



付贞桢,郭良芝,程亮,等.植保无人机喷施灭草松防除燕麦田杂草的雾滴沉积特性及除草效果[J].江西农业大学学报,2024,46(5):1221-1232.

FU Z Z, GUO L Z, CHENG L, et al. Droplet deposition characteristics and weed control effects of spraying herbicide Bentazone on oat fields by plant protection drones[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(5): 1221-1232.

# 植保无人机喷施灭草松防除燕麦田杂草的雾滴沉积特性及除草效果

付贞桢<sup>1</sup>, 郭良芝<sup>1,2</sup>, 程亮<sup>1,2</sup>, 李秋荣<sup>1,2</sup>, 魏有海<sup>1,2\*</sup>

(1. 青海大学 农牧学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海大学 农林科学院, 青海 西宁 810016)

**摘要:**【目的】旨在探究应用植保无人机进行改变无人机飞行高度、飞行速度以及喷幅喷施燕麦田间除草作业的雾滴沉积分布特性及杂草防除效果。【方法】选用大疆 T30 植保无人机作为测试器械, 采用作业高度、速度、喷幅设计三因素三水平正交试验测定了燕麦叶片的雾滴沉积规律。同时田间试验测定了喷施除草剂对燕麦混播田靶标杂草的防效。【结果】采用 T30 植保无人机喷施 480 g/L 灭草松 AS, 当作业参数喷幅为 4 m/mL、作业高度为 1.5 m、作业速度为 5 m/s 时燕麦叶片上的雾滴覆盖率为 6.98%, 雾滴沉积密度为 107.80 个/cm<sup>2</sup>, 在设置的所有处理中最高, 雾滴平均直径达 1 447 μm。分析认为影响燕麦叶片雾滴覆盖率和沉积密度的主要因素依次为作业高度、作业速度、喷幅, 而影响雾滴直径的因素依次为作业速度、喷幅和作业高度。喷幅 4 m、飞行高度 1.5 m、飞行速度 5 m/s 为 T30 植保无人机在喷施灭草松除草剂时的最佳飞行参数, 施药后 40 d 时对燕麦田杂草的株防效为 87.07%, 鲜重防效为 91.45%。与对照相比, 增产幅度为 437.47 kg/hm<sup>2</sup>, 增产率为 10.09%。【结论】揭示了植保无人机 T30 在燕麦田喷施 480 g/L 灭草松 AS 除草剂时的雾滴沉积分布规律及其在田间的除草效果, 为植保无人机在农业领域的广泛应用提供数据支持和技术支撑。

**关键词:** 植保无人机; 燕麦; 雾滴沉积; 化学除草剂; 灭草松

中图分类号: S252<sup>+</sup>.9; S451.22<sup>+</sup>.9 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)05-1221-12



## Droplet deposition characteristics and weed control effects of spraying herbicide Bentazone on oat fields by plant protection drones

FU Zhenzhen<sup>1</sup>, GUO Liangzhi<sup>1,2</sup>, CHENG Liang<sup>1,2</sup>, LI Qiurong<sup>1,2</sup>, WEI Youhai<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xi'ning 810016, China; 2. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xi'ning 810016, China)

收稿日期: 2024-04-16 修回日期: 2024-06-03

基金项目: 农业农村部现代农业技术体系建设专项(CARS-07-C-3、CARS-08-C-3)和科技部第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK0303)

Project supported by Modern Agricultural Technology System Construction of Ministry of Agriculture and Rural Affairs (CARS-07-C-3, CARS-08-C-3) and The Second Comprehensive Scientific Expedition to the Tibetan Plateau was funded by the Ministry of Science and Technology (2019QZKK0303)

作者简介: 付贞桢, 硕士生, orcid.org/0009-0005-8482-7543, 674573455@qq.com; \*通信作者: 魏有海, 研究员, 主要从事农田杂草治理与利用研究, orcid.org/0009-0001-3186-9804, youhaiweiqh@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the distribution characteristics of droplet deposition and weed control effect of plant protection UAV in weeding operation of oat field by changing flight height, flight speed and spray width. [Method] DJI T30 plant protection drone was selected as a test instrument to determine the droplet deposition rule of oat leaves by three factors and three levels orthogonal test of working height, speed and spray width design. In addition, field experiments were conducted to determine the control effect of herbicide spraying on target weeds in oat mixed sowing field. [Result] The test results showed that when the spraying parameters were 4 mL, the working height was 1.5 m, and the working speed was 5 m/s (i.e., treatment 7), the fog droplet coverage rate on oat leaves was 6.98%, and the droplet deposition density was 107.80 cm<sup>2</sup>. With an average droplet diameter of 1 447 μm, it was the highest of all the treatments set. The analysis showed that the main factors affecting the fog coverage and deposition density of oat leaves were working height, working speed and spraying amplitude, while the factors affecting the fog drop diameter were working speed, spraying amplitude and working height. The optimal flight parameters were 4 m spray width, 1.5 m flight height and 5 m/s flight speed for T30 plant protection UAV. The plant control efficiency was 87.07% and fresh weight control efficiency was 91.45% at 40 d after application. Compared with the control, the yield increase was 437.47 kg/hm<sup>2</sup>, with an increase of 10.09%. [Conclusion] The study reveals the distribution of droplet deposition and its effect on weeding in oat field when the plant protection UAV T30 was sprayed with 480 g/L Bentazone AS, which provides data support and technical support for the extensive application of the plant protection UAV in the agricultural field.

**Keywords:** plant protection drone; oats; droplet deposition; chemical herbicides; bentazone

【研究意义】中国燕麦的年栽培面积约100万hm<sup>2</sup><sup>[1]</sup>,青海省燕麦种植面积达1.34×10<sup>5</sup>hm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>,这一产业在青海地区的社会经济发展中占据举足轻重的地位和作用<sup>[3]</sup>。燕麦生产过程中常伴随着病虫草害的发生,严重影响燕麦的产量和品质<sup>[4]</sup>,其中杂草与燕麦竞争养分、水分和光照等资源<sup>[5]</sup>,是影响燕麦产量和质量的主要因素,生产上主要采用化学防除法来控制杂草,通过合理使用化学除草剂,为作物的生长和发展创造有利条件<sup>[6-9]</sup>。目前,我国农药喷洒方式主要采用大容量喷雾设备,包括背负式和自走式机械<sup>[10]</sup>,在地面喷施农药的过程中,广泛存在着“非精细式”喷洒情况,农药的利用率低,同时存在着农药残留以及环境遭到破坏等问题<sup>[11-12]</sup>。【前人研究进展】近年来,作物和杂草的竞争关系比较明显,生产上常采用茎叶除草剂灭草松进行杂草的防除<sup>[13-16]</sup>。国内外的实践表明,将小型无人机用于农田植保作业,可以实现节水、节药,提高作业效率、减少劳动力、避免人员农药中毒,这些优势都是传统地面机械无法比拟的。筛选出该施药模式下安全高效的除草剂种类以及精准高效的飞防数据是至关重要的。利用植保无人机的喷雾施药已成为病虫草害统防统治的一种重要作业模式<sup>[17]</sup>。植保无人机主要应用在玉米、水稻、小麦、果树等方面。如袁会珠等<sup>[18]</sup>利用植保无人机防治玉米草害的控制效果,施药后15d株防效为74.47%~94.63%。30d时株防效为72.87%~92.63%,鲜重防效为83.07%~97.30%。张小秋等<sup>[19]</sup>应用植保无人机在蔗田化学除草,对甘蔗安全且作业率高的特点。吕永超等<sup>[20]</sup>在利用无人机喷施除草剂防治花生草害,防除效果可达到73.6%~97.6%。

【本研究切入点】目前,关于植保无人机燕麦田除草剂喷施雾滴沉积分布特性及其作业效果尚未见到报道。本试验以在温室盆栽中筛选的化学除草剂480g/L灭草松AS为试验药剂,在田间条件下测定该除草剂在燕麦叶片上的雾滴沉积特性,结合燕麦4~5叶期用无人机飞防除草的数据分析,进而优化作业参数。【拟解决的关键问题】探究植保无人机的飞防参数组合对燕麦杂草防治的差异,获得运用于燕麦田最佳除草的植保无人机作业参数组合,为无人机喷施480g/L灭草松AS在燕麦田防除杂草提供的数据支持和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

大疆T30植保无人机(深圳市大疆创新科技有限公司):T30为多旋翼无人机,全自动操作系,可定向

定速飞行;雾滴分析仪(深圳市大疆创新科技有限公司);480 g/L 灭草松 AS(江苏瑞邦农化股份有限公司);水敏试纸(重庆六六山下植保科技有限公司)。其他材料包括:防护镜、橡胶手套、曲别针、订书机、卷尺、自封袋、记号笔、警戒线、塑料盆、营养土、移液枪、分析天平等。

1.2 试验地概况及环境情况

试验于 2023 年 6—11 月在青海省西宁市湟中区鲁沙尔镇朱家庄村,属雨养农业区,36°29′12″N, 101°31′44″E,海拔 3 084 m,年降水量 550 mm。年均温 1 ℃。试验地土壤为黑钙土,全 N 含量 4.39 g/kg,全 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 2.99 g/kg,全 K<sub>2</sub>O 含量 27.55 g/kg,碱解 N 266 mg/kg,速效 P 35.3 mg/kg,速效 K 64 mg/kg,土壤有机质含量为 80.99 g/kg,pH 7.42。试验地前茬作物为白菜型油菜。当季燕麦品种为“林纳”。

试验期燕麦 4~5 叶期,田间优势杂草为藜(*Chenopodium album* L.)、密花香薹(*Elsholtzia densa* Benth.)、繁缕(*Stellaria media*(L.)Cyr.)、宝盖草(*Lamium amplexicaule* L.)、猪殃殃(*Galium spurium* L.)、野油菜(*Brassica napus* L.)、问荆(*Equisetum arvense* L.)等。试验时测得喷施时风速为东南风 1.2 m/s,平均温度为 20 ℃,平均湿度为 60.2%。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计处理

植保无人机的工作参数被定义为喷幅、作业高度、作业速度,飞行高度影响无人机的喷幅,试验在除草剂相同使用量条件下,可通过改变无人机飞行高度、喷幅和飞行速度进行测试<sup>[21]</sup>。因此,本试验采用室内实验筛选出的燕麦田除草剂 480 g/L 灭草松 AS 为 3 000 mL/hm<sup>2</sup> 为测试药剂,设无人机 T30 作业的飞行高度、飞行速度、喷幅三因素三水平正交试验,作业飞行高度分别为 1.5、2.0、2.5 m,飞行速度分别为 4、5、6 m/s,喷幅为 4、5、6 m。另外设置清水对照区。试验设计的飞行作业参数如表 1 所示。共 10 个处理。每个处理设置 3 次重复。无人机喷施作业试验地块 10 m×8 m 为一个处理,为减小雾滴飘移影响,处理之间设 5 m 宽的缓冲隔离带。通过获取雾滴覆盖率、雾滴沉积密度、雾滴直径等指标,结合除草效果,最终得出最佳飞行参数。

表 1 T30 无人机施药的正交试验方案  
Tab.1 Orthogonal experimental plan for T30 drone spraying

| 每 667 m <sup>2</sup> 用量/L<br>Amount per 667 m <sup>2</sup> | 作业速度/(m·s <sup>-1</sup> )<br>Operating speed | 作业高度/m<br>Working altitude | 作业喷幅/m<br>Homework spraying range |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 2.0                                                        | 4.0                                          | 1.5                        | 4.0                               |
|                                                            |                                              | 2.0                        | 5.0                               |
|                                                            |                                              | 2.5                        | 6.0                               |
|                                                            | 4.5                                          | 1.5                        | 4.0                               |
|                                                            |                                              | 2.0                        | 5.0                               |
|                                                            |                                              | 2.5                        | 6.0                               |
|                                                            | 5.0                                          | 1.5                        | 4.0                               |
|                                                            |                                              | 2.0                        | 5.0                               |
|                                                            |                                              | 2.5                        | 6.0                               |
|                                                            |                                              |                            |                                   |

1.3.2 采样点布置

在每个处理内选择株型健壮,大小基本一致平均高度 10 cm 的 5 株燕麦,用尺子测量在燕麦距地面 10 cm 处,按照水平的方式布置水敏试纸,每株燕麦上布置 1 张水敏试纸。以无人机喷雾的雾滴在水敏试纸上的分布模拟雾滴到达燕麦叶面上的沉积分布情况<sup>[22-23]</sup>。待喷施雾滴全部沉降到地面且试纸上雾滴且干燥后<sup>[24]</sup>,待各组试验参数做完之后,将所有自封袋进行整理,便于后期进行数据处理使用。

1.4 数据采集与分析

本试验所用 480 g/L 灭草松 AS,用药量 3 000 mL/hm<sup>2</sup>,每个处理完成后,收集水敏试纸带回实验室,使用大疆雾滴分析仪进行图像处理分析<sup>[25]</sup>,将各处理数据导出输入到 Excel 表格进行汇总,利用 SPSS26.0 分析软件对不同作业高度、喷幅、速度进行显著性方差分析,然后进行多重比较,以分析施药参数对雾滴在燕麦叶片上分布的影响,根据雾滴分布的测试结果,得出雾滴密度最大的飞行参数。采用邓肯氏新复

极差法来确定各处理之间防治效果的差异是否显著。本试验中所有图均通过 Origin 2021 绘制。本试验采用极差  $X$  为各组试验雾滴沉积分布影响因子,极差为:

$$X = M_{\max} - M_{\min} \quad (1)$$

式(1)中: $X_{\max}$ 为最大值, $X_{\min}$ 为最小值。

## 1.5 防效调查

### 1.5.1 安全性调查

药后观察燕麦对各处理的反应,比较与清水对照区燕麦的叶色长势等,使用目测法评估杂草的覆盖度。根据上海农业科学院制定的分级标准,调查除草剂对燕麦是否具有药害(表2)。燕麦成熟后每小区对角线取样3点,样点面积  $1 \text{ m}^2$  收获测产。

$$\text{增产率} = [(\text{处理区产量} - \text{对照区产量}) / \text{对照区产量}] \times 100\% \quad (2)$$

表2 药害分级标准

Tab.2 Classification standards for drug damage

| 药害级别<br>Drug damage level | 药害程度特征<br>Characteristics of drug damage degree |
|---------------------------|-------------------------------------------------|
| 0                         | 生长正常与空白对照株无异                                    |
| 1                         | 20% 以内叶尖灼伤,或叶片出现斑点                              |
| 2                         | 20%~50% 植株叶片发生药害斑点                              |
| 3                         | 50%~70% 植株叶片发生药害斑点或 10% 植物枯萎                    |
| 4                         | 70%~90% 植株叶片发生枯萎或有 20% 植株死亡                     |

### 1.5.2 除草效果调查

施药后 20 d、40 d 每个小区按照对角线上的 3 个点进行取样,每个点的面积为  $0.25 \text{ m}^2$ 。在各处理组施用除草剂后的 20 d 和 40 d,分别对不同处理组内各小区中的杂草种类和数量进行调查和统计,并测量所有杂草的鲜重,以计算各处理组除草剂的株防效和鲜重防效。具体的计算公式如下:

$$\text{株防效} = (\text{对照组株数} - \text{处理组株数}) / \text{对照组株数} \times 100\%;$$

$$\text{鲜重防效} = (\text{对照组杂草鲜重} - \text{处理组杂草鲜重}) / \text{对照组杂草鲜重} \times 100\%;$$

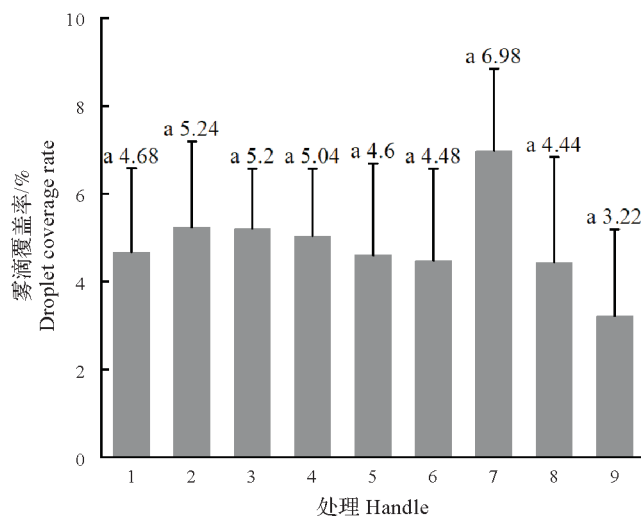
## 2 结果与分析

### 2.1 不同喷幅、飞行高度和飞行速度下的雾滴覆盖率

在 9 组试验中(图 1),不同喷幅、飞行高度以及飞行速度条件下,雾滴覆盖率呈现出了显著的差异。靶区内的雾滴覆盖率与喷幅的宽度、飞行的高度以及飞行的速度均存在密切的关联。在这些变量中,当喷幅设定为  $4 \text{ m/mL}$ 、作业高度为  $1.5 \text{ m}$ 、作业速度为  $5 \text{ m/s}$  时(处理 7),燕麦叶片上的雾滴覆盖率达到  $6.98\%$ ,这一数值显著高于其他试验组。此外,当喷幅保持为  $4 \text{ m/mL}$ 、作业高度  $2 \text{ m}$ 、作业速度  $5 \text{ m/s}$  时,虽然靶区内的雾滴覆盖率有所降低,但仍达到了  $5.24\%$ ,位居次席。当喷幅增加至  $5 \text{ m/mL}$ 、作业高度进一步提升至  $2.5 \text{ m}$ 、作业速度达到  $6 \text{ m/s}$  时(处理 9),燕麦叶片上的雾滴覆盖率降至  $3.22\%$ ,这一数据明显低于其他 8 组处理结果。通过这些数据的对比分析,可以清晰地看出,雾滴覆盖率受到喷幅、飞行高度以及飞行速度等多重因素的共同影响。

雾滴覆盖率极差结果(表 3)表明影响燕麦各冠层雾滴沉积密度的主要因素遵循以下顺序:作业高度、作业速度、喷幅。这 3 个因素在决定燕麦雾滴覆盖率方面的重要性。首先,作业速度对燕麦叶片上的雾滴覆盖率产生了显著影响,作业速度越快,燕麦叶片上的雾滴覆盖率反而越高。这可能与作业速度加快时,雾滴受到风力作用,减少了漂移现象,从而增加了雾滴在叶片上的沉积量。其次,作业高度是影响燕麦叶片雾滴覆盖率的关键因素。作业高度的变化直接决定了雾滴在垂直方向上的分布情况,进而影响不同冠层的雾滴沉积密度。最后,喷幅作为影响雾滴覆盖率的另一个重要因素,虽然其作用相对于作业高度和作业速度较为次要。喷幅的大小决定了雾滴在水平方向上的分布范围,进而影响了靶区内雾滴的整体覆盖率。





图中不同小写字母表示在不同喷幅、飞行高度和飞行速度之间经邓肯氏新复极差法检验在 0.05 水平上差异显著。  
Different lowercase letters in the figure indicate significant differences at the 0.05 level between different spray amplitudes, flight heights, and flight speeds, as tested by Duncan’s new complex range method.

图 1 不同喷幅、飞行高度及飞行速度下雾滴覆盖率

Fig.1 Droplet coverage under different spray amplitudes, flight altitudes, and flight speeds

表 3 不同喷幅、飞行高度及飞行速度下施药雾滴沉积覆盖率极差分析试验结果

Tab.3 Analysis of range of spray droplet deposition coverage under different spray amplitudes, flight altitudes, and flight speeds

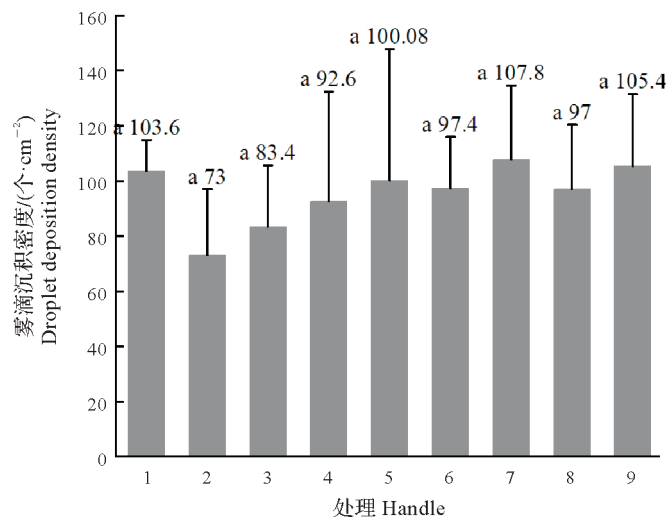
| 极差计算<br>Range calculation | 雾滴覆盖率/%<br>Droplet coverage rate |                          |                       |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------|
|                           | 喷幅<br>Spray amplitude            | 飞行高度<br>Flight altitudes | 飞行速度<br>Flight speeds |
|                           |                                  |                          |                       |
| $K_1$                     | 13.56                            | 16.18                    | 15.12                 |
| $K_2$                     | 14.48                            | 16.18                    | 16.06                 |
| $K_3$                     | 11.30                            | 9.46                     | 12.70                 |
| $\bar{K}_1$               | 4.52                             | 5.39                     | 5.04                  |
| $\bar{K}_2$               | 4.82                             | 5.39                     | 5.35                  |
| $\bar{K}_3$               | 3.76                             | 3.21                     | 4.23                  |
| 极差 Range                  | 1.06                             | 2.18                     | 1.12                  |

$K_i$ 为影响雾滴覆盖率因素为梯度*i*时,各因素所对应的雾滴覆盖率试验结果之和; $\bar{K}_i$ 为*K*的均值。  
 $K_i$  is the sum of the fog droplet coverage test results corresponding to each factor when the factor affecting fog droplet coverage is gradient *i*;  $\bar{K}_i$  is the mean of *K*.

2.2 不同飞行高度、速度及喷幅下的雾滴沉积密度

大疆 T30 多旋翼植保无人机喷施除草剂不同喷幅、飞行高度及飞行速度下雾滴密度不同(图 2),在 9 组处理下,当喷幅为 4 m/mL、作业高度为 1.5 m、作业速度为 5 m/s 时(处理 7),燕麦叶片上的雾滴沉积密度最高,为 107.80 个/cm<sup>2</sup>,显著超越了其他处理。处理 9 虽然使用了不同的参数组合(喷幅为 5 m/mL、作业高度为 2.5 m、作业速度为 6 m/s),但其在靶区内的雾滴沉积密度也表现出色,达到了 105.4 个/cm<sup>2</sup>,仅次于处理 7。而当喷幅为 5 m/mL、作业高度为 2 m、作业速度为 4 m/s 时(处理 2),燕麦叶片上的雾滴沉积密度仅为 73 个/cm<sup>2</sup>,这一数值明显低于其他 8 组处理。说明喷幅、飞行高度和飞行速度是影响雾滴沉积密度的关键因素,而它们之间的最优组合能够有效提高雾滴在燕麦叶片上的沉积密度,进而提升除草效果。

基于不同喷幅、飞行高度及飞行速度下施药雾滴沉积密度的极差分析试验结果(表 4),影响燕麦叶片雾滴沉积密度的 3 种因素在燕麦叶片上的主次顺序并不一致。作业高度、作业速度以及喷幅这三者中,作业高度对雾滴沉积密度的影响最为显著。试验结果为优化植保无人机的作业参数提供了重要依据,以确保农药在燕麦叶片上的有效沉积,进而提升防治效果。



图中不同小写字母表示在不同喷幅、飞行高度和飞行速度之间经邓肯氏新复极差法检验在 0.05 水平上差异显著。  
Different lowercase letters in the figure indicate significant differences at the 0.05 level between different spray amplitudes, flight heights, and flight speeds, as tested by Duncan's new complex range method.

图 2 不同喷幅、飞行高度及飞行速度下雾滴沉积密度

Fig.2 Fog droplet deposition density under different spray amplitude, flight altitude and flight speed

表 4 不同喷幅、飞行高度及飞行速度下施药雾滴沉积密度极差分析试验结果

Tab.4 Analysis of the range of deposition density of spraying droplets under different spray amplitudes, flight altitudes, and flight speeds

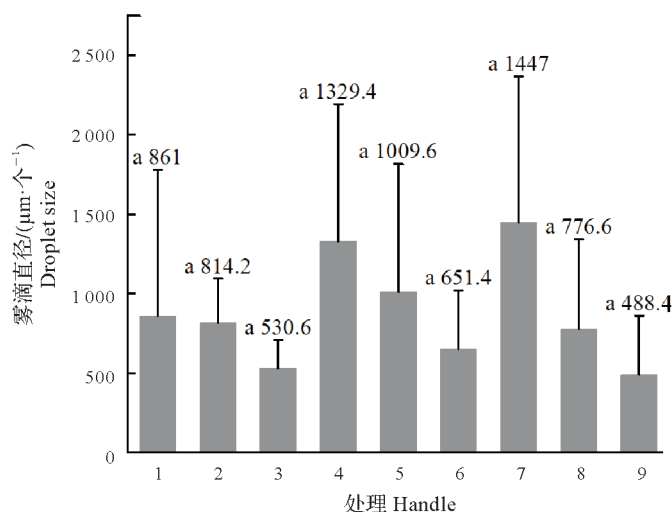
| 极差计算<br>Range calculation | 雾滴沉积密度/(个·cm <sup>-2</sup> )<br>Droplet deposition density |                          |                       |
|---------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
|                           | 喷幅<br>Spray amplitude                                      | 飞行高度<br>Flight altitudes | 飞行速度<br>Flight speeds |
|                           |                                                            |                          |                       |
| $K_1$                     | 264.20                                                     | 290.80                   | 273.80                |
| $K_2$                     | 301.08                                                     | 320.80                   | 299.00                |
| $K_3$                     | 295.00                                                     | 271.00                   | 256.46                |
| $\bar{K}_1$               | 88.06                                                      | 96.93                    | 91.26                 |
| $\bar{K}_2$               | 100.36                                                     | 106.93                   | 99.66                 |
| $\bar{K}_3$               | 98.33                                                      | 90.33                    | 85.48                 |
| 极差 range                  | 12.30                                                      | 16.60                    | 14.18                 |

$K_i$ 为影响雾滴覆盖率因素为梯度*i*时,各因素所对应的雾滴覆盖率试验结果之和; $\bar{K}_i$ 为*K*的均值。

$K_i$  is the sum of the fog droplet coverage test results corresponding to each factor when the factor affecting fog droplet coverage is gradient *i*;  $\bar{K}_i$  is the mean of *K*.

2.3 不同飞行高度、速度及喷幅下的雾滴直径

根据对不同喷幅、飞行高度及飞行速度下雾滴直径的试验结果(图 3)分析,得出以下结论:在 9 组试验中,尽管燕麦叶片上的雾滴直径在不同处理下有所变化,但整体上并未表现出显著的差异。处理 7(喷幅为 4 m/mL、作业高度 1.5 m、作业速度 5 m/s)燕麦叶片上的雾滴直径达到了 1 447 μm,这一数值远优于其他试验小组,处理 4(喷幅为 4 m/mL、作业高度 1.5 m、作业速度 4.5 m/s)靶区内雾滴直径也表现较好,为 1 329.4 μm,仅次于处理 7。处理 9(喷幅为 5 m/mL、作业高度 2.5 m、作业速度 6 m/s)燕麦叶片上的雾滴直径仅为 488.4 μm,这一数值显著低于其他 8 组处理。综合 9 个处理的结果,发现雾滴直径与作业高度和喷幅之间相互影响。随着作业高度的降低和喷幅的减小,雾滴直径呈现出增加的趋势。这一发现为优化植保无人机的作业参数提供了参考,以便在保证雾滴覆盖均匀性的同时,获得更理想的雾滴直径,从而提高农药的附着效果和防治效果。



图中不同小写字母表示在不同喷幅、飞行高度和飞行速度之间经邓肯氏新复极差法检验在 0.05 水平上差异显著。  
Different lowercase letters in the figure indicate significant differences at the 0.05 level between different spray amplitudes, flight heights, and flight speeds, as tested by Duncan's new complex range method.

图3 不同喷幅、飞行高度及飞行速度下雾滴直径

Fig.3 Droplet diameter under different spray amplitudes, flight heights, and flight speeds

根据不同喷幅、飞行高度及飞行速度下施药雾滴直径的极差分析试验结果(表 5),可以得出以下结论:在影响燕麦叶片雾滴直径的因素中,作业速度、喷幅和作业高度均发挥了作用,它们的主次顺序并不一致。影响因素从大到小依次为作业速度、喷幅和作业高度。在植保无人机喷施过程中,作业速度的变化对雾滴直径的影响最为显著。这可能是因为作业速度的改变直接影响到单位时间内雾滴的释放量和分布,从而影响雾滴直径的大小。3 种因素在燕麦叶片对雾滴直径的影响主次顺序不一致,这表明在实际应用中,需要综合考虑各种因素,以找到最佳的作业参数组合,从而确保雾滴在燕麦叶片上的均匀分布和有效沉积。

表 5 不同喷幅、飞行高度及飞行速度下施药雾滴直径极差分析试验结果

Tab.5 Analysis of the range of spray droplet diameters under different spray amplitudes, flight altitudes, and flight speeds

| 极差计算<br>Range calculation | 雾滴直径/(μm·个 <sup>-1</sup> )<br>Droplet size |                          |                       |
|---------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
|                           | 喷幅<br>Spray amplitude                      | 飞行高度<br>Flight altitudes | 飞行速度<br>Flight speeds |
|                           |                                            |                          |                       |
| $K_1$                     | 2 205.80                                   | 2 416.21                 | 2 040.21              |
| $K_2$                     | 3 108.00                                   | 3 204.00                 | 3 254.17              |
| $K_3$                     | 2 594.40                                   | 2 927.10                 | 1 987.93              |
| $\bar{K}_1$               | 735.26                                     | 805.40                   | 680.07                |
| $\bar{K}_2$               | 1 036.00                                   | 1 068.00                 | 1 084.73              |
| $\bar{K}_3$               | 864.80                                     | 975.70                   | 662.64                |
| 极差 Range                  | 300.74                                     | 262.60                   | 422.09                |

$K_i$ 为影响雾滴覆盖率因素为梯度*i*时,各因素所对应的雾滴覆盖率试验结果之和; $\bar{K}_i$ 为*K*的均值。  
 $K_i$  is the sum of the fog droplet coverage test results corresponding to each factor when the factor affecting fog droplet coverage is gradient *i*;  $\bar{K}_i$  is the mean of *K*.

2.4 对燕麦田杂草防效分析

2.4.1 施药后燕麦田安全性调查

药后 7, 14, 20 d 对田间燕麦进行安全性调查,结果表明,在药后 7 d、14 d 各处理下药害级别均为 1 级,

燕麦生长一切正常,各处理对燕麦安全性高。在药后 20 d 添加不同喷雾助剂由于燕麦生长恢复药害级别均为 0 级,未发现燕麦出现药害症状,燕麦的生长发育与空白对照基本一致。

2.4.2 施药后燕麦田防效调查结果

田间杂草调查结果显示,植保无人机在喷施 480 g/L 灭草松 AS 时,通过调整喷幅、作业高度和作业速度,能有效防除燕麦田中的阔叶杂草,特别是对蒺藜、猪殃殃、藜等杂草的防除效果良好。从表 6 的数据中,可以观察到以下几点:施药后 20 d,不同处理条件下的株防效为 73.87%~88.10%。其中,处理 7(喷幅为 4 m/mL、作业高度 1.5 m、作业速度 5 m/s)的株防效最高,达到了 88.10%,并且与其他 8 组处理存在显著差异。施药后 40 d,株防效为 74.20%~87.07%,鲜重防效为 78.38%~91.45%。处理 7 的株防效和鲜重防效均为最佳,分别为 87.07% 和 91.45%。在处理 7 与处理 3(喷幅为 6 m/mL、作业高度 2.5 m、作业速度 4 m/s)之间,株防效存在显著差异,但与其他处理差异不显著。整体来看,随着时间的增加(从 20 d 到 40 d),480 g/L 灭草松 AS 对燕麦田杂草的控制作用逐渐增强。这表明 480 g/L 灭草松 AS 在土壤中具有一定的持效性,能够持续发挥除草作用。在所有处理中,处理 7(喷幅为 4 m/mL、作业高度 1.5 m、作业速度 5 m/s)的防除效果最佳,无论是株防效还是鲜重防效都达到了最高值。表明在植保无人机喷施灭草松时,选择适当的喷幅、作业高度和作业速度对于提高除草效果至关重要。综上所述,为了获得最佳的除草效果,建议在使用植保无人机喷施 480 g/L 灭草松 AS 时,选择喷幅为 4 m/mL、作业高度 1.5 m、作业速度 5 m/s 的参数组合。

表 6 药后 20 d、40 d 不同处理对燕麦田的株防效和鲜重防效  
Tab.6 Plant and fresh weight control effects of different treatments on oat fields  
after 20 and 40 days of treatment

| 处理<br>Handle | 药后                       | 药后                       |                                        |
|--------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------------|
|              | After medication 20 d    | After medication 40 d    |                                        |
|              | 株防效/%<br>Plant imitation | 株防效/%<br>Plant imitation | 鲜重防效/%<br>Fresh quality control effect |
| 1            | 73.87e                   | 74.20e                   | 81.31cde                               |
| 2            | 81.35bc                  | 82.05bc                  | 86.36b                                 |
| 3            | 83.70b                   | 83.92ab                  | 86.56b                                 |
| 4            | 78.48cd                  | 79.47bcd                 | 81.18cde                               |
| 5            | 79.34c                   | 77.98cde                 | 84.23bc                                |
| 6            | 75.25de                  | 75.54de                  | 78.38e                                 |
| 7            | 88.10a                   | 87.07a                   | 91.45a                                 |
| 8            | 81.81bc                  | 82.01bc                  | 83.06bcd                               |
| 9            | 74.15e                   | 73.77e                   | 79.41de                                |
| CK           | 0                        | 0                        | 0                                      |

同列数字后不同小写字母表示在  $P<0.05$  水平上差异显著。  
Different lowercase letters after the same column of numbers indicate significant differences at the  $P<0.05$  level.

2.4.3 燕麦生物量及产量调查

根据提供的测产分析结果(表 7),可以得出以下结论:处理 7(喷幅为 4 m/mL、作业高度 1.5 m、作业速度 5 m/s)在防除燕麦杂草后,与其他 8 组处理相比,增产效果最为显著,增产率达到了 10.59%。这表明在这组参数下,植保无人机喷施 480 g/L 灭草松 AS 不仅有效防除了杂草,还显著提高了燕麦的产量。所有 9 个处理(包括处理 7)的折合产量都比对照提高了 5.44%~10.09%,产量增加了 278~437.47 kg/hm<sup>2</sup>。这说明通过植保无人机喷施 480 g/L 灭草松 AS 进行杂草防除,对燕麦产量有积极的促进作用。处理 4(喷幅为 4 m/mL、作业高度 1.5 m、作业速度 4.5 m/s)在所有处理中增产率最低,仅为 5.44%。从处理 7 和处理 4 的对比中可以看出,喷幅、作业高度和作业速度的选择对燕麦产量有显著影响。因此,在实际应用中,需要根据具体情况选择合适的参数组合,以达到最佳的除草效果和产量提升。综上所述,通过植保无人机



喷施 480 g/L 灭草松 AS 进行杂草防除,可以有效提高燕麦的产量。在处理参数的选择上,喷幅为 4 m/mL、作业高度 1.5 m、作业速度 5 m/s 的组合表现最佳,增产效果显著。

表 7 无人机不同喷幅、作业高度、作业速度下防除燕麦田的生物量及产量

Tab.7 Biomass and yield of oat fields controlled by drones under different spraying amplitudes,operating heights,and operating speeds

| 处理<br>Handle   | 千粒质量/g<br>1 000 grain weight | 产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Production | 增产率/%<br>Yield increase rate |
|----------------|------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| T <sub>1</sub> | 31.00±1.00 <sup>bc</sup>     | 4 457.13±56.28 <sup>b</sup>             | 7.94                         |
| T <sub>2</sub> | 32.66±1.15 <sup>b</sup>      | 4 471.72±73.85 <sup>b</sup>             | 8.30                         |
| T <sub>3</sub> | 33.00±1.00 <sup>b</sup>      | 4 408.29±27.23 <sup>bcd</sup>           | 6.76                         |
| T <sub>4</sub> | 29.66±1.15 <sup>c</sup>      | 4 353.86±38.29 <sup>d</sup>             | 5.44                         |
| T <sub>5</sub> | 29.66±1.15 <sup>c</sup>      | 4 453.15±34.38 <sup>b</sup>             | 7.85                         |
| T <sub>6</sub> | 33.33±1.15 <sup>b</sup>      | 4 406.89±14.99 <sup>bcd</sup>           | 6.73                         |
| T <sub>7</sub> | 37.00±2.64 <sup>a</sup>      | 4 566.36±46.11 <sup>a</sup>             | 10.59                        |
| T <sub>8</sub> | 31.00±1.00 <sup>bc</sup>     | 4 431.83±23.94 <sup>bc</sup>            | 7.33                         |
| T <sub>9</sub> | 32.00±2.00 <sup>bc</sup>     | 4 362.53±35.44 <sup>cd</sup>            | 5.65                         |
| CK             | 31.56±2.33 <sup>b</sup>      | 4 128.89±18.71 <sup>c</sup>             | 0                            |

“千粒质量、产量”数据为“平均值±标准差”,数据后同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

The data for “thousand grain weight and yield” in the table are “mean ± standard deviation”, and different lowercase letters in the same column after the data indicate significant differences ( $P<0.05$ ).

3 结论与讨论

本试验通过大疆 T30 植保无人机地面站实时传输无人机的飞行参数,测定了植保无人机施药防除燕麦田杂草雾滴沉积特性及对杂草的防除效果,使用 480 g/L 灭草松 AS 对无人机在高原地区燕麦上进行不同飞行参数下的喷雾测试,得出如下结论:

(1)大疆 T30 植保无人机喷施 480 g/L 灭草松 AS 3 000 mL/hm<sup>2</sup>,在 2 种作业参数下即速度 5 m/s、高度 1.5 m、喷幅 4 m 和喷幅为 5 m/mL、作业高度 2 m、作业速度 4 m/s,雾滴覆盖率效果较好,其中前者雾滴覆盖率最大为 6.98%,后者雾滴覆盖率为 5.24%。在另外 2 种作业参数速度 5 m/s、高度 1.5 m、喷幅 4 m 和喷幅为 5 m/mL、作业高度 2 m、作业速度 4.5 m/s,雾滴密度效果较佳,雾滴密度依次为 107.8 个/cm<sup>2</sup>、100.08 个/cm<sup>2</sup>。(2)用植保无人机大疆 T30 喷施 480 g/L 灭草松 AS3000 mL/hm<sup>2</sup>对杂草的控制效果,试验结果表明植保无人机在杂草防除方面具有较好的应用潜力。当作业参数设置为速度 5 m/s、高度 1.5 m、喷幅 4 m 时,燕麦田株防效、鲜重防效以及收获后的千粒质量、产量和增产率均为最优,此组参数不仅保证了较好的防除效果,同时也考虑了无人机作业效率,减少了起落架次。综合考虑在使用植保无人机进行杂草防除时,在燕麦苗期结合施药时的气象条件,选择合适的作业参数。尽管植保无人机在杂草防除方面表现出较好的潜力,但除草剂喷施还需与田间管理相结合,如合理施肥、灌溉和耕作等,以达到最佳的杂草防除效果和作物产量。这些结论不仅为植保无人机在高原地区燕麦田杂草防除中的应用提供了数据支持,也为未来相关研究和应用提供了参考。

近几年来,随着无人机技术的发展,无人机在植保、航拍、消毒等各方面的应用越来越多<sup>[26]</sup>,植保无人机在高原地区由于受到海拔高度的影响,部分电机转速较小的无人机在该地区无法起飞,而且在试验当中发现相比于平原地区,在高海拔地区飞行植保无人机载药量会大大降低,并且在海拔 3 000 m 以上续航时间会缩短 2~3 min,地面站上显示的电池百分比和剩余飞行时间不准确,需要根据电池电芯电压判断剩余飞行时间。对冠层较大的作物进行施药时,要求植保机械的雾滴穿透力强,作物冠层的上、中、下各部位叶片能均匀受药<sup>[27]</sup>。植保无人机喷雾对比背负式人工喷雾具有多项优势,它能够超低空飞行,药液相对漂移少,对环境污染低,灵活方便,节约劳动力,降低植保成本等<sup>[28]</sup>。植保无人机喷施

除草剂防治燕麦田杂草试验中,通过改变不同的喷幅、飞行高度、飞行速度,对靶标作物进行雾滴沉积特性及防效研究,得到了适合植保无人机喷施的参数设置,为植保无人机在燕麦田喷施除草剂提供了数据支撑。综合高原地区燕麦各层喷雾效果,影响植保无人机作业效果的原因有很多,包括机型、气象条件、冠层结构、施药液量、飞行高度、飞行速度<sup>[29-30]</sup>以及缓冲区距离<sup>[31-32]</sup>,还包括固定翼和旋翼<sup>[33]</sup>的缓冲区距离及冠层枝叶对雾滴在冠层内穿透分布的规律<sup>[34]</sup>。在试验过程中,大疆 T30 植保无人机既能够在海拔较高的高原地区飞行,而且操作难度相对较小。喷幅为 4 m/mL、作业高度 1.5 m、作业速度 5 m/s 时与喷幅为 5 m/mL、作业高度 2 m、作业速度 4 m/s 时雾滴覆盖率效果较好,产生这种现象可能是由于作业高度越低以及喷幅越小雾滴覆盖率效果越好。作业参数不同时,雾滴沉积量也有较大差距,当喷幅为 4 m/mL、作业高度 1.5 m、作业速度 5 m/s 时,雾滴在靶区内中靶率增加,从而增大了雾滴沉积量;当不同作业参数时,雾滴直径在靶标作物上的大小随作业高度越低、作业速度越快时雾滴直径而增大,雾滴直径较小容易受到飘移及蒸影响导致沉积量少,且飘移会影响施药安全。对于一些处理中,20 d 与 40 d 株防效相比较,随着施药后时间的增加,株防效降低,产生这种现象的原因可能是灭草松为选择性触杀型苗后除草剂,同时还具有一定的内吸功能,在喷洒时会被杂草叶片和根部吸收,在植物体内传导,抑制杂草生长,药后 20 d 植保无人机喷雾防除燕麦田杂草的雾滴沉积特性及除草效果杂草叶片逐渐发黄、枯死,所以在药后 20 d 和 40 d 对比株防效时,才会出现株防效下降,但鲜重防效总体提高的情况。利用无人机进行高原地区燕麦杂草防除时,可以参照本研究筛选出的最佳飞行参数,并根据燕麦的长势、时期来适当的进行调整,避免因无人机飞行高度太低风场过大造成作物损伤或者过高影响化学防治效果。

#### 参考文献 References:

- [1] 彭远英,颜红海,郭来春,等.燕麦属不同倍性种质资源抗旱性状评价及筛选[J].生态学报,2011,31(9):2478-2491.  
PENG Y Y, YAN H H, GUO L C, et al. Evaluation and selection on drought-resistance of germ plasm resources of *Avena* specie with different types of ploidy[J]. Acta ecologica Sinica, 2011, 31(9): 2478-2491.
- [2] 赵桂琴,师尚礼.青藏高原饲用燕麦研究与生产现状、存在问题与对策[J].草业科学,2004(11):17-21.  
ZHAO G Q, SHI S L. Research and production status, existing problems and countermeasures of forage oat in Qinghai-Tibet plateau[J]. Pratacultural science, 2004(11): 17-21.
- [3] 刘振恒,武高林,仁青草,等.发展以燕麦为支柱产业的可持续高寒草地畜牧业[J].草业科学,2007(9):67-69.  
LIU Z H, WU G L, REN Q C. The role of oat in sustainable development of animal husbandry in alpine region[J]. Pratacultural science, 2007(1): 10-12.
- [4] 王永刚.播期与刈割期对不同品种燕麦产量及品质的影响[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2019.  
WANG Y G. Effects of sowing date and cutting period on yield and quality of different oat varieties[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, 2019.
- [5] 张磊,欧阳竹,董玉红,等.农田生态系统杂草的养分和水分效应研究[J].水土保持学报,2005(2):69-72.  
ZHANG L, OU Y Z, DONG Y H, et al. Ecological effects of weeds on soil water and soil nutrient in farmland ecosystem[J]. Journal of soil and water conservation, 2005(2): 69-72.
- [6] LEONARD G. The potential for organic agriculture to feed the world is being oversold[J]. Outlooks on pest management, 2009, 20(1): 4-5.
- [7] ESEHAGHBEYGI A, TADAYYON A, BESHATI S. Effect of droplet size on weed control in wheat[J]. Journal of plant protection research, 2011, 51(1): 18-22.
- [8] 王国宾,王十周,陈鹏超,等.植保无人机喷施不同雾滴粒径药剂对其在棉花冠层沉积、穿透及脱叶催熟效果的影响[J].植物保护学报,2021,48(3):493-500.  
WANG G B, WANG S Z, CHEN P C, et al. Effect of spraying droplet size with drones on deposition, penetration, and cotton harvest-aid efficacy[J]. Journal of plant protection, 2021, 48(3): 493-500.
- [9] 何玲,王国宾,胡韬,等.喷雾助剂及施液量对植保无人机喷雾雾滴在水稻冠层沉积分布的影响[J].植物保护学报,2017,44(6):1046-1052.

- HE L, WANG G B, HU T, et al. Influences of spray adjuvants and spray volume on the droplet deposition distribution with unmanned aerial vehicle(UAV) spraying on rice[J]. Journal of plant protection, 2017, 44(6): 1046-1052.
- [10] CHEN Y, QI H L, LI G Z, et al. Weed control effect of unmanned aerial vehicle(UAV) application in wheat field[J]. International of precision agricultural aviation, 2019, 2(2): 25-31.
- [11] 袁会珠, 杨代斌, 闫晓静, 等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 14-20.
- YUAN H Z, YANG D B, YAN X J, et al. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application[J]. Plant protection, 2011, 37(5): 14-20.
- [12] KNOCHE M. Effect of droplet size and carrier volume on performance of foliage-applied herbicides[J]. Crop protection, 1994, 13(3): 163-178.
- [13] 邵扬, 郭延平, 闵庚梅, 等. 不同功能除草剂对蚕豆生长和田间杂草的防治效果[J]. 作物杂志, 2023(3): 254-259.
- SHAO Y, GUO Y P, MIN G M, et al. The effect of different functional herbicides on the growth of broad beans and the control of weeds in the field[J]. Crops, 2023(3): 254-259.
- [14] 王丽玮, 段婧, 东保柱, 等. 2甲·溴苯腈和苯磺隆混用对燕麦田阔叶杂草的防效[J]. 杂草学报, 2021, 39(3): 71-82.
- WANG L W, DUAN J, DONG B Z, et al. Efficacy of MCPA·bromoxynil combined with tribenuron-methyl on broadleaved weeds in *Avena sativa* L. fields[J]. Journal of weed science, 2021, 39(3): 71-82.
- [15] 罗思荃, 曹轩, 刘乐, 等. 啶磺草胺与双氟磺草胺协同防除冬小麦田杂草效果及对小麦产量的影响[J]. 杂草学报, 2022, 40(1): 69-76.
- LUO S Q, CAO X, LIU L, et al. Cooperative control effect of pyroxulam with florasulam on weeds and influence on the winter wheat yield[J]. Journal of weed science, 2022, 40(1): 69-76.
- [16] 曹诗函. 防除稻田阔叶杂草除草剂组合及协同增效助剂筛选[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- CAO S H. Screening of herbicides and synergistic adjuvants for broad-leaved weeds control in paddy field[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [17] 范明洪, 兰玉彬, 赵德楠, 等. 植保无人机低容量喷雾防除玉米田杂草的雾滴沉积特性及除草效果[J]. 植物保护, 2022, 48(5): 304-309.
- FAN M H, LAN Y B, ZHAO D N, et al. Droplets deposition of herbicide in low volume spraying by UAV in weeds and control effect in maize field[J]. Plant protection, 2022, 48(5): 304-309.
- [18] 袁会珠, 郭永旺, 薛新宇, 等. 植保无人飞机的推广应用对于提高我国农药利用率的作用[J]. 农业工程技术, 2018, 38(9): 46-50.
- YUAN H Z, GUO Y W, XUE X Y, et al. The promotion and application of plant protection unmanned aircraft plays a role in improving the utilization rate of pesticides in China[J]. Agricultural engineering technology, 2018, 38(9): 46-50.
- [19] 张小秋, 宋修鹏, 梁永检, 等. 植保无人机在蔗田化学除草上的应用效果[J]. 中国糖料, 2020, 42(1): 61-65.
- ZHANG X Q, SONG X P, LIANG Y J, et al. The application effect of plant protection drones on chemical weed control in sugarcane fields[J]. Sugar crops of China, 2020, 42(1): 61-65.
- [20] 吕永超, 陈小姝, 曲明静, 等. 适于无人机喷施的花生田苗后除草剂配施技术研究[J]. 花生学报, 2020, 49(3): 68-73.
- LYU Y C, CHEN X S, QU M J, et al. Application technologies of post-emergence herbicide by unmanned aerial vehicle spraying in peanut field[J]. Journal of peanut science, 2020, 49(3): 68-73.
- [21] 王娟, 兰玉彬, 姚伟祥, 等. 单旋翼无人机作业高度对槟榔雾滴沉积分布与飘移影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 109-119.
- WANG J, LAN Y B, YAO W X, et al. The effect of single rotor drone operation height on the deposition and drift of betel nut droplets[J]. Journal of agricultural machinery, 2019, 50(7): 109-119.
- [22] 韩冲冲, 李飞, 李保同, 等. 无人机喷施雾滴在水稻群体内的沉积分布及防效研究[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(1): 58-67.
- HAN C C, LI F, LI B T, et al. A study on deposition distribution of droplets by UAV spray in rice population and its efficacy[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(1): 58-67.
- [23] 王昌陵, 何雄奎, JANE B, 等. 不同飞行参数下八旋翼植保无人机下洗气流场对雾滴沉积分布特性的影响[J]. 智慧农业, 2020, 2(4): 124-136.
- WANG C L, HE X K, JANE B, et al. Effects of downwash airflow field on droplet deposition distribution characteristics of

- eight rotor plant protection drones under different flight parameters[J].Smart agriculture,2020,2(4):124-136.
- [24] 柏超,沈伟棋,杨健,等.不同型号无人机施药对雾滴沉积和稻曲病防效的影响[J].浙江农业科学,2020,61(10):2090-2091.
- BAI C, SHEN W Q, YANG J, et al. The effects of different types of drones on droplet deposition and rice smut control[J]. Journal of Zhejiang agricultural sciences, 2020, 61(10):2090-2091.
- [25] 张瑞瑞,李龙龙,文瑶,等.植保无人机喷施雾滴沉积特性的荧光示踪分析[J].农业工程学报,2020,36(6):47-55.
- ZHANG R R, LI L L, WEN Y, et al. Fluorescence tracing analysis of droplet deposition characteristics in plant protection drone spraying[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(6):47-55.
- [26] 兰玉彬,陈盛德,邓继忠,等.中国植保无人机发展形势及问题分析[J].华南农业大学学报,2019,40(5):217-225.
- LAN Y B, CHEN S G, DENG J Z, et al. Development situation and problem analysis of plant protection unmanned aerial vehicle in China[J]. Journal of south China agricultural university, 2019, 40(5):217-225.
- [27] 陈学庚,赵岩.新疆兵团农业机械化现状与发展趋势[J].华东交通大学学报,2015,32(2):1-7.
- CHEN X G, ZHAO Y. Current situation and development trends of agricultural mechanization in Xinjiang Corps[J]. Journal of east China jiaotong university, 2015, 32(2):1-7.
- [28] 李飞,韩冲冲,李保同.阿维菌素无人机喷施的沉积特征及防效研究[J].江西农业大学学报,2019,41(5):914-923.
- LI F, HAN C C, LI B T. A study of the deposition characteristics and efficacy of abamectin by UAV spraying[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(5):914-923.
- [29] 廖娟,臧英,周志艳,等.作物航空喷施作业质量评价及参数优选方法[J].农业工程学报,2015,31(增刊2):38-46.
- LIAO J, ZANG Y, ZHOU Z Y, et al. Quality evaluation and parameter optimization method for crop aerial spraying operations[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(Sup 2):38-46.
- [30] 袁会珠,薛新宇,闫晓静,等.植保无人机低空低容量喷雾技术应用与展望[J].植物保护,2018,44(5):152-158.
- YUAN H Z, XUE X Y, YAN X J, et al. Applications and prospects in the unmanned aerial system for low-altitude and low-volume spray in crop protection[J]. Plant protection, 2018, 44(5):152-158.
- [31] DUNN A M, JULIEN G, ERNST W R. Evaluation of buffer zone effectiveness in mitigating the risks associated with agricultural runoff in prince Edward Island[J]. Science of the total environment, 2011, 409(5):868-882.
- [32] CRAIG I P. The GDS model-a rapid computational technique for the calculation of aircraft spray drift buffer distances[J]. Computers and electronics in agriculture, 2004, 43(4):235-250.
- [33] ROBINSON R C, PARSONS G. Drift control and buffer zone for helicopter spraying of bracken (*Pteridium aquilinum*) [J]. Agriculture ecosystems and environment, 2000, 79(2/3):215-231.
- [34] LIU X, LIU X, LI Y, et al. Predicting spray deposit distribution within a cotton plant canopy based on canopy stratification porosity and Gaussian process models[J]. Biosystems engineering, 2021, 204:1-14.