

# 酿酒高粱丸粒化包衣对害虫防效评价

丁翊东<sup>1\*</sup>, 金倩<sup>1\*</sup>, 于居龙<sup>2</sup>, 潘明泉<sup>1</sup>, 田胜营<sup>1</sup>,  
于成功<sup>1</sup>, 王卫军<sup>1</sup>, 赖上坤<sup>1\*\*</sup>

(1. 江苏省农业科学院宿迁农科所, 江苏宿迁 223800; 2. 江苏丘陵地区镇江农业科学研究所, 江苏句容 212400)

**摘要:** 为探究酿酒高粱种子丸粒化包衣后对主要害虫的防治效果, 本研究通过室内和田间试验, 对比分析了丸粒化包衣和常规拌种处理下, 酿酒高粱不同生育期氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪在植株体叶片中药剂含量、生物物质变化及对螟虫和蚜虫的防治效果。结果表明, 丸粒化包衣处理在酿酒高粱生长前中期叶片中具有浓度药剂, 但低于常规拌种处理; 高粱不同生育期内药剂丸粒化包衣处理的可溶性糖和类黄酮含量均显著高于常规拌种处理; 高粱孕穗期, 药剂丸粒化包衣对螟虫和蚜虫的防效分别为 95.89%和 85.40%, 与常规化学防治无显著性差异 ( $P>0.05$ ); 植株叶片中残留药剂及抗虫次生代谢物质协同参与是药剂丸粒化包衣对靶标害虫长效控制的主要原因。因此, 种子丸粒化包衣后可长效控制酿酒高粱主要害虫, 减少酿酒高粱生长前中期虫害防治 1~2 次或不施化学农药, 为酿酒高粱病虫害防治和田间栽培管理提供了新思路。

**关键词:** 种子丸粒化; 农药残留; 次生代谢物; 酿酒高粱

中图分类号: Q968.1;S433 文献标识码: A

## Evaluation on pest control effect of seed pelletized coating brewed sorghum

DING Yi-Dong<sup>1\*</sup>, JIN Qian<sup>1\*</sup>, YU Ju-Long<sup>2</sup>, PAN Ming-Quan<sup>1</sup>, TIAN Sheng-Ying<sup>1</sup>, YU Cheng-Gong<sup>1</sup>, WANG Wei-Jun<sup>1</sup>, LAI Shang-Kun<sup>1\*\*</sup> (1. Suqian Institute of Agricultural Science, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Suqian 223800, Jiangsu Province, China; 2. Zhenjiang Institute of Agricultural Sciences of the Ning-Zhen Hilly District, Jurong 212400, Jiangsu Province, China)

**Abstract:** To evaluate the control effect of seed pelletized coating of insecticide on main pests, we compared the contents of chlorantraniliprole and thiamethoxam in the leaves of plants, the changes of chemical composition as well as the control effect of main pests (borer and *Melanaphis sacchari*) during different growth stages of brewed Sorghum under seed pelletized coating and conventional seed coating treatments through the laboratory test and field experiment. The results showed that the concentration of pesticide content in leaves of seed pelletized coating of insecticide treatment were lower than conventional seed coating treatment during prometaphase of brewed sorghum growth; compared with conventional seed coating treatment, the contents of

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金 (CX(22)3193); 江苏省重点研发计划 (现代农业) 资助项目 (BE2023345); 江苏省 333 人才工程项目; “宿迁英才”群英计划青年项目

\*共同第一作者: 丁翊东, 男, 1997 年生, 硕士, 研究方向为作物栽培, E-mail: dyd0606888@163.com; 金倩, 女, 1987 年生, 博士, 研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: jinhongyu2001@163.com

\*\*通讯作者 Author for correspondence: 赖上坤, 博士, 副研究员, 研究方向为作物育种与栽培技术, E-mail: yzslk@126.com

收稿日期 Received: 2023-11-01; 接受日期 Accepted: 2024-04-23

soluble sugar and flavonoid contents of seed pelletized coating treatment were significantly higher at each stages; at booting stage, the control effects of seed pelletized coating on borer moth and *Melanaphis sacchari* were 95.89% and 85.40% respectively, and there was no significant difference between them and the conventional chemical control treatment ( $P>0.05$ ); the synergistic participation of residual pesticides and secondary metabolites in leaves were the main reason for the long-term control of target pests by seed pelletized coating treatment. Therefore, seed pelletized coating of insecticide can bring long-term control over main pests and reduce 1 to 2 times or even do not apply chemical pesticides during the early and middle stages in the growth of brewed sorghum. This study will provide new insight for pest control and field cultivation management in the production of brewed sorghum.

**Key words:** Seed pelleting; pesticide residue; secondary metabolites; brewed sorghum

高粱 *Sorghum bicolor* (L.) Moench 是一种生物能源作物, 在维持区域农业生态系统服务功能和保障全球粮食安全等方面发挥着重要作用 (Fulton-smith and Cotrufo, 2019; 李顺国等, 2021; Mansour *et al.*, 2021)。高粱通过发达的根系向土壤投入大量植物源碳而促进土壤有机质的积累, 提升农田土壤碳汇功能 (Schittenhelm and Schroetter, 2013; Cotrufo *et al.*, 2015)。同时, 高粱作为食品、饲料和酿造等产业的原材料, 根据用途可分为食用型、饲用型和酿酒型, 是功能性食品来源的重要渠道 (邹剑秋等, 2020)。为满足酒企对高品质高粱的需求, 酿酒高粱被选育并被广泛种植, 但在种植过程中易受多种虫害影响, 如玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 在抽穗期和孕穗期危害叶片和茎秆导致茎秆折断或作物倒伏, 桃蛀螟 *Dichocrocis punctiferalis* 在抽穗期取食穗部引起籽粒灌浆受阻、千粒重下降; 高粱蚜虫 *Melanaphis sacchari* 则主要以成虫和若虫吸食叶片、茎秆、穗部等营养体的汁液, 引起植株枯萎。

目前酿酒高粱生产过程对虫害的防治主要依赖于化学农药, 但其对多种化学农药敏感, 使用不当容易造成药害。同时酿酒高粱多为紧穗型品种利于害虫躲藏, 药剂较难作用于害虫, 导致利用率低进而增加防治次数, 农药在籽粒中残留风险增加, 有研究表明农药防治虫害的酿酒高粱样品药剂残留超标率高达 41.67% (王金萍等, 2020)。因此, 亟需寻找化学农药替代技术, 以保证食品和生态安全。

种子丸粒化包衣是一种通过机械加工方式将特定物料(如植物生长调节剂、药剂或肥料等)与种子有机结合在一起, 形成质地均一、颗粒饱满、表面光滑的丸粒化种子技术 (Pedrini *et al.*, 2017)。这一手段既可满足当前机械化播种需求又能提升种苗品质, 在推动农业现代化发展方面发挥着独特作用 (Gilbert *et al.*, 2009)。有研究指出, 丸粒化中活性物质的加入对植物生理特性会产生一定影响 (熊腾飞等, 2022; 陈云飞等, 2023)。熊腾飞等 (2022) 发现种子丸粒化中加入植物生长调节剂可促进菜心苗的发芽率和根的伸长; 陈云飞等 (2023) 发现丸粒化中 ABT3、调环酸钙和  $\text{CaO}_2$  的加入能够有效缓解低氧胁迫, 促进水稻种子萌发和幼苗生长。尽管种子丸粒化技术已在高粱中得到一定的应用, 但多数研究重在解决高粱小种子的播种问题及丸粒化对高粱出苗率和幼苗生理特性的影响 (樊娟等, 2021; 张民等, 2023),

针对酿酒高粱种子丸粒化后药剂消解、次生代谢物变化及对主要虫害防效的影响尚不明确。

本研究通过比较酿酒高粱种子丸粒化包衣、常规拌种处理、正常化学防治和裸种 4 种方式下，酿酒高粱不同生育期叶片中氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪残留量、叶片中次生代谢物质含量以及对酿酒高粱常见害虫的防治效果，探究丸粒化包衣技术在酿酒高粱主要虫害防控中的可行性，为酿酒高粱的绿色生产和科学管理提供理论参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

本试验酿酒高粱裸种选用“洋绵 9 号”（原名“迁酿（梁）1 号”，由江苏省农业科学院宿迁农科所与江苏洋河酒厂股份有限公司联合定向选育的酿酒专用糯高粱新品种）。丸粒化包衣过程中添加的活性物质为：200 g/L 氯虫苯甲酰胺悬浮剂（SC）（美国富美实公司）；和 30%噻虫嗪悬浮剂 SC（青岛金正农药有限公司）。丸粒化填充惰性物质为：粘土、凹凸棒土（河北泓耀矿产品加工有限公司）；色浆（杭州宏景涂料装饰材料）；羧甲基纤维素钠（河南万邦化工科技有限公司）。

### 1.2 试验处理

本试验共计设置 4 个处理，丸粒化包衣处理（T1）、常规拌种处理（T2）、正常化学防治处理（T3）、裸种对照处理（CK）。具体处理如下：

（1）丸粒化包衣处理 T1：利用青岛润华农业科技有限公司生产的 RH-325 型丸粒化机器进行丸化处理，称取 200 g 精选后的高粱裸种加入机器中，将粘土和凹凸棒土的质量比为 2：3 进行混拌均匀作为丸粒化粉使用。将 200 g 丸粒化粉加入加粉仓中，配制 1%羧甲基纤维素作为粘着剂，设置机器转速为 120 r/min，水泵进水速度为 15 mL/min，待加粉仓中丸化粉用毕，关闭进水闸门，将 6 mL 200g/L 氯虫苯甲酰胺 SC 和 6.67 mL 30%噻虫嗪 SC 混合均匀缓慢加入机器中，待药剂均匀附着后，再往加粉仓中加入 600 g 丸粒化粉，按照上述条件继续丸化包衣。丸化包衣后，加入色浆使得种子均匀着色，再将丸粒化种子放入烘干机 40℃ 烘干 30 min。

（2）常规拌种处理 T2：采用于居龙等（2020）的拌种方法，称取 200 g 精选后的高粱裸种置入 30 cm×60 cm 加厚自封袋中，称取 6 mL 200g/L 氯虫苯甲酰胺 SC 和 6.67 mL 30%噻虫嗪 SC，加水稀释至 20 mL，混合均匀倒入自封袋中，上下晃动直至药剂均匀附着在种子上，阴干备用。

（3）正常化学防治处理 T3：对种子不进行包衣处理，仅采取茎叶喷雾化学防治，全生育期共计用药 5 次，用药情况详见表 1。

（4）裸种对照处理 CK：播种后不进行任何药剂防治。

表 1 正常化学防治用药次数、时间、药剂及用量

Table 1 The application frequency, time, pesticide and dosage of normal chemical control

施药次数	施药时间	施用药剂	制剂用量
------	------	------	------

Frequency	Time	Pesticide	Dosage of pesticide
第 1 次 The first time	苗期	25%啞菌酯 25% Kresoxim-methyl	375 mL/ ha
	Seedling stage	0.5%甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 0.5% Emamectin Benzoate	450 mL / ha
第 2 次 The second time	拔节期	10%吡虫啉 10% Lmidacloprid	225 g/ ha
	Jointing stage	20%氯虫苯甲酰胺 20% Chlorantraniliprole 25%咪鲜胺 25% Prochloraz	120 mL / ha 375 mL/ ha
第 3 次 The third time	大喇叭口期	21%噻虫嗪 21% Thiamethoxam	120 mL / ha
	Booting stage	20%氯虫苯甲酰胺 20% Chlorantraniliprole 12.5%苯醚甲环唑 12.5% Difenconazole	120 mL / ha 675 mL / ha
第 4 次 The fourth time	始穗期	20%啞菌酯 20% Kresoxim-methyl 21%噻虫嗪 21% Thiamethoxam	600 mL / ha 120 mL / ha
	Earing stage	20%氯虫苯甲酰胺 20% Chlorantraniliprole 12.5%苯醚甲环唑 12.5% Difenconazole	150 mL / ha 675 mL / ha
第 5 次 The fifth time	穗期	20%啞菌酯 20% Kresoxim-methyl	600 mL / ha
	Ear stage	20%氯虫苯甲酰胺 20% Chlorantraniliprole	150 mL / ha

### 1.3 试验地点及田间试验安排

本研究试验地设置在江苏省宿迁市洋河新区酿酒原粮创新基地（33°78'N，118°44'E），实验地块土地平整，肥力均匀，田间管理一致。上述 4 个处理进行 3 个平行试验，共计 12 个小区，随机区组排列，各小区面积约为 30 m<sup>2</sup>，行距 50 cm，株距 14 cm，小区之间均设置保护隔离带。

### 1.4 取样时间及测定方法

播种后第 7、12、19、35、47、56、67 和 91 天对 T1、T2 和对照进行取样，具体操作步骤为：在每个小区采用五点法取样，每个点每株高粱获取靠近顶端的叶片 2~3 张。高粱叶片中氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪的含量利用液相色谱-质谱联用法测定（许振岚等, 2018）；可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定（Wang *et al.*, 2019）；单宁含量采用紫外分光光度法测定（蔡林宏等, 2012）；类黄酮含量采用紫外分光光度法测定（于居龙等, 2019）。

### 1.5 调查方法

在高粱苗期（25 d）、拔节期（35 d）、孕穗期（55 d）、始穗期（65 d）和齐穗期（75 d）进行田间虫害调查。由于生产实际中玉米螟和桃蛀螟常混合发生，螟虫防效通过调查总株数和被害株数（包括花叶株数和蛀茎株数）计算被害率和防效，具体方法为采用小区随机 5 点取样法，每点调查 20 株，每小区共调查 100 株，计算公式为：

$$\text{螟虫被害率(\%)} = \text{被害植株数} / \text{总植株数} \times 100\%;$$

$$\text{螟虫防治效果(\%)} = (\text{对照区高粱被害率} - \text{处理区的高粱被害率}) / \text{对照区高粱被害率} \times 100\%.$$

蚜虫在每株调查上下 6 片叶，记录蚜虫发生数量，每个小区随机调查 100 株，计算公式为：

$$\text{蚜虫防治效果(\%)} = (\text{对照区活虫数} - \text{处理区活虫数}) / \text{对照区活虫数} \times 100\%$$

## 1.6 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 将所有数据进行初步整理，通过 R 语言函数 `bartlett.test` 对初步处理数据进行方差齐性检验。针对同一处理不同时期氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪残留量的差异、不同处理之间生化物质含量的差异以及防虫效果的差异，均利用单因素方差分析和 Tukey-HSD 多重比较法统计，结果通过 R 语言 `aov` 函数和 `multcomp` 包的 `glht` 函数实现；采用配对样本 T 检验比较丸粒化包衣和常规拌种之间氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪残留量的差异，通过 R 语言 `t.test` 函数实现。本研究将  $\alpha=0.05$  设定为显著水平，图表中的数据均为平均值和标准差。高粱叶片可溶性糖、单宁和类黄酮含量的统计结果导入 Origin 2018 软件作图呈现。

## 2 结果与分析

### 2.1 酿酒高粱种子丸粒化包衣后药剂消解动态

播种后第 7~19 天，丸粒化包衣和常规拌种处理中的氯虫苯甲酰胺含量均在快速消解，且残留量呈显著下降趋势（表 2）。丸粒化包衣处理的氯虫苯甲酰胺含量从 80.51 mg/kg（第 7 天）降至 0.81 mg/kg（第 19 天），常规拌种处理的氯虫苯甲酰胺含量从 107.02 mg/kg（第 7 天）降至 2.34 mg/kg（第 19 天）。第 7~56 天，丸粒化包衣处理的氯虫苯甲酰胺含量显著低于常规拌种处理（ $P<0.05$ ）。第 67~91 天，各处理叶片中氯虫苯甲酰胺有效含量变化不大，丸粒化包衣和常规拌种处理之间差异不显著。

与氯虫苯甲酰胺结果类似，噻虫嗪有效含量在高粱生长的前中期呈显著下降趋势（第 7~35 天），同时期丸粒化包衣处理的噻虫嗪含量显著低于常规拌种处理（ $P<0.05$ ），播种后第 35 天，同时期丸粒化包衣处理的噻虫嗪含量（11.86 mg/kg）显著低于常规拌种处理（25.88 mg/kg）（ $P<0.05$ ），但 47~91 天的各处理叶片中噻虫嗪有效含量下降缓慢（表 3）。

表 2 氯虫苯甲酰胺在酿酒高粱叶片内的含量

Table 2 The concentration of chlorantraniliprole in leaves of brewed sorghum

生长时间 (d) Growth time	氯虫苯甲酰胺 (mg/kg)		P 值 P-value
	Chlorantraniliprole		
	丸粒化包衣 Seed pelletized coating	常规拌种 Conventional seed coating	
7	80.51 ± 2.97 a	107.02 ± 2.98 a	<0.001
12	6.57 ± 0.44 b	12.75 ± 1.47 b	0.01
19	0.81 ± 0.06 c	2.34 ± 0.19 c	0.002
35	0.33 ± 0.02 c	0.99 ± 0.05 c	0.001
47	0.19 ± 0.05 c	0.74 ± 0.08 c	0.009
56	0.14 ± 0.02 c	0.45 ± 0.07 c	0.012
67	0.11 ± 0.01 c	0.21 ± 0.05 c	0.085

91	$0.02 \pm 0.00$ c	$0.03 \pm 0.00$ c	0.039
----	-------------------	-------------------	-------

注：同列不同小写字母表示显著差异 ( $P < 0.05$ )。下同。Note: Different lowercase letters following meant values in the same column indicated significant differences at 0.05 level. The same below.

表 3 噻虫嗪在酿酒高粱叶片内的含量

Table 3 The concentration of thiamethoxam in leaves of brewed sorghum

生长时间 (d) Growth time	噻虫嗪 (mg/kg) Thiamethoxam		P 值 P-value
	丸粒化包衣 Seed pelletized coating	常规拌种 Conventional seed coating	
	7	$292.49 \pm 6.91$ a	
12	$145.23 \pm 8.24$ b	$205.48 \pm 7.78$ b	0.02
19	$75.88 \pm 5.79$ c	$136.76 \pm 5.01$ c	0.001
35	$11.86 \pm 1.48$ d	$25.88 \pm 1.08$ d	0.01
47	$2.98 \pm 0.30$ d	$2.52 \pm 0.52$ e	0.33
56	$0.65 \pm 0.11$ d	$0.62 \pm 0.07$ e	0.787
67	$0.11 \pm 0.02$ d	$0.15 \pm 0.04$ e	0.314
91	$0.07 \pm 0.01$ d	$0.07 \pm 0.01$ e	0.971

## 2.2 酿酒高粱种子丸粒化包衣对叶片中次生代谢物质含量影响

与对照相比,丸粒化包衣和常规拌种处理均显著提高了酿酒高粱叶片可溶性糖和类黄酮含量,丸粒化包衣处理的可溶性糖和类黄酮含量均显著高于常规拌种处理 ( $P < 0.05$ ) (图 1-a, b)。然而,酿酒高粱叶片单宁检测结果显示,丸粒化包衣处理和常规拌种处理对高粱叶片单宁含量整体上无显著影响,仅丸粒化包衣处理的酿酒高粱在第 7、47 和 91 天的叶片中单宁含量显著增加 (图 1-c)。

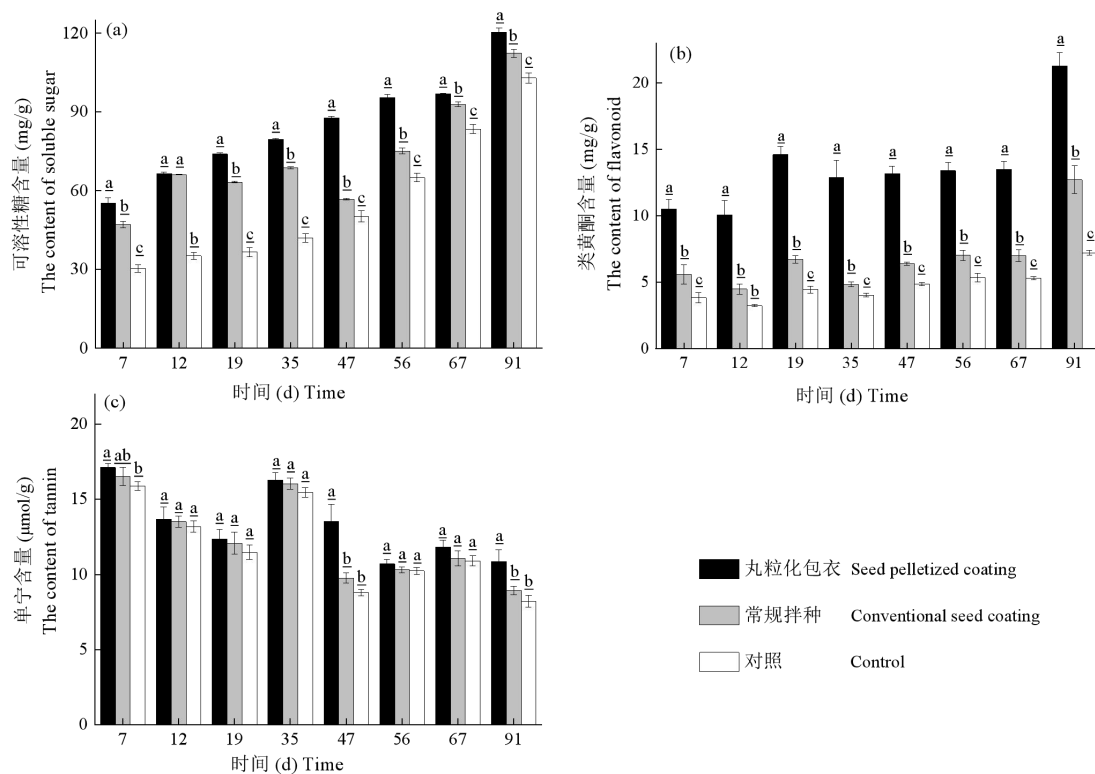


图 1 酿酒高粱叶片可溶性糖、单宁和类黄酮的含量

Fig. 1 Content of chemical composition (soluble sugar, tannin and flavonoid) in leaves of brewed sorghum

注：不同小写字母表示处理间存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。Note: Different lowercase letters meant significant difference in treatments at  $P<0.05$  level.

### 2.3 酿酒高粱种子丸化包衣后对主要害虫的防治效果

酿酒高粱种子丸粒化处理和常规拌种处理在酿酒高粱生长前中期 (35 d 之前) 均可有效防治螟虫和蚜虫为害, 防治效果与正常化学防治处理之间无显著性差异 (表 4 和表 5)。齐穗期 (75 d) 常规拌种处理对螟虫和蚜虫的防效分别降至 85.84% 和 65.71%, 低于丸粒化包衣处理和正常化学防治处理 (表 4 和表 5)。在酿酒高粱整个生育期, 丸化包衣处理后对螟虫的防效达到 90.58%~100%, 与正常化学防治处理无显著差异; 在高粱孕穗期 (55 d) 之前, 丸粒化包衣处理对蚜虫的防治可达到 85.40%~98.71%, 与正常化学防治处理无显著性差异。

表 4 不同处理对酿酒高粱螟虫的防治效果

Table 4 Control efficacy of different treatments against *Ostrinia furnacalis* and *Dichocrocis punctiferalis* on brewed sorghum

处理 Treatment	苗期 (25 d) Seedling stage		拔节期 (35 d) Jointing stage		孕穗期 (55 d) Booting stage		始穗期 (65 d) Earing stage		齐穗期 (75 d) Full heading stage	
	被害率 (%)	防效 (%)	被害率 (%)	防效 (%)	被害率 (%)	防效 (%)	被害率 (%)	防效 (%)	被害率 (%)	防效 (%)
	Damage rate	Control effect	Damage rate	Control effect	Damage rate	Control effect	Damage rate	Control effect	Damage rate	Control effect
丸粒化包衣 Seed pelletized coating	0	100 a	0.33 ± 0.01	98.98 ± 0.70 a	2.00 ± 0.65	95.89 ± 0.61 ab	5.00 ± 1.29	92.39 ± 1.86 a	7.00 ± 1.45	90.58 ± 1.37 a
常规拌种处理 Conventional seed coating	0.010 ± 0.005	99.74 ± 0.12 a	1.33 ± 0.05	95.93 ± 1.88 a	3.33 ± 0.63	93.15 ± 1.68 b	7.60 ± 1.07	88.42 ± 1.59 b	10.52 ± 1.18	85.84 ± 1.66 b
正常化学防治 Chemical control	0.030 ± 0.010	99.10 ± 0.36 a	0.67 ± 0.03	97.95 ± 0.98 a	1.67 ± 0.33	96.56 ± 0.96 a	4.00 ± 0.97	93.91 ± 0.59 a	5.00 ± 0.98	93.27 ± 1.90 a
裸种对照 Control	3.510 ± 0.360		32.67 ± 0.40		48.66 ± 4.71		65.67 ± 3.58		74.30 ± 4.78	

注：同列不同小写字母表示不同试验处理间存在显著异 ( $P < 0.05$ )。下同。Note: Different lowercase letters following meant values in the same column indicated differences among different treatments at 0.05 level. The same below.

表 5 不同处理对酿酒高粱蚜虫的防治效果

Table 5 Effects of prevention and control against *Melanaphis sacchari* by different treatments on brewed sorghum

处理 Treatment	苗期 (25 d) Seedling stage		拔节期 (35 d) Jointing stage		孕穗期 (55 d) Booting stage		始穗期 (65 d) Earing stage		齐穗期 (75 d) Full heading stage	
	活虫数 (头)	防效 (%)	活虫数 (头)	防效 (%)	活虫数 (头)	防效 (%)	活虫数 (头)	防效 (%)	活虫数 (头)	防效 (%)
	Living insects	Control effect	Living insects	Control effect	Living insects	Control effect	Living insects	Control effect	Living insects	Control effect
丸粒化包衣 Seed pelletized coating	2	98.71 ± 0.88 a	18	97.77 ± 1.16 a	299	85.40 ± 1.69 ab	706	79.97 ± 1.47 b	1335	74.28 ± 1.44 b
常规拌种处理 Conventional seed coating	2	98.71 ± 0.35 a	25	96.90 ± 1.38 a	390	80.93 ± 1.38 b	950	73.04 ± 2.48 c	1780	65.71 ± 3.14 c
正常化学防治 Chemical control	2	98.71 ± 0.21 a	12	98.52 ± 0.64 a	200	90.23 ± 3.80 a	451	87.22 ± 1.95 a	768	85.21 ± 1.77 a
裸种对照 Control	155		808		2048		3524		5193	



### 3 结论与讨论

氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪是优异的内吸性杀虫剂,可通过根部吸收自下而上传导至植株全身(Lahm *et al.*, 2009; Blacquiere *et al.*, 2012; 吴玉娥等, 2017)。酿酒高粱种子药剂丸粒化包衣和常规拌种处理检测结果表明,叶片中氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪含量均在前期呈现快速下降的趋势(表 2 和表 3)。熊腾飞等(2019)研究表明,种子丸化包衣后氟啶虫胺腈在菜薹根和叶中的浓度呈现先增加后降低的趋势。本研究中呈现药剂快速下降原因可能是药剂在多种环境因素影响下不断降解,同时随着酿酒高粱植株生物量的不断增加,通过根系吸收传导的药剂不断被稀释(李浩楠等, 2020);同时本研究中药剂含量测定间隔较长,无法明确药剂吸收的顶峰时间,所以呈现出持续下降的状态。本研究中,氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪通过丸粒化包衣和拌种方式进行种子处理,均使得药剂在植株叶片中得到一定的积累,但丸粒化处理方式相比于常规拌种处理叶片中药剂残留量更低,在播种后 67 d 前存在一定差异。前人研究表明丸粒化作为农药缓释的一种重要方式(周春江等, 2005; Pedrini *et al.*, 2017),可使药剂活性成分从丸粒化囊壳中缓慢释放出来。本研究中丸粒化粉主要是粘土和凹凸棒土,广泛应用于药物缓释系统中,但本研究前期药剂残留结果与前人研究相反,是否丸粒化填充材料对药剂的吸附能力较强而导致药剂前中期被根部吸收量降低,因此丸粒化填充材料对药剂吸附能力及种子周边土壤中药剂残留的检测还需进一步验证。

可溶性糖是植物生长发育过程中必要的能源物质,类黄酮是植物产生的次生代谢产物,两者均在酿酒高粱生命活动中发挥着关键作用(Harborne *et al.*, 2000; 李婷婷等, 2018)。有研究指出,植物在受到外部干扰时会提高可溶性糖和次生代谢物等生物物质的分泌量从而进行化学抵抗(Gatehouse, 2002; 韩永强等, 2017)。杀虫剂被种子吸附后,外源化学物质的刺激可能导致酿酒高粱种子在萌发和/或发育过程中促进可溶性糖和类黄酮的分泌和积累。本研究发现相较于常规拌种处理,丸粒化包衣处理显著增加了酿酒高粱叶片可溶性糖和类黄酮含量(图 1)。适当外部刺激可以更好地提高植物化学物质的分泌水平(王春丽等, 2009),本试验常规拌种处理氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪直接作用于种子,过高水平的外源化学物质刺激可能导致高粱叶片中可溶性糖和次生代谢物的增加水平有所降低。单宁含量结果显示,丸粒化包衣和常规拌种处理对高粱叶片单宁含量几乎无显著影响(图 1)。本研究中酿酒高粱叶片单宁含量在某一时期的显著升高可能受植物遗传特性、生长发育阶段和环境的共同影响(蔡林宏等, 2012),而非氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪作用导致。

氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪可有效防治多种农业害虫而被广泛应用于农业生产(董怀玉等, 2018; 刘佳悦等, 2022),虽然茎叶喷雾可直接作用于害虫形成有效防治,但频繁的药剂喷施极易造成害虫抗药性和土壤面源污染的发生。种子处理由于其精准施药的特性,能大大减少农药的使用量,缓解上述问题的产生(吴凌云等, 2007; 于居龙等, 2020)。本研究中,在酿酒高粱生长前中期,两种种子处理(常规拌种和丸粒化包衣)对螟虫和蚜虫的防效与化学防治无显著性差异,这可能是由于在酿酒高粱生长前中期,靶标害虫虫量低,种子处

理使酿酒高粱植株内含有较高的药剂残留在防虫过程发挥着主导作用,同时诱导产生一定量的抗虫物质如类黄酮等,在此阶段可能对害虫起到较好的抵抗效果。因此,化学残留药剂及次生代谢物质协同参与抵御靶标虫害,这可能是此阶段酿酒高粱种子药剂处理后长效控制靶标害虫的原因。在酿酒高粱生长后期,丸化包衣对靶标害虫防效优于常规拌种处理,丸化包衣对螟虫的防效与化学防治无显著性差异,但对蚜虫的防效低于化学防治。一方面,有研究表明植物体内可溶性糖的增加可以提高自身抗虫能力(韩永强等,2017),而类黄酮是植物合成的一种抗虫次生物质,可对取食的害虫产生忌避或拒食反应(Harborne *et al.*, 2000),酿酒高粱生长后期,残留药剂控害能力逐渐减弱,次生代谢物质控害作用显著。种子丸粒化包衣后,植株内抗虫物质如可溶性糖和类黄酮含量要显著高于常规拌种,说明药剂丸化包衣后可进一步刺激植株中具有抗虫能力的物质产生,导致酿酒高粱生长后期丸化包衣对靶标害虫防效要优于常规拌种处理。另一方面,害虫的生长、繁殖受气候等环境影响较大,本研究田间调查时间为2022年6月-10月,当年本地受高温干旱气候的影响,蚜虫发生普遍偏重,虽然在酿酒高粱生长后期次生代谢物质控害作用显著,但面对较大的虫口密度依然防效有限。因此,丸粒化包衣对酿酒高粱后期靶标害虫的防效还需进一步验证。通过本研究结果发现,在酿酒高粱生产过程中可利用丸粒化包衣替代苗期、拔节期之前的1~2次化学农药的施用,从而减少酿酒高粱前中期化学农药的用药量和用药次数,由传统“见虫打药”防治策略变为“携药等虫”。

本研究发现酿酒高粱种子利用氯虫苯甲酰胺和噻虫嗪丸粒化包衣后,可使酿酒高粱植株携药生长并诱导叶片中可溶性糖和类黄酮含量增加,有效抵抗螟虫和蚜虫对酿酒高粱的为害。尽管药剂丸粒化包衣对高粱虫害的防治效果在酿酒高粱生长中后期有所下降,但本试验结果表明药剂丸粒化包衣可以在酿酒高粱生长的前中期减施1~2次或不施化学农药,减轻化学药剂对作物和生态环境的负面影响,为酿酒高粱生产过程中病虫害防治提供新思路。

### 参考文献(References)

- Blacquiere T, Smaghe G, Vangstel CAM. Neonicotinoids in bees: A review on concentrations, side-effects and risk assessment [J]. *Ecotoxicology*, 2012, 21 (4): 973-992.
- Cai LH, Zhou HL, Liu GD, *et al.* Tannins dynamic of 5 species of genus *Flemingia* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2012, 33 (3): 512-516. [蔡林宏, 周汉林, 刘国道, 等. 几种千斤拔属饲用植物单宁含量动态分析 [J]. *热带作物学报*, 2012, 33 (3): 512-516]
- Chen YF, Zhang JL, Yin DK, *et al.* Effects of rice seeds pelleting on seed germination, seedling morphology and amylase activity of rice (*Oryza sativa* L.) under hypoxia stress [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2023, 50 (6): 930-935. [陈云飞, 张军礼, 尹道琨, 等. 丸粒化处理对低氧胁迫下水稻种子萌发、幼苗形态和淀粉酶活性的影响 [J]. *安徽农业大学学报*, 2023, 50 (6): 930-935]
- Cotrufu MF, Soong JL, Horton AJ, *et al.* Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 776-779.
- Dong HY, Hou ZY, Lu F, *et al.* Effect evaluation of a few pesticides on sorghum pest and disease prevention and control in Liaoning province [J]. *Agrochemicals*, 2018, 57 (5): 387-390. [董怀玉, 侯志研, 卢峰, 等. 几种药剂对辽宁高粱主要病虫害的防控效果评价 [J]. *农药*, 2018, 57 (5): 387-390]
- Fan J, Wei GY, Zhang HZ, *et al.* Effect of self-developed aspergillus niger pelletized seed coat on sorghum seed germination and seedling growth [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43 (1): 25-32. [樊娟, 卫国羽, 张洪珍, 等. 自研型黑曲霉丸化种衣剂对高粱种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43 (1): 25-32]
- Fulton-smith S, Cotrufu MF. Pathways of soil organic matter formation from above and belowground inputs in a *Sorghum bicolor*

- bioenergy crop [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2019, 11 (8): 971-987.
- Gatehouse JA. Plant resistance toward insect herbivores: A dynamic interaction [J]. *New Phytologist*, 2002, 156 (2): 145-169.
- Ge LQ, Wang F, Wu JC. Resistance of different rice varieties to *Cnaphalocrocis medinalis* G uen e (Lepidoptera: Pyralidae) larvae infestation [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2013, 34 (4): 84-88. [戈林泉, 王芳, 吴进才. 不同水稻品种对稻纵卷叶螟耐虫性的研究 [J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2013, 34 (4): 84-88]
- Gilbert P, Ryu C, Sharifi V, et al. Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops [J]. *Fuel*, 2009, 88 (8): 1491-1497.
- Hang YQ, Gong SL, Wen LZ, et al. Effect of silicon addition to rice plants on *Cnaphalocrocis medinalis* feeding and oviposition preference [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (5): 1623-1629. [韩永强, 弓少龙, 文礼章, 等. 水稻施用硅肥对稻纵卷叶螟幼虫取食和成虫产卵选择性的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37 (5): 1623-1629]
- Harborne JB, Willjams CA. Advances in flavonoid research since 1992 [J]. *Phytochemistry*, 2000, 55 (6): 481-504.
- Hu CH, Li YT, Shang MR, et al. Adsorption and leaching behavior of five neonicotinoid pesticides in farmland soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42 (3): 539-546. [胡传鹤, 李永涛, 尚梦如, 等. 5种新烟碱类农药在农田土壤中的吸附和淋溶行为 [J]. 农业环境科学学报, 2023, 42 (3): 539-546]
- Lahm GP, Cordova D, Barry A JD. New and selective ryanodine receptor activators for insect control [J]. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 2009, 17 (12): 4127-4133.
- Li HN, Huang HL, L u LL, et al. Plant uptake and translocation of DBDPE in soil and the micro-mechanisms [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40 (5): 1848-1857. [李浩楠, 黄红林, 吕丽丽, 等. 土壤中十溴二苯乙烷 (DBDPE) 的植物吸收传输特征及微观机制研究 [J]. 环境科学学报, 2020, 40 (5): 1848-1857]
- Li SG, Liu M, Liu F, et al. Current status and future prospective of sorghum production and seed industry in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54 (3): 471-482. [李顺国, 刘猛, 刘斐, 等. 中国高粱产业和种业发展现状与未来展望 [J]. 中国农业科学, 2021, 54 (3): 471-482]
- Li TT, Xu JQ, Wang SL, et al. Research advances in the metabolism and transport of non-structural carbohydrates in plants [J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54 (1): 25-35. [李婷婷, 薛璟祺, 王顺利, 等. 植物非结构性碳水化合物代谢及体内转运研究进展 [J]. 植物生理学报, 2018, 54 (1): 25-35]
- Liu JY, Xu J, Zhang YH, et al. Trace determination of thiamethoxam and clothianidin in wheat leaves and wheat ears and its application [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2022, 24 (1): 133-141. [刘佳悦, 徐军, 张云慧, 等. 噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在麦叶和麦穗中的痕量检测方法及其应用 [J]. 农药学报, 2022, 24 (1): 133-141]
- Mansour MMF, Emam MM, Salama KHA, et al. Sorghum under saline conditions: Responses, tolerance mechanisms, and management strategies [J]. *Planta*, 2021, 254: 24.
- Mcguire AV, Northfield TD. Tropical occurrence and agricultural importance of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2020, 4: 6.
- Pedrini S, Merritt DJ, Stevens J, et al. Seed coating: Science or marketing spin? [J]. *Trends in Plant Science*, 2017, 22 (2): 106-116.
- Schittenhelm S, Schrotter S. Comparison of drought tolerance of maize, sweet sorghum and sorghum-sudangrass hybrids [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2013, 200 (1): 46-53.
- Wang CL, Liang ZS. Research progress of signal transduction pathway and regulation of secondary metabolism in plant induced by exogenous stimulus [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29 (5): 1055-1065. [王春丽, 梁宗锁. 外源刺激对植物次生代谢的调节及其信号转导途径研究进展 [J]. 西北植物学报, 2009, 29 (5): 1055-1065]
- Wang FC, Chen FS, Wang GG, et al. Effects of experimental nitrogen addition on nutrients and nonstructural carbohydrates of dominant understory plants in a Chinese fir plantation [J]. *Forests*, 2019, 10 (2): 155.
- Wang JP, Du RH, Ji GS, et al. Analysis and risk assessment of seven conventional pesticides residue in brewing Sorghum grains grown in Hebei Province [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36 (7): 282-288, 320. [王金萍, 杜瑞恒, 籍贵芬, 等. 河北酿造高粱籽粒中7种常用农药的残留与安全评价 [J]. 现代食品科技, 2020, 36 (7): 282-288, 320]
- Wu JC, Xu JX, Yuan SZ, et al. Pesticide-induced susceptibility of rice to brown planthopper *Nilaparvata lugens* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2001, 100 (1): 119-126.
- Wu LY, Li M, Yao DW. Application and development of chemical pesticide as seed coating agent [J]. *Agrochemicals*, 2007, 9: 577-579, 590. [吴凌云, 李明, 姚东伟. 化学农药型种衣剂的应用与发展 [J]. 农药, 2007, 9: 577-579, 590]
- Wu YE, Li J, Zheng KM, et al. The Systemic properties of chlorantraniliprole in rice plant by UPLC-HRMS [J]. *Agrochemicals*, 2017, 56 (3): 176-179. [吴玉娥, 李静, 郑坤明, 等. UPLC-HRMS法探究氯虫苯甲酰胺在水稻植株中的内吸传导特性 [J]. 农药, 2017, 56 (3): 176-179]
- Xiong TF, Lin QS, Feng X. Degradation dynamics of sulfoxaflor in Choy sum plants and soil after seed pelletizing treatment and the effectiveness of this pesticide against *Phyllotreta striolata* (Fabricius) [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2019, 56 (4):

- 826-831. [熊腾飞, 林庆胜, 冯夏. 种子丸粒化包衣处理后氟啶虫胺睛的消解动态及对黄曲条跳甲的防控效果 [J]. 应用昆虫学报, 2019, 56 (4): 826-831]
- Xiong TF, Lin QS, Feng X. Effects of seed pelletized coating of plant growth regulators on seedling quality of choy sum [J]. *Seed*, 2022, 41 (6): 102-106. [熊腾飞, 林庆胜, 冯夏. 植物生长调节剂种子丸粒化包衣对菜心种苗质量的影响 [J]. 种子, 2022, 41 (6): 102-106]
- Xu ZL, Chen LP, Xu MF, *et al.* Residues and dissipation dynamics of chlorantraniliprole and pyraclostrobin in *Dendrobium officinale* [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2018, 20 (2): 223-231. [许振岚, 陈丽萍, 徐明飞, 等. 氯虫苯甲酰胺和吡唑醚菌酯在铁皮石斛中的残留及消解动态 [J]. 农药学报, 2018, 20 (2): 223-231]
- Yu JL, Zhang G, Miao K, *et al.* Pesticide screening and control effect on *Cnaphalocrocis medinalis* by rice seed treatment [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (1): 270-275, 288. [于居龙, 张国, 缪康, 等. 种子处理防治稻纵卷叶螟药剂筛选及效果 [J]. 植物保护, 2020, 46 (1): 270-275, 288]
- Yu JL, Zhou YK, Gu HT, *et al.* Effects of seed treated with chlorobenzamide on biochemical substances in rice at different growth stages [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 35 (2): 289-294. [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物物质的影响 [J]. 江苏农业学报, 2019, 35 (2): 289-294]
- Zhang M, Wu Y, Dong S, *et al.* Effects of cating and pelleting on the emergence of sorghum for wine [J]. *Seed*, 2023, 42 (4): 139-144. [张民, 伍雨, 董帅, 等. 种子包衣和丸粒化处理对酒用高粱出苗的影响 [J]. 种子, 2023, 42 (4): 139-144]
- Zhou CJ, Li SL, Yu YL, *et al.* Research and application of pesticide sustained release technology [J]. *Crops*, 2005, 1: 32-34. [周春江, 李松林, 恽友兰, 等. 农药缓释技术研究及应用 [J]. 作物杂志, 2005, 1: 32-34]
- Zou JQ, Wang YQ, Ke FL. Developments status and prospect of sorghum industry in China [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, 40 (3): 2-8. [邹剑秋, 王艳秋, 柯福来. 高粱产业发展现状及前景展望 [J]. 山西农业大学学报 (自然科学版), 2020, 40 (3): 2-8]