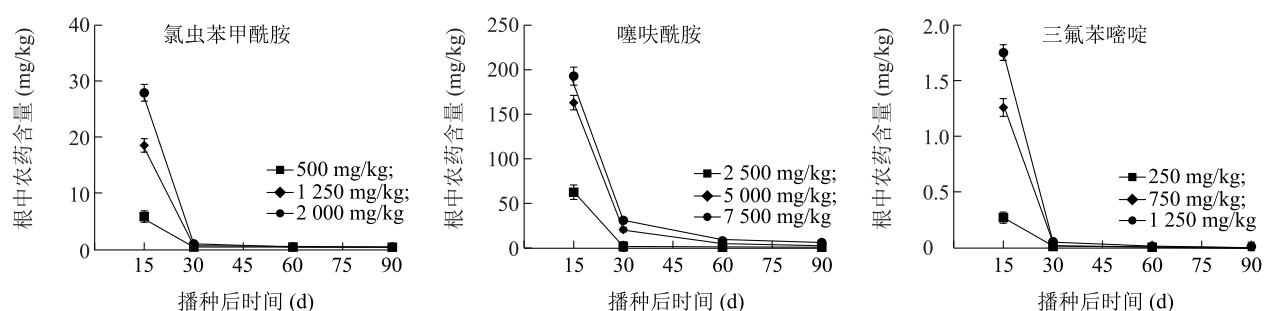


图6 水稻根中三种农药含量的动态

Fig.6 Dynamics of three pesticides in rice root

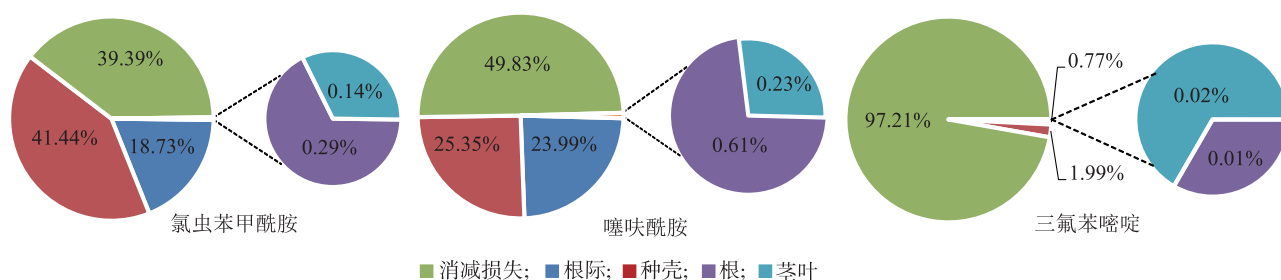


图7 播种后 15 d 时三种农药在土壤-水稻系统中的分布

Fig.7 Distribution of three pesticides in soil-rice system at 15 days after seeding

拌种后, 分别有 93.12% 的氯虫苯甲酰胺、91.75% 的噻虫酰胺和 96.69% 的三氟苯嘧啶分布于种壳中, 表明种壳是拌种农药的重要载体。此外, 水稻种子在育苗盘中生长至待移栽时(播种后 15 d), 种壳中 3 种农药含量均大幅降低, 且拌种时农药用量越大农药流失量越多。以上研究结果表明, 减少种壳中农药的快速流失是提高拌种农药利用率的关键环节之一。据测算, 使用新烟碱类农药拌种处理, 有 2%~20% 的新烟碱类农药可以被靶标作物根系吸收传导到植株地上部发挥防效^[11]。本研究中, 播种后 15 d, 氯虫苯甲酰胺、噻虫酰胺和三氟苯嘧啶在水稻茎叶中的分布比例分别为 0.14%、0.23% 和 0.02%。此阶段, 有 60.46%、49.95% 和 2.77% 的氯虫苯甲酰胺、噻虫酰胺和三氟苯嘧啶分布于种壳、育苗土和水稻根系中, 该部分农药可进一步通过水稻根系的吸收作用, 向水稻植株的茎叶部迁移, 对靶标病虫害产生防效^[25]。因此, 农药拌种处理时, 至少有 0.14% 的氯虫苯甲酰胺、0.23% 的噻虫酰胺和 0.02% 的三氟苯嘧啶可以被水稻根系吸收传导到植株地上部发挥作用。本研究 3 种农药在水稻茎叶中的分布比例低于文献报道的数据^[11], 其原因可能为

文献报道的数据主要来源于旱地作物。而本研究的对象是水稻, 在其育苗和生长阶段, 农药随水流失量大。

多地残留试验结果表明, 喷施 1~3 次氯虫苯甲酰胺、噻虫酰胺和三氟苯嘧啶防治水稻病虫害, 3 种农药在土壤中的最终残留分别为 ND(未检出)~0.217 mg/kg^[16]、ND(未检出)~0.322 mg/kg^[26] 和 0.010~0.037 mg/kg^[14]。本研究中水稻收获时, 3 种农药在根际中的最终残留量均小于 0.01 mg/kg, 土壤中的残留量较低。但对于其累积污染风险还需设置多年田间试验进行深入评估。此外, 稻谷农药残留检测结果表明, 收获的糙米和稻壳中 3 种农药残留量均小于 0.01 mg/kg, 糙米中农药残留量远低于中国、美国及日本的限量标准。因此, 采用氯虫苯甲酰胺、噻虫酰胺和三氟苯嘧啶在水稻生产中进行拌种处理, 土壤和稻谷产品的安全性都较高。

参考文献:

- [1] VOJVODIC M, BAZOK R. Future of insecticide seed treatment [J]. Sustainability, 2021, 13(16): 1-15.
- [2] 车琳, 蒋沁宏, 王也, 等. 我国水稻五大产区虫害发生及防

- 控情况差异的比较分析[J]. 植物保护, 2022, 48(3): 233-241.
- [3] 何东兵, 朱友理, 吴佳文, 等. 不同药剂拌种对水稻穗前病虫害的控制效果[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(4): 601-604.
- [4] 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]. 农药学学报, 2019, 21(3): 300-308.
- [5] 姚克兵, 于居龙, 张国, 等. 噻呋酰胺不同种子处理方式对水稻纹枯病的控制效应及其安全性评价[J]. 农学学报, 2021, 11(7): 13-17.
- [6] 张国, 于居龙, 束兆林, 等. 三氟苯嘧啶不同种子处理方式对稻飞虱的控制效应[J]. 环境昆虫学报, 2021, 43(2): 507-515.
- [7] 曹明坤. 我国杀虫剂产业发展应用现状与方略[J]. 安徽化工, 2022, 48(3): 1-10.
- [8] 徐志英, 徐顺飞, 陈小军. 三氟苯嘧啶的研究现状和展望[J]. 扬州职业大学学报, 2019, 23(4): 45-48, 59.
- [9] 朱凤, 程金金, 张国, 等. 江苏水稻生产全程简化绿色防控策略研究与应用[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(1): 94-101.
- [10] ROY C L, COY P L. Wildlife consumption of neonicotinoid-treated seeds at simulated seed spills[J]. Environmental Research, 2021, 190: 109830.
- [11] SANCHEZ-BAYO F. The trouble with neonicotinoids[J]. Science, 2014, 346(6211): 806-807.
- [12] RADOLINSKI J, WU J X, XIA K, et al. Transport of a neonicotinoid pesticide, thiamethoxam, from artificial seed coatings[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 561-568.
- [13] 施海燕, 亓育杰, 束兆林, 等. 噻呋酰胺在土壤中的降解、吸附-解吸及移动特性研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1806-1812.
- [14] 郭亚军, 赵明, 陈小军, 等. 三氟苯嘧啶在稻田中的降解动态和残留分析[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 71-75, 80.
- [15] SAHU M, ADAK T, PATIL N B, et al. Dissipation of chlorantraniliprole in contrasting soils and its effect on soil microbes and enzymes[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 180(9): 288-294.
- [16] 段劲生, 王梅, 董旭, 等. 氯虫苯甲酰胺在水稻及稻田环境中的残留动态[J]. 植物保护, 2016, 42(1): 93-98.
- [17] 曹俊丽, 刘新刚, 董丰收, 等. 噻呋酰胺在稻田中的残留及消解动态[J]. 农药学学报, 2017, 19(1): 84-92.
- [18] FAN T, CHEN X, XU Z, et al. Uptake and translocation of triflumezopyrim in rice plants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(27): 7086-7092.
- [19] 程浩森, 成凌, 朱腾义, 等. 新烟碱类农药在土壤中环境行为的研究进展[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 736-747.
- [20] 孔德洋, 许静, 韩志华, 等. 七种农药在3种不同类型土壤中的吸附及淋溶特性[J]. 农药学学报, 2012, 14(5): 545-550.
- [21] KUMAR S, KAUSHIK G, DAR M A, et al. Microbial degradation of organophosphate pesticides: a review[J]. Pedosphere, 2018, 28(2): 190-208.
- [22] FAN T L, CHEN X J, ZHAO M. Uptake, translocation and subcellular distribution of chlorantraniliprole and tetrachlorantraniliprole in maize[J]. Science of the Total Environment, 2021, 800: 149429.
- [23] WANG F Y, LI X, YU S M, et al. Chemical factors affecting uptake and translocation of six pesticides in soil by maize (*Zea mays* L.)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 405: 124269.
- [24] LIU J N, CHENG J J, ZHOU C L, et al. Uptake kinetics and subcellular distribution of three classes of typical pesticides in rice plants[J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159826.
- [25] 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: 2870-2886.
- [26] 段劲生, 褚玥, 孙海滨, 等. 噻呋酰胺在水稻及稻田环境中的残留及消解动态研究[J]. 农药科学与管理, 2017, 38(3): 38-44.

(责任编辑: 成纾寒)