

付贞桢, 郭良芝, 郭青云, 等. 飞防助剂对双氟磺草胺防除燕麦田杂草的减量增效作用[J]. 福建农业学报, 2025, 40 (2): 181–188.

FU Z Z, GUO L Z, GUO Q Y, et al. Effect of Additives on Weed Control of Difluosulfamide for Oat Fields[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 40 (2): 181–188.



飞防助剂对双氟磺草胺防除燕麦田杂草的 减量增效作用

付贞桢^{1,2}, 郭良芝², 郭青云², 魏有海^{2*}

(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】评价 2 种飞防助剂对 50% 双氟磺草胺 SC 防除燕麦田杂草的减量增效作用。【方法】采用植保无人机大疆 T30 茎叶喷施除草剂 50% 双氟磺草胺 SC 添加助剂防除燕麦田杂草。【结果】50% 双氟磺草胺 SC 75 mL·hm⁻², 药后 20、40 d 对燕麦田杂草的株防效分别为 60.38% 和 60.16%, 40 d 时对燕麦田杂草的鲜重防效为 81.23%; 50% 双氟磺草胺 SC 67.5 mL·hm⁻²+迈飞 180 mL·hm⁻²、50% 双氟磺草胺 SC 60 mL·hm⁻²+迈飞 180 mL·hm⁻²、50% 双氟磺草胺 SC 52.5 mL·hm⁻²+迈飞 180 mL·hm⁻²、50% 双氟磺草胺 SC 37.5 mL·hm⁻²+迈飞 180 mL·hm⁻² 处理药后 40 d 时对燕麦田杂草的株防效分别为 72.31%、71.78%、70.44%、57.64%, 对燕麦田杂草的鲜重防效分别为 83.26%、81.26%、77.92%、62.54%; 50% 双氟磺草胺 SC 67.5 mL·hm⁻²+红雨燕 180 mL·hm⁻²、50% 双氟磺草胺 SC 60 mL·hm⁻²+红雨燕 180 mL·hm⁻²、50% 双氟磺草胺 SC 52.5 mL·hm⁻²+红雨燕 180 mL·hm⁻²、50% 双氟磺草胺 SC 37.5 mL·hm⁻²+红雨燕 180 mL·hm⁻² 处理药后 40 d 对燕麦田杂草的株防效分别为 83.61%、78.28%、71.05%、54.98%, 对燕麦田杂草的鲜重防效分别为 91.43%、91.43%、87.43%、63.22%。【结论】迈飞和红雨燕 2 种飞防助剂对 50% 双氟磺草胺 SC 防除燕麦田杂草具有明显的增效作用, 两种助剂增效差异不明显。添加助剂 180 mL·hm⁻² 均可减少 50% 双氟磺草胺 SC 10%~30% 的使用量, 对燕麦表现安全, 增产率在 6.86%~10.81%。

关键词: 植保无人机; 大疆 T30; 飞防助剂; 双氟磺草胺; 燕麦; 减量增效作用

中图分类号: S436

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2025) 02-0181-08

Effect of Additives on Weed Control of Difluosulfamide for Oat Fields

FU Zhenzhen^{1,2}, Guo Liangzhi², GUO Qingyun², WEI Youhai^{2*}

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

Abstract: 【Objective】Effect of two additives specially designed for drone herbicide-spraying on weed control using difluosulfamide in oat fields was studied. 【Methods】Two plant-safe additives, Maifei (MF) and Red Swift (RS), specially designed to be used on DJI T30 drone for spraying 50% difluosulfamide SC were applied at a rate of 180 mL·hm⁻² to evaluate their effects on reducing the count and fresh weight of weed plants in an oat field. 【Results】The weed control effect indicated by the plant count reduction of the 75 mL·hm⁻² herbicide application was 60.38% after 20 d and 60.16% after 40 d, while the fresh weed weight reduction was 81.23% in 40 d. When 50% difluosulfamide SC was applied at a rate of 67.5 mL·hm⁻² along with MF or RS, the reduction on weed plant count of 72.31% for MF or 83.61% for RS, and that on fresh weed weight of 83.26% for MF or 91.43% for RS were achieved in 40 d. Under the application of 60 mL·hm⁻² herbicide with the additive, the weed plant count was reduced 71.78% for the added MF and 78.28% for RS, and the fresh weed weight decreased 81.26% for the added MF and 91.43% for RS. The 52.5 mL·hm⁻² herbicide and additive addition resulted in a weed plant count decline by 70.44% for MF and by 71.05% for RS and a fresh weight decrease by 77.92% for MF and by 87.43% for RS. When a 37.5 mL·hm⁻² herbicide was applied with the additive, the plant counts became 57.64% for MF and 54.98% for RS, and the

收稿日期: 2024-03-04 修回日期: 2024-09-09

作者简介: 付贞桢 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为农田杂草治理与利用, E-mail: 674573455@qq.com

* 通信作者: 魏有海 (1972—), 男, 研究员, 主要从事农田杂草治理与利用研究, E-mail: youhaiweiqh@163.com

基金项目: 青海省中央引导地方科技发展资金专项 (2025ZY030)

fresh weight 57.64% for MF and 63.22% for RS lower than without the treatment. 【Conclusion】 Both MF and RS exerted a significant synergistic effect with the herbicide spray on weed control in the field. Moreover, it appeared that the application of diflufenican SC could be reduced by 10%–30% while the oat yield increased by 6.86%–10.81% through the safe addition of these additives.

Key words: plant protection drone; DJI T30; additive for drone spraying; diflufenican; oat; dosage reduction and efficiency improvement

0 引言

【研究意义】燕麦 (*Avena sativa* L.) 属禾本科燕麦属, 是一种重要的粮食和饲料兼用的作物, 燕麦籽粒产品在营养和医疗保健方面具有很高的价值^[1-2]。燕麦起源于中国, 已有超过 5 000 年的种植历史, 年种植面积达 250 万 hm^2 ^[3]。中国的燕麦主产区包括内蒙古、河北、甘肃、山西、陕西、宁夏、云南、四川、贵州、青海等地。杂草是造成燕麦产量降低的主要原因之一, 在燕麦种植过程中, 杂草与燕麦争夺养分和水分^[2], 导致燕麦的产量和品质急剧下降, 施用除草剂是防除杂草最有效的方法。燕麦田化学除草主要采用苗后茎叶处理, 如苯磺隆、二甲四氯、双氟磺草胺等除草剂^[4], 双氟磺草胺是由美国陶氏农业科学公司开发的三唑嘧啶磺酰胺类除草剂新品种, 属内吸传导型除草剂, 杀草谱广, 可防除麦田猪殃殃、麦家公、泽漆等难防杂草。在低温下药效稳定, 即使是在 2 $^{\circ}\text{C}$ 时仍能保证稳定药效^[5]。近年来, 我国耕种和收割基本实现机械化, 但现代农业对高效植保机械的需求仍不断增长。2016 年底数据显示, 93% 的植保作业仍靠手动施药。人工植保作业效率低、利用率低、安全性低、劳动强度大。随着城镇化发展, 农业人工成本增加推动农业机械化, 农户对植保机械需求不断增长。【前人研究进展】作为一种新兴的施药技术, 植保无人机施药具有作业效率高、防治效果好、同时节水节药的优势和特点, 在部分农作物病虫害防治中成为首选的施药工具, 被广泛应用于棉花、小麦、水稻等的病虫害防治^[6-8]。此外, 在实际应用过程中, 由于飘移、径流、雾化等因素, 药液损失较大, 利用率不高, 过量使用除草剂还会对作物产生药害。喷雾助剂是一种在施药前与农药混合使用的辅助剂, 其主要作用是增强药液在植物叶片上的润湿、附着、展布和渗透等界面特性^[9]。通过合理添加喷雾助剂, 可以降低药液的表面张力, 增加药液的黏度, 减小喷雾雾滴的粒径, 提高雾滴的铺展系数, 从而降低除草剂的使用量并提高其药效^[10-14]。【本研究切入点】目前, 植保无人机主要应用于大棚、果

园、水稻等作物的病虫害预警和防治、灌溉、喷洒等方面, 而利用植保无人机因化学除草剂的选择性和漂移药害等问题, 仍处于探索研究中。因此, 针对植保无人机施药专用农药制剂和助剂的研究有待深入进行。【拟解决的关键问题】以燕麦田杂草为防除对象, 进行植保无人机飞防助剂与除草剂混用, 以期探明飞防助剂对双氟磺草胺防除燕麦田杂草的减量增效作用。

1 材料与方法

1.1 供试药剂

(1) 50% 双氟磺草胺 SC, 山东光扬科技有限公司; (2) 迈飞飞防专用增效剂 (北京广源益农化学有限责任公司), 是一种无人机专用精油增效剂, 抗漂移促附着飞防助剂。(3) 红雨燕飞防专用喷雾增效剂 (深圳诺普信农化股份有限公司), 主要成分为 30% 多聚缩合物、30% 多元醇、15% 多聚酸盐、10% 脂肪醇乙氧基化合物和 5% 高分子聚合物, 是一种低容量喷洒专用助剂。

1.2 供试作物

燕麦品种为林纳。

1.3 供试仪器

大疆 T30 植保无人机, 深圳市大疆创新科技有限公司。作业效率为 $16 \text{ h} \cdot \text{hm}^{-2}$, 该植保无人机能够自主飞行, 利用实时动态 (Real - Time Kinematic) 差分定位技术实现厘米级精准定位, 全方向避障雷达, 采用喷头型号为 SX11001VS, 最大喷头流量 $8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.4 试验方法

如表 1 所示, 试验设 50% 双氟磺草胺 SC $75 \text{ mL} \cdot \text{hm}^{-2}$ 单用处理 (用 F 表示), 每公顷按 180 mL 分别添加迈飞助剂和 50% 双氟磺草胺 SC $67.5 \text{ mL} \cdot \text{hm}^{-2}$ (较推荐剂量减少 10%, 以 F-10+M 表示)、 $60.0 \text{ mL} \cdot \text{hm}^{-2}$ (较推荐剂量减少 20%, 以 F-20+M 表示)、 $52.5 \text{ mL} \cdot \text{hm}^{-2}$ (较推荐剂量减少 30%, 以 F-30+M 表示)、 $37.5 \text{ mL} \cdot \text{hm}^{-2}$ (较推荐剂量减少 50%, 以 F-50+M 表示) 混用; 每公顷按 180 mL 添加红雨燕助剂, 50% 双氟磺草胺 SC 剂量设置和迈飞相同的减量比例进行混用

处理，分别以 F-10+R、F-20+R、F-30+R、F-50+R 表示，喷施等药液量的清水为空白对照；小区布局与排列：试验采用随机区组排列方式，将 10 个处理（包括清水对照），每个处理重复 3 次，共 30 个小区。各小区之间严格按照设计要求设置隔离区，小区宽度为 5 m，长度为 20 m，大区面积 20 m×100 m。保护行设置：在整个试验区的周边设置宽度不小于 3 m 的保护行，保护行种植与试验田相同的燕麦品种。在实际操作中，对保护行的杂草生长情况进行密切监测，及时清除可能影响试验的杂草。

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

处理 Treatments	化学药剂+助剂 Herbicide+Piperonyl butoxide	剂量 Dosage/ (mL·hm ⁻²)
F	50%双氟磺草胺SC	75.00
F-10+M	50%双氟磺草胺SC+迈飞	67.50+180
F-20+M	50%双氟磺草胺SC+迈飞	60.00+180
F-30+M	50%双氟磺草胺SC+迈飞	52.50+180
F-50+M	50%双氟磺草胺SC+迈飞	37.50+180
F-10+R	50%双氟磺草胺SC+红雨燕	67.50+180
F-20+R	50%双氟磺草胺SC+红雨燕	60.00+180
F-30+R	50%双氟磺草胺SC+红雨燕	52.50+180
F-50+R	50%双氟磺草胺SC+红雨燕	37.50+180
CK	清水对照	—

1.5 试验地概况

2023 年试验设在青海省西宁市湟中区鲁沙尔镇朱家庄村（101°31'44"E, 36°29'12"N），属雨养农业区，海拔 3084 m。试验地土壤为黑钙土，全 N 含量 4.39 g·kg⁻¹，全 P₂O₅ 含量 2.99 g·kg⁻¹，全 K₂O 含量 27.55 g·kg⁻¹，碱解 N 266 mg·kg⁻¹，速效 P 35.3 mg·kg⁻¹，速效 K 64 mg·kg⁻¹，土壤有机质含量为 80.99 g·kg⁻¹，pH 为 7.42。试验地前茬作物为白菜型油菜。

6 月 21 日进行施药处理，天晴，施药时东北风 2 级，气温 22 ℃，相对湿度 62%，试验区燕麦叶龄 3 叶 1 心至 5 叶占 80% 以上，田间优势杂草种群藜（*Chenopodium album* L.）为 1~3 叶龄期、猪殃殃（*Galium spurium*）1~3 轮叶、野油菜 [*Brassica juncea*（L.） Czern. et Coss.] 3~4 叶、密花香薷（*Elsholtzia densa* Benth）1~3 对叶、繁缕 [*Stellaria media*（L.） Cyr.] 2~4 轮叶、泽漆（*Eu-phorbia helioscopia* Linn.）子叶 4~5 叶。

1.6 试验调查与数据统计

1.6.1 杂草防效调查

杂草株数测定工具与方法：在药后 20 d 和 40 d

调查杂草株数时，使用专门定制的 0.25 m² 金属样方框。将样方框随机放置在每个小区对角线的 3 个取样点上，确保样方框内的杂草分布具有代表性。对于样方框内的杂草，仔细区分不同种类，按照禾本科杂草、阔叶杂草等分类进行计数，记录每类杂草的具体株数。在计数过程中，对于一些难以判断的幼苗，借助植物分类图鉴或专业的植物识别软件进行准确鉴定，确保数据的准确性。

杂草鲜重测定工具与处理：药后 40 d 测定杂草鲜重时，使用精度为 0.01 g 的电子天平。将样方内采集的杂草地上部分小心剪下，去除根部附着的土壤和杂质，用清水冲洗干净后，用吸水纸吸干表面水分，然后立即在电子天平上称重，记录每个样方内杂草的鲜重数据。对于鲜重较大的杂草样本，为了提高称量的准确性，可将其分成若干小份分别称重，最后汇总计算总鲜重。

具体的计算公式如下。株防效/%=[（对照区株数-处理区株数）/对照区株数]×100；鲜重防效/%=[（对照区杂草鲜重-处理区杂草鲜重）/对照区杂草鲜重]×100。

1.6.2 作物安全性评价

药后不同时期观察燕麦对各药剂处理的反应，比较记录与清水对照区燕麦的叶色、长势等形态差异。燕麦药害程度参考我国农业行业标准药害等级划分^[15]（表 2）评价记录药害程度^[16]。

表 2 药害分级标准
Table 2 Standards for classifying damages on plants induced by herbicide

药害级别 Drug damage level	药害程度特征 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

燕麦产量构成因素测定：在燕麦成熟收获前，每个小区随机选取 10 个样点，每个样点选取 1 m² 面积内的燕麦植株。测定燕麦的株高，使用卷尺从地面测量到燕麦植株的最高处（不包括芒），记录平均值；统计单位面积内的有效穗数，仔细计数样方内的所有有效麦穗数量；随机选取 20 个麦穗，测定每穗粒数，通过人工计数每个麦穗上的麦粒数量，计算平均值；同时，随机选取 1 000 粒燕麦种子，使用精度为 0.01 g 的电子天平称重，测定千粒重。通

过这些产量构成因素的测定，全面分析不同处理对燕麦产量的影响机制。增产率/%=[（处理区产量-对照区产量）/对照区产量]×100。

1.6.3 数据处理

使用 Excel 2007 进行数据数据处理和分析。采用 SPSS 26 软件进行统计分析时，除了采用邓肯氏新复极差法对各处理之间防治效果的差异显著性进行分析外，还进行以下分析：计算不同处理间杂草株防效、鲜重防效、燕麦产量、千粒重等指标的变异系数，以评估数据的离散程度和稳定性；进行相关性分析，探究杂草防效与燕麦产量、千粒重之间的相关性，明确杂草防除效果对燕麦产量构成因素的影响程度；预测不同双氟磺草胺用量和助剂添加量组合下的杂草防效和燕麦产量，为实际农业生产提供更具参考价值的数据支持。

2 结果与分析

2.1 不同处理对燕麦田杂草的防除效果

药后观察显示，50% 双氟磺草胺 SC 单用对野油菜等杂草有显著白化、紫色及生长抑制效果。减少其用量并添加增效助剂迈飞或红雨燕，杂草中毒程度各异，减量越少中毒越重。15 d 后，多数杂草干枯死亡。20 d 株防效评估表明（表 3），减量 30% 加迈飞仍优于单用，但减量 50% 效果不佳。而红雨燕助剂在减量 10% 时防效显著优于单用，减量 30% 亦略优，但减量 50% 时防效大幅降低。综合来看，适量减少双氟磺草胺并添加助剂可提升防效，但过度减量则适得其反。两种助剂中，红雨燕在减量较少时表现出更优异的增效作用。

药后 40 d 时调查株防效和鲜重防效，结果（表 3）表明处理组 F 株防效和鲜重防效分别为 60.16%、81.23%，处理组 F-10+M、F-20+M、F-30+M、F-50+M 株防效依次为 72.31%、71.78%、70.44%、57.64%，鲜重防效依次为 83.26%、81.26%、77.92%、62.54%。处理组 F-10+M、F-20+M、F-30+M、F-50+M 株防效分别为 83.61%、78.28%、71.05%、54.98%，鲜重防效分别为 91.43%、91.43%、87.43%、63.22%，50% 双氟磺草胺 SC 减量 30% 添加红雨燕助剂处理的株防效和鲜重防效均高于 50% 双氟磺草胺 SC 单用处理的效果。

添加相同剂量助剂，50% 双氟磺草胺 SC 剂量递减则株防效和鲜质量防效也表现出递减的趋势，和该除草剂推荐剂量单用的效果相比，减量 30% 后添加飞防助剂，株防效略高于单用，而鲜重防效则略低。减量 50% 后添加助剂处理株防效和鲜重防效在

表 3 添加 2 种飞防助剂对双氟磺草胺防除燕麦田杂草防效的影响

Table 3 Effects of two additives designed for drone spraying difluosulfamide for weed control in oat field

处理 Treatments	剂量 Dosage / (mL·hm ⁻²)	药后20 d	药后40 d	
		20 days after herbicide spraying	40 days after herbicide spraying	
		株防效 The Plant control effects/ %	株防效 The Plant control effects/ %	鲜重防效 Fresh weight control effect/ %
F	75	60.38e	60.16d	81.23cd
F-10+M	67.5+180	75.75c	72.31bc	83.26bc
F-20+M	60.0+180	71.55d	71.78c	81.26cd
F-30+M	52.5+180	70.91d	70.44c	77.92d
F-50+M	37.5+180	54.45f	57.64e	62.54f
F-10+R	67.5+180	86.38a	83.61a	91.43a
F-20+R	60.0+180	80.35b	78.28b	91.43a
F-30+R	52.5+180	76.18c	71.05c	87.43ab
F-50+R	37.5+180	52.74f	54.98e	63.22e
CK	0	0	0	0

同列数字后不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下同。
Data with different lowercase letters on same column indicate significant differences at P<0.05. Same for below.

60% 左右，难以控制燕麦生长期杂草危害。在双氟磺草胺相同剂量下添加相同剂量的助剂比较，红雨燕的增效作用明显好于添加迈飞的效果。

2.2 田间优势杂草的防除效果

药后 20 d，各处理对田间杂草防效显著（表 4）。处理 F 对多种杂草防效均较高。添加迈飞或红雨燕助剂后，随双氟磺草胺减量增加，防效逐渐降低，但适量减量（10%~20%）时防效仍优于单用。迈飞助剂在减量较少时防效更佳，红雨燕则在藜和繁缕上表现更优。总体而言，适量减少双氟磺草胺并添加助剂可有效提升防效，但过度减量则防效明显下降。

药后 40 d，对 30% 双氟磺草胺 SC 添加助剂后的防效进行分析。结果（表 5、表 6）表明，适量减少双氟磺草胺并添加迈飞或红雨燕助剂，能显著提升对藜、密花香薹等杂草的株防效和鲜重防效。迈飞助剂在处理 F-10+M 和 F-20+M 时表现尤为突出，株防效和鲜重防效均优于单用处理 F。然而，当减量达 50% 时，防效明显下降。红雨燕助剂则在鲜重防效上展现出优势，特别是在处理 F-10+R 和 F-20+R 时，鲜重防效接近或超过 90%。但同样地，减量过多会导致防效显著降低。综上所述，适量添

表 4 添加 2 种飞防助剂对双氟磺草胺防除燕麦田间优势杂草株防效的影响（药后 20 d）
Table 4 Effects of two additives on weed control of difluosulfamide in oat fields (20 d after treatment)

处理 Treatments	剂量 Dosage/ (mL·hm ⁻²)	株防效 The Plant control effects/%				
		藜 <i>Chenopodium album</i>	密花香薷 <i>Elsholtzia densa</i>	野油菜 <i>Brassica juncea</i>	繁缕 <i>Stellaria media</i>	猪殃殃 <i>Galium aparine</i>
F	75	84.26bc	83.26ab	81.79a	81.08c	77.84b
F-10+M	67.5+180	91.00a	87.33a	87.27b	90.06a	87.70a
F-20+M	60.0+180	88.23a	86.44ab	85.08ab	85.42b	87.70b
F-30+M	52.5+180	81.80cd	75.97c	75.28b	79.71c	76.25b
F-50+M	37.5+180	61.27e	51.97d	50.21e	50.17d	48.87d
F-10+R	67.5+180	88.34a	83.01b	84.88cd	88.91ab	85.63a
F-20+R	60.0+180	84.96b	83.34ab	83.06a	80.97c	77.35b
F-30+R	52.5+180	79.85d	74.90c	76.34bc	78.30c	74.70b
F-50+R	37.5+180	57.20 f	53.55d	49.95e	52.39d	54.32c
CK	0	0	0	0	0	0

表 5 添加 2 种飞防助剂对双氟磺草胺防除燕麦田间优势杂草株防效的影响（药后 40 d）
Table 5 Effects of two additives on weed control of difluosulfamide in oat fields (40 d after treatment)

处理 Treatments	剂量 Dosage/ (mL·hm ⁻²)	株防效 Plant control efficiency/%				
		藜 <i>Chenopodium album</i>	密花香薷 <i>Elsholtzia densa</i>	野油菜 <i>Sarson</i>	繁缕 <i>Chickweed</i>	猪殃殃 <i>Galium aparine</i>
F	75	84.26b	81.79b	81.08c	78.69cd	77.36bc
F-10+M	67.5+180	90.74a	87.27a	90.06a	86.03a	84.93a
F-20+M	60.0+180	86.64ab	85.08ab	85.4b	80.22bc	80.99b
F-30+M	52.5+180	81.48bc	75.28c	79.71c	77.66cd	74.88c
F-50+M	37.5+180	56.60d	50.21d	50.17d	48.23e	47.23e
F-10+R	67.5+180	85.68ab	84.88ab	88.91ab	84.71ab	84.91a
F-20+R	60.0+180	83.96bc	83.06b	80.97c	77.05cd	75.99bc
F-30+R	52.5+180	78.18c	76.34c	78.30c	73.73e	74.29c
F-50+R	37.5+180	50.53e	49.95d	52.39d	50.54f	53.95d
CK	0	0	0	0	0	0

加助剂能有效增强双氟磺草胺的防除效果，但需注意控制减量幅度以避免防效下降。

综合分析药后 20 d 和 40 d 不同处理对田间优势杂草的防效，发现处理 F-10+M、F-20+M、F-10+R、F-20+R 株防效及鲜重防效均优于处理 F。其中，药后 20 d，处理 F-10+M 藜和繁缕株防效达 91.00%、90.06%。药后 40 d，处理 F-10+M 藜和野油菜株防效达 90.74%、90.06%。药后 40 d，处理 F-10+R 密花香薷和繁缕鲜重防效达 93.66%、92.19%。

对比两种飞防助剂的处理组合，50% 双氟磺草胺 SC 减量 10%~50% 添加红雨燕飞防助剂药后 20 d、40 d 的杂草株防效和鲜重防效均显著高于 50% 双氟磺草胺 SC 减量 10%~50% 添加迈飞飞防助

剂。对于燕麦田优势杂草藜、猪殃殃、密花香薷采用除草剂双氟磺草胺与飞防助剂迈飞、红雨燕结合杂草防除效果显著，对于燕麦田优势杂草野油菜、繁缕采用除草剂 50% 双氟磺草胺 SC 与飞防助剂迈飞、红雨燕结合杂草防除效果与 50% 双氟磺草胺 SC 推荐剂量单剂处理的效果无显著性差异。在 9 组处理中对燕麦田株防效、鲜重防效最低的为 50% 双氟磺草胺 SC 推荐剂量单剂处理，防除效果最佳的为采用除草剂 50% 双氟磺草胺 SC 减量 10% 后添加红雨燕飞防助剂。

2.3 不同处理对燕麦生物量及产量的影响

药后观察显示，燕麦对药剂处理反应轻微，仅处理 F-10+M 和 F-10+R 初期有轻微褪绿，后恢复正

表 6 添加 2 种飞防助剂对双氟磺草胺防除燕麦田间优势杂草鲜质量防效的影响 (药后 40 d)
Table 6 Effects of two additives on fresh weed weight reduction in oat fields (40 d after treatment)

处理 Treatments	剂量 Dosage/ (mL·hm ⁻²)	鲜重防效 Fresh weight control effect/%				
		藜 <i>Chenopodium album</i>	密花香薷 <i>Elsholtzia densa</i>	野油菜 <i>sarson</i>	繁缕 chickweed	猪殃殃 Galium aparine
F	75	79.48ab	77.27cd	74.98c	77.34c	89.88ab
F-10+M	67.5+180	87.45a	89.82ab	90.54a	89.20a	91.39a
F-20+M	60.0+180	85.96a	85.62abc	84.34ab	87.30ab	88.29ab
F-30+M	52.5+180	81.12ab	82.74bc	83.64ab	86.93ab	81.30b
F-50+M	37.5+180	54.48e	61.57e	66.32b	71.26d	79.28c
F-10+R	67.5+180	87.35a	93.66a	88.66a	92.19a	89.28ab
F-20+R	60.0+180	86.70a	89.49ab	86.66ab	86.30ab	88.10ab
F-30+R	52.5+180	85.42a	80.37bcd	81.71ab	84.20ab	87.29b
F-50+R	37.5+180	80.91ab	71.94d	81.97ab	81.60c	71.38d
CK	0	0	0	0	0	0

常；其他处理区燕麦生长正常。收获时（表 7），添加迈飞和红雨燕助剂的各处理组较清水对照增产显著，且能减少 30% 左右双氟磺草胺 SC 用量而不减

产。其中，处理 F-10+M 和 F-10+R 增产率最高，分别达 10.31% 和 10.80%。两种助剂间在增产效果上无显著差异，均能有效提升燕麦产量。

表 7 添加 2 种飞防助剂后双氟磺草胺对燕麦的增产效果
Table 7 Oat yield increase by treatment of difluosulfamide with additives

处理 Treatments	剂量 Dosage/ (mL·hm ⁻²)	千粒重 1 000 grain weight/g	产量 Yields/ (kg·hm ⁻²)	增产率 Yield increase rate/%
F	75	32.72±2.87 ab	4 424.41±68.50 abc	7.51
F-10+M	67.5+180	34.26±1.06ab	4 540.00±203.28ab	10.31
F-20+M	60.0+180	32.96±2.75ab	4 509.00±132.91ab	9.56
F-30+M	52.5+180	31.81±2.56ab	4 398.00±106.52c	6.86
F-50+M	37.5+180	26.59±2.02c	4 001.66±110.18a	-2.76
F-10+R	67.5+180	35.71±2.57a	4 560.00±29.10ab	10.80
F-20+R	60.0+180	33.04±1.77ab	4 548.00±134.35a	10.51
F-30+R	52.5+180	33.15±1.03ab	4 400.00±135.70bc	6.91
F-50+R	37.5+180	26.89±2.53c	4 102.33±114.28d	-0.31
CK	0	31.56±1.96ab	4 115.32±109.16c	0

3 讨论

燕麦田阔叶杂草主要使用双氟磺草胺、灭草松等除草剂防除，由于同一片区域连年种植燕麦，除草剂施用次数多，间隔时间短，造成阔叶杂草对除草剂的敏感性降低，抗药性增加显著，防效下降。50% 双氟磺草胺 SC 对阔叶杂草鲜重抑制率在 70%~90%^[17]，4% 啶磺草胺·双氟磺草胺对看麦娘、车轴草和芥菜等防除效果较好，可用于防除冬小麦田阔叶类杂草^[18]。本研究表明，采用 50% 双氟磺草胺 SC 推荐剂量单用药后 20 d 株防效为 60.38%，

这可能与连年使用双氟磺草胺产生的杂草抗药性有关。利用无人机喷施飞防助剂可以实现减少用量和施药次数的效果，无人机飞防技术在降低防治成本、提高农药利用率方面与传统植保技术的结果一致。植保无人飞机在现代农业综合管理上具有较多优势^[19]，已广泛应用于现代农业生产管理中，研究表明，采用植保无人添加飞防助剂广泛应用于水稻^[20]、小麦^[21-22]、玉米^[23-24]，本研究表明采用植保无人添加飞防助剂迈飞和红雨燕可以显著提高燕麦田杂草的株防效，较 50% 双氟磺草胺 SC 推荐剂量单用后 20 d 株防效提高 26%。近年来，我国飞防助

剂种类不断丰富, 推动了农药的减量增效作用。除草剂的效果受到多种因素的影响, 包括自身特性、剂型、环境条件和靶标表面特性等。如果选择不当或在不良环境条件下使用除草剂, 往往无法达到良好的杂草防控效果。除草剂只有接触到杂草表面才能发挥作用, 但农田杂草表面特性复杂多样, 如纤毛、蜡质以及灰尘等附着物都会限制除草剂的沉积, 导致同一种除草剂对不同种类杂草的防除效果存在明显差异^[25-28]。除草效果的好坏通常取决于除草剂喷洒液的特性以及雾滴在杂草表面的附着、展布、沉积、渗透以及杂草对药液的吸收和传导。在防除杂草的过程中, 选择好的飞防助剂是至关重要的。本研究探究两款助剂对 50% 双氟磺草胺 SC 药剂特性的增效减量作用, 明确了 50% 双氟磺草胺 SC 减量用量, 为 50% 双氟磺草胺 SC 使用助剂合理减量与应用提供参考依据。然而, 由于除草剂药液的亲和性和不同杂草的叶片表面结构和湿润特性会差生不同的影响^[29-31]。在大田的实际应用中, 需要根据农田中的不同目标杂草选择助剂及除草剂在结合不同喷雾器械才能达到减量增效的目标。

4 结论

研究表明, 红雨燕和迈飞这 2 种飞防助剂对 50% 双氟磺草胺 SC 除草剂均有增效作用。其中, 50% 双氟磺草胺 SC 减量 10% 并添加红雨燕飞防助剂的试验组防除效果最佳, 株防效达 96.52%。使用这两款助剂, 50% 双氟磺草胺 SC 减量 20%~30% 时, 其株防效与鲜重防效和推荐剂量效果相当。无人机施药后 7、14、20 d, 对燕麦均无药害, 各处理安全性高。在燕麦田, 添加飞防助剂能提高对不同优势杂草的防效。对千粒重、产量和增产率数据分析发现, 50% 双氟磺草胺 SC 减量 10% 分别添加红雨燕或迈飞飞防助剂的试验组, 燕麦的千粒重、产量和增产率均达最大值。这表明这两种飞防助剂在 50% 双氟磺草胺 SC 减量 10% 时, 均能显著提升燕麦的千粒重、产量和增产率。由此推断, 田间实际应用中, 50% 双氟磺草胺 SC 分别减量 10%、20% 并结合迈飞和红雨燕飞防助剂, 可显著提高燕麦产量和增产率。鉴于杂草抗药性和除草剂导致的环境污染问题, 减量增效成为农田杂草防除热点。后续需进一步筛选针对性除草剂及飞防助剂, 以实现除草剂减量增效, 保护生态环境。

参考文献:

[1] 孙仁国. 盐胁迫对燕麦萌发及生长后期生理生化特性的影响[D].

兰州: 甘肃农业大学, 2010.

SUN R G. Effects of Salt Stress on the Physiological and Biochemical Characteristics of Oat Germination and Late Growth[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010. (in Chinese)

[2] 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, 19(2): 69-72, 113.

ZHANG L, OUYANG Z, DONG Y H, et al. Ecological effects of weeds on soil water and soil nutrient in farmland ecosystem[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(2): 69-72, 113. (in Chinese)

[3] 冯福学, 慕平, 赵桂琴, 等. 西北绿洲灌区饲用燕麦耗水特性及产量变化对水氮耦合的响应[J]. *草业学报*, 2017, 26(8): 74-84.

FENG F X, MU P, ZHAO G Q, et al. Water consumption characteristics and yields of fodder oat under different irrigation and nitrogen fertilization regimes in the northwest oasis irrigation area[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(8): 74-84. (in Chinese)

[4] 宋维敏, 郭良芝, 翁华, 等. 燕麦田除草剂的试验筛选及安全性评价[J]. *青海农林科技*, 2021(1): 3-7.

SONG W M, GUO L Z, WENG H, et al. Screening and safety evaluation of herbicides in oat field[J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2021(1): 3-7. (in Chinese)

[5] 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 pyroxsulam with florasulam on weeds and influence on the winter wheat yield[J]. *Journal of Weed Science*, 2022, 40(1): 69-76. (in Chinese)

[6] 王维, 郑曙峰, 徐道青, 等. 无人机在棉田管理中的应用[J]. *农学学报*, 2021, 11(4): 44-50.

WANG W, ZHENG S F, XU D Q, et al. Application of unmanned aerial vehicle (UAV) in cotton field cultivation management[J]. *Journal of Agriculture*, 2021, 11(4): 44-50. (in Chinese)

[7] 李艳朋, 李猛, 李秀钰. 植保无人机与飞防助剂在小麦赤霉病防治上的应用效果[J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(3): 445-447.

LI Y P, LI M, LI X Y. Application of different plant protection UAV and accessory ingredients in the control of wheat scab[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(3): 445-447. (in Chinese)

[8] 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. (in Chinese)

[9] 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 D, 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. (in Chinese)

[10] AL-KHATIB K, KADIR S, LIBBEY C. Effect of adjuvants on bentazon efficacy in green pea (*Pisum sativum*) [J]. *Weed Technology*, 1995, 9(3): 426-431.

[11] 王成菊, 张文吉. 助剂在除草剂应用中的作用及发展前景[J]. *农药学报*, 2003, 5(1): 12-20.

- WANG C J, ZHANG W J. A review and prospect on herbicide adjuvants[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2003, 5(1): 12–20. (in Chinese)
- [12] 欧阳萧哈, 董立尧, 张洋洋, 等. 4 种助剂对 3 种水稻田常用除草剂减量增效作用[J]. 杂草学报, 2021, 39(1): 67–74.
- OUYANG X H, DONG L Y, ZHANG Y Y, et al. Synergism of four adjuvants on three common herbicides in rice fields[J]. *Journal of Weed Science*, 2021, 39(1): 67–74. (in Chinese)
- [13] 杨云海, 赵芸, 王凯博, 等. 农药助剂对 70% 吡虫啉水分散粒剂在小麦叶片上附着性能的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(6): 954–964.
- YANG Y H, ZHAO Y, WANG K B, et al. The influence of different adjuvants on the adhesion property of 70% imidacloprid WG on wheat leaves[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2019, 34(6): 954–964. (in Chinese)
- [14] 张健, 高原, 姜英, 等. 助剂激健对甲基二磺隆防除抗精 啉禾草灵 藜草的增效作用[J]. 杂草学报, 2019, 37(1): 56–63.
- ZHANG J, GAO Y, JIANG Y, et al. Synergistic effect of adjuvant jijian on mesosulfuron-methyl for the control of fenoxaprop-P-ethyl-resistant *Beckmannia syzigachne*[J]. *Journal of Weed Science*, 2019, 37(1): 56–63. (in Chinese)
- [15] 农业部农药检定所. 农药田间药效试验准则: 第 23 部分除草剂防治苜蓿田杂草 NY/T 1464.23-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [16] 秦娜, 朱灿灿, 李君霞, 等. 不同除草剂的田间防效及对谷子安全性影响[J]. 农业科技通讯, 2022(2): 99–104, 107.
- QIN N, ZHU C C, LI J X, et al. Field control effects of different herbicides and their effects on millet safety[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2022(2): 99–104, 107. (in Chinese)
- [17] XU L Y, ZHU H P, OZKAN H E, et al. Droplet evaporation and spread on waxy and hairy leaves associated with type and concentration of adjuvants[J]. *Pest Management Science*, 2011, 67(7): 842–851.
- [18] ZHU Y Q, GAO Y X, ZHANG C H, et al. Static and dynamic wetting behavior of TX-100 solution on super-hydrophobic rice (*Oryza sativa*) leaf surfaces[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 547: 148–156.
- [19] HE X K, BONDSJ, HERBSTA, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(3): 18–30.
- [20] 程应德, 郑在武, 张超, 等. 植保无人机结合飞防助剂施药防治水稻纹枯病的效果[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(6): 74–75.
- CHENG Y D, ZHENG Z W, ZHANG C, et al. Effect of plant protection drone combined with flying control additives on rice sheath blight[J]. *China Plant Protection*, 2019, 39(6): 74–75. (in Chinese)
- [21] 孙兰兰, 杨慕蕊, 苏旺苍, 等. 不同除草剂对 11 种冬小麦阔叶杂草的防除效果比较[J]. 植物保护, 2022, 48(3): 357–363, 368.
- SUN L L, YANG M H, SU W C, et al. Comparison of the control effects of different herbicides on 11 broadleaf weeds in winter wheat fields[J]. *Plant Protection*, 2022, 48(3): 357–363, 368. (in Chinese)
- [22] 张淑玲, 李朝辉, 孙金旺, 等. “迈飞”“迈丝”助剂应用农药减量对小麦蚜虫的田间防治效果[J]. 农业科技通讯, 2018(12): 79–80.
- ZHANG S L, LI Z H, SUN J W, et al. Field control effect of “Maifei” and “Maysi” additives on wheat aphids by applying pesticide reduction[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2018(12): 79–80. (in Chinese)
- [23] 岳德成, 姜延军, 李青梅, 等. 植保无人机喷施对玉米田土壤处理除草剂的减量效应[J]. 植物保护, 2019, 45(2): 193–198.
- YUE D C, JIANG Y J, LI Q M, et al. Decrement effect of plant-protection UAV spraying on soil-applied herbicides in maize field[J]. *Plant Protection*, 2019, 45(2): 193–198. (in Chinese)
- [24] 岳德成, 柳建伟, 李青梅, 等. 桶混添加辛癸基葡萄糖苷和甲基化植物油对 2 种玉米田除草剂的减量效应[J]. 西北农业学报, 2019, 28(4): 664–673.
- YUE D C, LIU J W, LI Q M, et al. Reduction effects of 2 herbicides by adding octyl glucoside and methylation plant oil in maize fields[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(4): 664–673. (in Chinese)
- [25] 祁力钧, 王沛, 张建华, 等. 杂草叶片表面结构对雾滴铺展和蒸发的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(3): 335–340.
- QI L J, WANG P, ZHANG J H, et al. Influence of weed leaves surface structures on droplet spread and evaporation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(3): 335–340. (in Chinese)
- [26] SANYAL D, BHOWMIK P C, REDDY K N. Leaf characteristics and surfactants affect primisulfuron droplet spread in three broadleaf weeds[J]. *Weed Science*, 2006, 54(1): 16–22.
- [27] ZHANG J W, ZHENG L, JÄCK O, et al. Efficacy of four post-emergence herbicides applied at reduced doses on weeds in summer maize (*Zea mays* L.) fields in North China Plain[J]. *Crop Protection*, 2013, 52: 26–32.
- [28] 付瑞霞, 王俊平, 董立尧. 4 种助剂对异丙隆防除藜草的增效作用[J]. 植物保护, 2021, 47(3): 70–75.
- FU R X, WANG J P, DONG L Y. Synergism of four adjuvants to isoproturon in controlling *Beckmannia syzigachne*[J]. *Plant Protection*, 2021, 47(3): 70–75. (in Chinese)
- [29] 李香菊, 崔海兰, 陈景超, 等. 东北玉米田除草剂减施增效技术途径探讨[J]. 玉米科学, 2021, 29(3): 92–99.
- LI X J, CUI H L, CHEN J C, et al. The ways to minimize dosages and increase efficacy of herbicides in corn in North China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(3): 92–99. (in Chinese)
- [30] 张晨辉, 马悦, 杜凤沛. 表面活性剂调控农药药液对靶润湿沉积研究进展[J]. 农药学报, 2019, 21(S1): 883–894.
- ZHANG C H, MA Y, DU F P. Research progress on the wetting and deposition behaviors of pesticide droplet on target surfaces with the addition of surfactants[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2019, 21(S1): 883–894. (in Chinese)
- [31] 王红春, 石旭旭, 娄远来, 等. 助剂对 20% 氯氟吡氧乙酸乳油润湿性能及对空心莲子草防效的影响[J]. 农药学报, 2015, 17(3): 334–340.
- WANG H C, SHI X X, LOU Y L, et al. Influence of adjuvants on the wettability and the control efficacy against *Alternanthera philoxeroides* of 20% fluroxypyr emulsifiable concentrate[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2015, 17(3): 334–340. (in Chinese)

(责任编辑: 林海清)